

© М.М. Кононенко¹, О.Є. Хоменко¹, А.В. Косенко²

¹ Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна

² Відділення фізики гірничих процесів Інституту геотехнічної механіки ім. М.С.Полякова НАН України, Дніпро, Україна

ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЛІНІЇ НАЙМЕНШОГО ОПОРУ ПРИ ПІДРИВАННІ ЗАРЯДІВ

© M. Kononenko¹, O. Khomenko¹, A. Kosenko²

¹ Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine

² Department of Physics of the Mining Processes of Institute of Geotechnical Mechanics named by N. Poljakov of National Academy of Sciences of Ukraine, Dnipro, Ukraine

NUMERICAL SIMULATION OF THE LINE OF LEAST RESISTANCE DURING THE EXPLOSION OF CHARGES

Мета. Встановити аналітичну закономірність розрахунку максимальної величини лінії найменшого опору (ЛНО) заряду вибухової речовини (ВР) з урахуванням фізико-механічних властивостей масиву порід та детонаційних характеристик вибухівки.

Методика дослідження. Чисельним моделюванням методом скінченних елементів (МСЕ) за зміною напружено-деформованого стану моделі встановлено величину ЛНО при різних діаметрах зарядної порожнини, тиску продуктів вибуху та межі міцності порід на розтягання. Регресійним аналізом отримано емпіричну закономірність зміни ЛНО залежно від фізико-механічних властивостей масиву порід та детонаційних характеристик ВР. Математичним моделюванням встановлено аналітичні закономірності розрахунку ЛНО за зонами тріщиноутворення та інтенсивного подрібнення.

Результати дослідження. За зміною напруженого стану матеріалу моделі навколо зарядної порожнини встановлено емпіричну закономірність зміни максимальної величини ЛНО залежно від діаметру зарядної порожнини та діаметру самого заряду ВР, щільності та швидкості детонації ВР, межі міцності моделі на стискання та зсув. За розробленою розрахунковою схемою отримано аналітичні закономірності розрахунку ЛНО за зонами тріщиноутворення та інтенсивного подрібнення. Порівнянням результатів розрахунку ЛНО за отриманими закономірностями обрано найбільш коректну формулу розрахунку ЛНО, якою виявилась аналітична закономірність розрахунку ЛНО за зоною інтенсивного подрібнення.

Наукова новизна. Встановлено степеневу закономірність визначення ЛНО заряду ВР, що комплексно враховує радіус зони зминання, діаметр зарядної порожнини та заряду, щільність і швидкість детонації вибухівки, межю міцності порід на стискання, їх тріщинуватість та ущільнення під дією гірського тиску, що дозволяє розраховувати параметри буропідричних робіт (БПР) для відбивання масиву за зоною інтенсивного подрібнення.

Практичне значення. Результатами досліджень отримано аналітичну закономірність розрахунку ЛНО заряду ВР за зоною інтенсивного подрібнення, використання якої дозволить раціоналізувати параметри БПР при видобуванні руд за допомогою промислових ВР.

Ключові слова: вибухова речовина, зарядна порожнина, напружено-деформованого стан, зона інтенсивного подрібнення, лінія найменшого опору

Вступ. Розвиток економіки України значним чином обумовлений ефективністю роботи гірничо-металургійного комплексу [1]. Одним із основних технологічних процесів видобутку рудної сировини, в умовах шахт Кривбасу та ПрАТ «Запорізький залізорудний комбінат», є БПР [2]. Вони є першою й основоположною ланкою в технологічній схемі як спорудження гірничих виробок, так і відпрацювання запасів виймальних одиниць [3]. Коректність розрахунків параметрів БПР істотно впливає на зміну техніко-економічних показників видобування руди [3]. Оскільки якість відбивання запасів руди здійснює суттєвий вплив на всі наступні процеси, що пов'язані з видачею рудної маси на земну поверхню, її збагаченням і переробкою. А також значним чином впливає на повноту вилучення руди із надр та якість видобутої рудної маси [4].

Проте проблема руйнування гірського масиву з метою забезпечення якісного та керованого подрібнення гірських порід, незважаючи на постійне вдосконалення технології БПР, була і залишається однією з найважливіших у гірничому виробництві [5]. Як показує досвід проведених досліджень [3, 6–10], ефективність застосування БПР у процесі розробки родовищ корисних копалин підземним способом багато в чому визначається адекватністю теоретичних уявлень про механізм взаємодії енергії вибуху з масивом гірських порід. Враховуючи те, що витрати на БПР, в собівартості видобутку корисних копалин, становлять 35 – 45%, а вихід негабариту досягає 25% [11], вивчення фізичних процесів і явищ у ході відбивання та подальше вдосконалення технології БПР стає першочерговим завданням для розвитку гірничої справи.

Постановка завдання. Згідно з новою теорією руйнування масиву гірських порід вибухом [12], в момент вибуху заряду масив гірських порід навколо зарядної порожнини зазнає різкого удару, який обумовлений вибуховим перетворенням ВР. Цей удар викликає ударну хвилю, що розповсюджується у радіальному напрямку та слабшає по мірі віддалення від центру заряду. Слідом за проходженням хвилі середовище починає відчувати тиск газів продуктів вибуху. В радіусі дії ударної хвилі утворюється зона зминання. З подальшим віддаленням від зарядної порожнини ударна хвиля переходить у хвилю напружень. Тиск продуктів вибуху у зім'ятих породах зони зминання діє на масив з меншою інтенсивністю за рахунок збільшення площі контакту. Потім за зоною зминання утворюється зона подрібнення породи до якої входять зони інтенсивного подрібнення, у якій діють напруження стискання від тиску продуктів вибуху, і тріщиноутворення, де порода деформується під дією напружень зсуву та розтягання. За цією зоною утворюється зона стрясання де відбуваються коливання масиву, а руйнування порід утворюється за природними тріщинами без подрібнення на окремі частини. Величина радіусів перелічених зон, з однієї сторони залежать від детонаційних характеристик вибухівки, а з другої – від фізико-механічних властивостей масиву гірських порід. Тому, чим більше величина заряду та потужність ВР, тим ці радіуси більші, і навпаки, чим вища міцність порід, тим вони менші.

Якщо заряд розташувати відносно недалеко від вільної поверхні, то при вибуху відбувається руйнування породи в об'ємі деякого конусу, причому в об'ємі меншого конусу порода не тільки руйнується, але і викидається далі від

контур вільної поверхні. Зовнішню дію вибуху прийнято характеризувати за величиною відношення радіусу воронки викиду до ЛНО. Це відношення називається показником дії вибуху заряду

$$n = \frac{R}{W} = \operatorname{tg} \beta, \quad (1)$$

де R – радіус воронки викиду на вільній поверхні, м; W – ЛНО, м; β – половина кута при вершині конусу воронки викиду, град.

Тому за характером впливу на середовище, за показником дії вибуху заряди розрізняють на посиленого, нормального та зменшеного викиду [13]. Заряд, що утворює на вільній поверхні середовища воронку, радіус якої більше ЛНО, тобто $n = \operatorname{tg} \beta > 1,0$ і $R > W$ зветься зарядом посиленого викиду, а воронка – воронка посиленого викиду, а кут при вершині конусу при цьому – більше 90° . Коли $n = \operatorname{tg} \beta = 1,0$ і $R = W$ заряд ВР іменується зарядом нормального викиду, а утворена воронка – воронкою нормального викиду, при цьому кут при вершині конусу – 90° . Якщо $n = \operatorname{tg} \beta < 1,0$ і $R < W$ то такий заряд іменується зарядом зменшеного викиду, а воронка – воронкою зменшеного викиду, при цьому кут при вершині конусу – менше 90° .

За даними практики ведення підричних робіт при $0,75 < n = \operatorname{tg} \beta < 1,0$ видима воронка не утворюється, порода не викидається і зовнішня дія вибуху обмежується розпушуванням середовища. Такий заряд ВР іменується зарядом розпушування або подрібнення. Заряди зменшеного викиду використовують у тих випадках, коли потрібно тільки подрібнення породи або руди без значного викиду. Це характерно для підземних гірничих робіт при проведенні гірничих виробок [14, 15] і очисних роботах [16, 17], а половина мінімального кута при вершині конусу воронки викиду, для цих умов буде дорівнювати $\operatorname{arctg} 0,75 \approx 37^\circ$ [13].

Тому для визначення максимального значення величини ЛНО за радіусом зони тріщиноутворення, необхідно провести чисельне моделювання утворення воронки викиду подовженим зарядом, який розташовано паралельно вільній поверхні. Метою моделювання є отримання аналітичної закономірності розрахунку ЛНО заряду ВР з урахуванням фізико-механічних властивостей масиву порід та детонаційних характеристик вибухівки.

Методика досліджень. З найбільш перспективних методів вивчення механізму руйнування гірських порід вибухом є застосування чисельного моделювання, в основі якого покладено МСЕ. На даний час МСЕ є один з найбільш розвинутих методів, що дозволяє моделювати явища та процеси з максимальним їх наближенням до реальності [18]. Застосування засобів чисельного моделювання дозволяє досліджувати процеси та явища, вивчення яких на практиці, в силу тих чи інших причин, не представляється можливим або економічно недоцільно. Незважаючи на всю розвиненість математичного апарату та комп'ютерних технологій, сьогодні існує не так багато апробованих програмних продуктів, які дозволяють з високим ступенем достовірності моделювати процеси, що відбуваються у процесі вибуху. Лідерами у цій області розробки програмних рішень є компанії SolidWorks і ANSYS. Обидва ці програмні продукти використовують МСЕ та набули найбільшого поширення у гірництві при моделюванні напружено-деформованого стану порід, як під дією гірського тиску, так і вибуху. Хоча, для

вирішення задач, що пов'язані з явною динамікою дії вибуху використовують пакет ANSYS [19] з програмними продуктами Autodyn і Explicit Dynamics, але по-перше, користування цим програмним продуктом вимагає використання комп'ютеру з високими системними характеристиками, а це пов'язано з часом вирішення однієї задачі (експерименту), яке буде тривати від хвилин до декількох діб. По-друге, ліцензована версія програмного продукту ANSYS коштує десятки тис. доларів.

Як відомо з теорії опору матеріалів [20] динамічний розрахунок можна замінити статичним, врахувавши динамічний коефіцієнт. Тому в роботі для моделювання напружено-деформованого стану масиву при вибуховому руйнуванні порід, будемо використовувати ліцензійне програмне забезпечення системи інженерного аналізу SolidWorks Simulation [18, 21], що має Національний технічний університет «Дніпровська політехніка». У порівнянні з програмним продуктом ANSYS, при використанні SolidWorks Simulation для вирішення статистичних задач буде витрачатися менше часу на проведення одного експерименту. Також, у той же час працювати у SolidWorks Simulation набагато простіше, ніж у згаданому вище сильно розвиненому пакеті ANSYS, так як у ньому доведеться використовувати велику кількість підходів до постановки задачі.

Методика моделювання за допомогою ліцензійного програмного продукту SolidWorks Simulation утворення паралельним подовженим зарядом воронки викиду з мінімальним кутом при вершині – 74° , включало в себе виконання наступних етапів:

- формування вихідних даних для створення геометрії та матеріалу моделі;
- встановлення вихідного навантаження, обмежень та сітки моделі;
- визначення та обробка результатів величин ЛНО за зміною напруженого стану матеріалу моделі навколо зарядної порожнини;
- розробка розрахункової схеми та отримання аналітичної закономірності розрахунку величини ЛНО.

Виклад основного матеріалу. Для моделювання утворення воронки викиду з кутом при вершині 74° (заряд подрібнення) паралельним подовженим зарядом за допомогою програмного продукту SolidWorks Simulation використовували вихідні дані для створення геометрії моделі, що подано у таблиці 1.

Таблиця 1

Геометричні розміри моделі для проведення моделювання

Найменування параметру	Діаметр зарядної порожнини, м				
	0,04	0,06	0,08	0,10	0,12
Висота моделі, м	4,0				
Глибина зарядної порожнини, м	2,0				
Тиск продуктів вибуху, $P_1 = 1000$ МПа					
Діаметр моделі, м	2,4	3,7	4,9	6,0	6,9
Тиск продуктів вибуху, $P_1 = 1500$ МПа					
Діаметр моделі, м	3,2	4,7	6,2	7,4	8,4
Тиск продуктів вибуху, $P_1 = 2000$ МПа					
Діаметр моделі, м	4,0	5,8	7,4	8,6	9,8

Також у якості вихідних даних матеріалу моделі використовували середні значення показників фізико-механічних властивостей порід та залізних руд за всіма залізородними шахтами України, що подано у таблиці 2.

Таблиця 2

Середні значення показників фізико-механічних властивостей порід та залізних руд за всіма залізородними шахтами України

Назва породи або руди	Фізико-механічні властивості						
	Модуль пружності, $\times 10^{10}$ Па	Коефіцієнт Пуассона	Модуль зсуву, $\times 10^{10}$ Па	Щільність, кг/м ³	Межа міцності на розтягання, $\times 10^6$ Па	Межа міцності на стискання, $\times 10^6$ Па	Межа текучості, $\times 10^6$ Па
Залізна руда	4	0,175	1,7	3950	4	40	25,2
Залізна руда	6	0,25	2,4	3950	6	60	37,8
Сланці	8	0,25	3,2	2850	8	80	50,4
Залізна руда	10	0,23	4,1	3950	10	100	63,0
Залізисті кварцити	12	0,24	4,8	3250	12	120	75,6
Залізна руда	14	0,25	5,6	3950	14	140	88,2
Залізисті кварцити	16	0,24	6,5	3250	16	160	100,8
Залізисті кварцити	18	0,24	7,3	3250	18	180	113,4

Вихідне навантаження, обмеження та сітка моделей подано на рис. 1. Дію тиску продуктів вибуху P_1 встановлювали перпендикулярно граням та вибою зарядної порожнини. Модель фіксувалася у нижній частині, щоб імітувати вибух заряду ВР у циліндрі породи, який розташовано на земній поверхні з урахуванням дії атмосферного тиску P_a . Після чого приступали до встановлення сітки скінчених елементів. Для точності результатів сітку встановлювали на підставі кривизни та робили високий рівень її щільності.

Обчислювальний експеримент з визначення величини ЛНО для кута при вершині воронки викиду 74° виконували у наступній послідовності. Викреслювали геометрію моделі розмірами, що подано у таблиці 1. У середовищі SolidWorks Simulation обирали новий статистичний аналіз. Далі застосовували матеріал моделі згідно таблиці 2 та фіксували модель і задавали тиск продуктів вибуху у зарядній порожнині. Після чого створювали сітку моделі на підставі кривизни з високою її щільністю та запускали обчислювальну програму для поточного дослідження. Потім у параметрах, виконували налагодження виве-

дення результатів розрахунку напружень для відображення головного напруження розтягання σ_1 . Далі задавали мінімальне значення параметру шкали графіку, що дорівнює межі міцності порід на стискання зі знаком «мінус», а максимальне значення – межі міцності на зсув зі знаком «плюс». За головним напруженням розтягання σ_1 (рис. 2.) і за допомогою інструменту зондування у масиві моделі визначали точки з напруженням, які згідно третьої теорії міцності $[\tau] = 0,5[\sigma_p]$ та з урахуванням динамічної дії вибуху дорівнювали $0,5[\sigma_p] / 2$ [20].

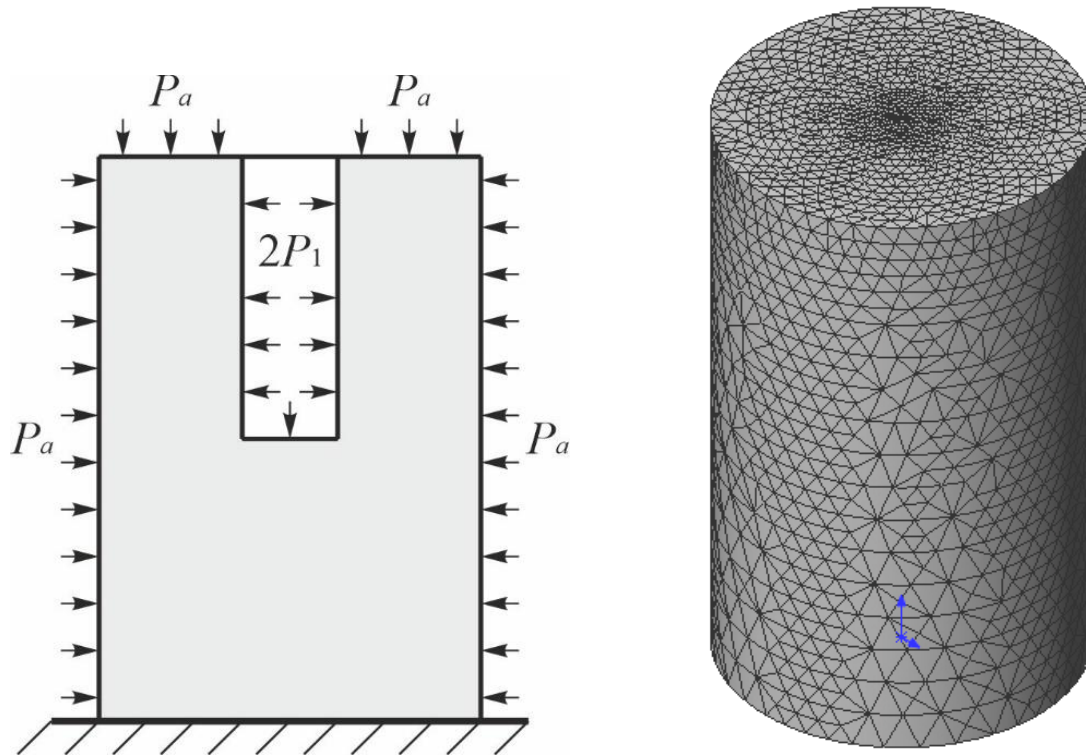


Рис. 1. Вихідні навантаження, обмеження та сітка моделі

Відстань від центру зарядної порожнини до визначених точок є радіусом зони тріщиноутворення. Потім викреслювали коло радіусом тріщиноутворення. З геометричного центру зарядної порожнини проводили два проміні з кутом між ними – 74° . Далі через дві точки перетину цих промінів з колом зони тріщиноутворення проводили відрізок. Потім з центру зарядної порожнини опускали перпендикуляр до цього відрізка, що являє собою максимальне значення величини ЛНО і вимірювали його. Для якісної картини через відрізок, що розташовано на відстані ЛНО, за допомогою інструменту обмеженість перетину розрізали геометрію моделі паралельно подовженому заряду. Цей перетин імітував вільну поверхню, а головні напруження розтягання σ_1 на ньому дають змогу побачити зону тріщиноутворення вздовж подовженого заряду розташованого у зарядній порожнині (рис. 2).

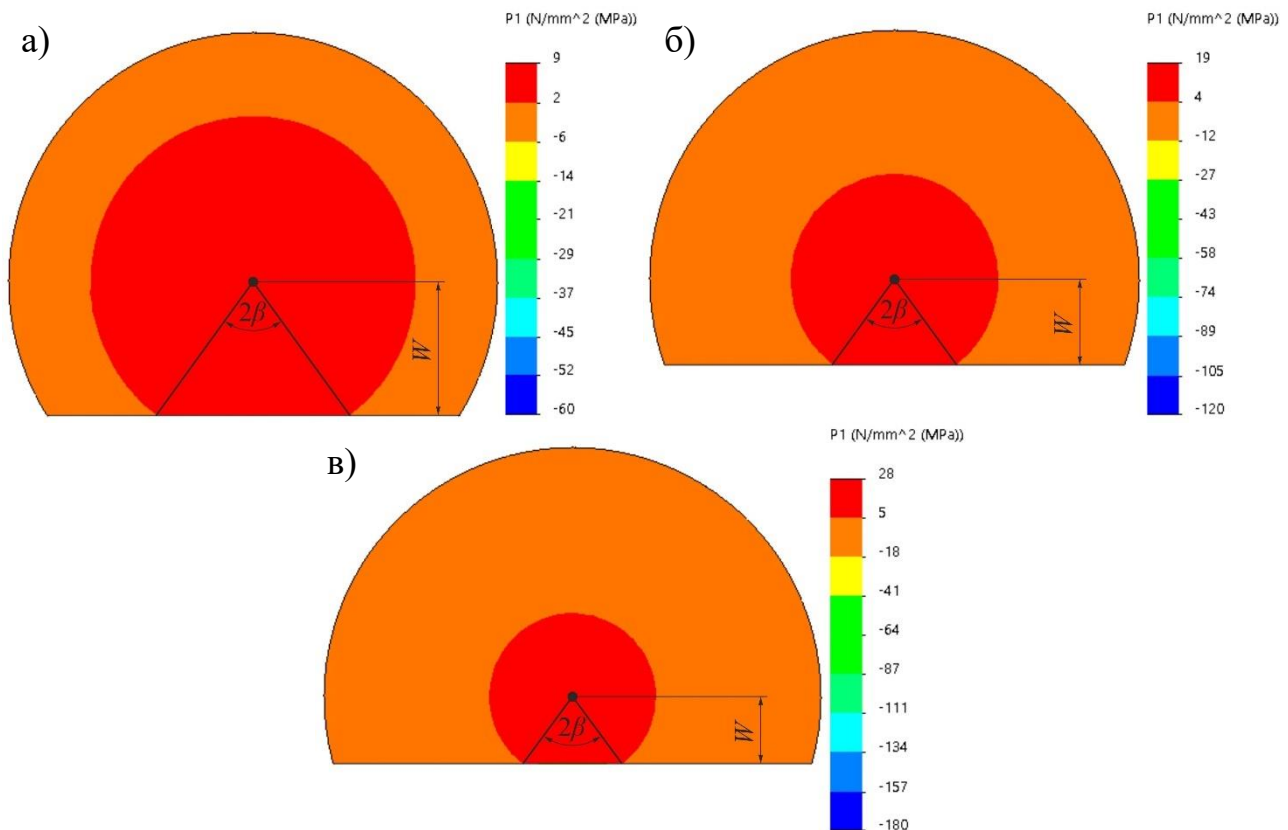


Рис. 2. Результати визначення ЛНО за відображенням головного напруження розтягання σ_1 для моделі міцністю на стискання 60 (а), 120 (б) та 180 (в) МПа при діаметрі зарядної порожнини 0,04 м, тиску продуктів вибуху 1000 МПа і куті при вершині воронки викиду 74°

Обчислювальні експерименти проводили для різної межі міцності моделі на стискання, при різному діаметрі зарядної порожнини, тиску продуктів вибуху. За результатами вимірів у якості прикладу розглянемо характер зміни максимальної величини ЛНО залежно від діаметру зарядної порожнини та межі міцності моделі на розтягання при тиску продуктів вибуху 1500 МПа (рис. 3).



Рис. 3. Графік залежності максимальної величини ЛНО від міцності моделі на розтягання та діаметру зарядної порожнини при тиску продуктів вибуху 1500 МПа

Провівши апроксимацію максимальних значень отримано закономірності зміни максимальної величини ЛНО для моделі W_m від межі міцності порід на розтягання σ_p для різних діаметрів зарядної порожнини d .

Для масиву порід моделі при тиску продуктів вибуху $P_1 = 1000$ МПа
– при $d = 0,04$ м

$$W_m = 62000 \cdot \sigma_p^{-0,732}, \text{ м, при } R^2 = 0,9891; \quad (2)$$

– при $d = 0,06$ м

$$W_m = 91000 \cdot \sigma_p^{-0,730}, \text{ м, при } R^2 = 0,9894; \quad (3)$$

– при $d = 0,08$ м

$$W_m = 126000 \cdot \sigma_p^{-0,732}, \text{ м, при } R^2 = 0,9895; \quad (4)$$

– при $d = 0,10$ м

$$W_m = 147000 \cdot \sigma_p^{-0,729}, \text{ м, при } R^2 = 0,9988; \quad (5)$$

– при $d = 0,12$ м

$$W_m = 173000 \cdot \sigma_p^{-0,729}, \text{ м, при } R^2 = 0,9971. \quad (6)$$

Таким чином, у формулах (2) – (6), при різних діаметрах зарядної порожнини, максимальна величина ЛНО залежно від межі міцності моделі на розтягання змінюється за степеневою закономірністю

$$W_m = a \cdot \sigma_p^{-0,73}, \quad (7)$$

де a – число, яке має відому величину.

Значення числа a залежно від діаметру зарядної порожнини

$$a = 1470000 \cdot d, \text{ при } R^2 = 0,9859. \quad (8)$$

Для масиву порід моделі при тиску продуктів вибуху $P_1 = 1500$ МПа
– при $d = 0,04$ м

$$W_m = 83000 \cdot \sigma_p^{-0,732}, \text{ м, при } R^2 = 0,9891; \quad (9)$$

– при $d = 0,06$ м

$$W_m = 123000 \cdot \sigma_p^{-0,731}, \text{ м, при } R^2 = 0,9895; \quad (10)$$

– при $d = 0,08$ м

$$W_m = 153000 \cdot \sigma_p^{-0,728}, \text{ м, при } R^2 = 0,9893; \quad (11)$$

– при $d = 0,10$ м

$$W_M = 192000 \cdot \sigma_p^{-0,732}, \text{ м, при } R^2 = 0,9988; \quad (12)$$

– при $d = 0,12$ м

$$W_M = 221000 \cdot \sigma_p^{-0,730}, \text{ м, при } R^2 = 0,9991. \quad (13)$$

Таким чином, у формулах (8) – (13), при різних діаметрах зарядної порожнини, максимальна величина ЛНО залежно від межі міцності моделі на розтягання змінюється за степеневою закономірністю, яку подано у формулі (7).

Значення числа a залежно від діаметру зарядної порожнини

$$a = 1920000 \cdot d, \text{ при } R^2 = 0,9882. \quad (14)$$

Для масиву порід моделі при тиску продуктів вибуху $P_1 = 2000$ МПа

– при $d = 0,04$ м

$$W_M = 100000 \cdot \sigma_p^{-0,731}, \text{ м, при } R^2 = 0,9874; \quad (15)$$

– при $d = 0,06$ м

$$W_M = 142000 \cdot \sigma_p^{-0,728}, \text{ м, при } R^2 = 0,9873; \quad (16)$$

– при $d = 0,08$ м

$$W_M = 189000 \cdot \sigma_p^{-0,732}, \text{ м, при } R^2 = 0,9881; \quad (17)$$

– при $d = 0,10$ м

$$W_M = 221000 \cdot \sigma_p^{-0,730}, \text{ м, при } R^2 = 0,9981; \quad (18)$$

– при $d = 0,12$ м

$$W_M = 251000 \cdot \sigma_p^{-0,729}, \text{ м, при } R^2 = 0,9973. \quad (19)$$

Таким чином, у формулах (15) – (19), при різних діаметрах зарядної порожнини, максимальна величина ЛНО залежно від межі міцності моделі на розтягання змінюється за степеневою закономірністю, яку подано у формулі (7).

Значення числа a залежно від діаметру зарядної порожнини змінюється за закономірністю

$$a = 2210000 \cdot d, \text{ при } R^2 = 0,9862. \quad (20)$$

Так, у формулах (7), (14) і (20) при різному тиску продуктів вибуху, число a залежно від діаметру зарядної порожнини змінюється за наступною закономірністю

$$a = b \cdot d, \quad (21)$$

де b – дане число, яке має відому величину.

Значення числа b залежно від тиску продуктів вибуху

$$b = 0,475 \cdot P_1^{0,72}, \text{ при } R^2 = 0,9737, \quad (22)$$

де P_1 – тиск продуктів вибуху, що згідно робіт [22, 23] з урахуванням діаметру заряду ВР з достатньою точністю можна визначити як

$$P_1 = \frac{\rho \cdot D^2}{8} \cdot K_{\partial z}, \text{ Па}, \quad (23)$$

де ρ – щільність ВР, кг/м³; D – швидкість детонації ВР, м/с; $K_{\partial z}$ – коефіцієнт, що враховує зміну тиску продуктів вибуху на стінки зарядної порожнини залежно від діаметру заряду ВР

$$K_{\partial z} = \left(\frac{d_3}{d} \right)^3, \quad (24)$$

де d_3 – діаметр заряду ВР, м.

Підставимо формулу (22) у формулу (21) отримуємо:

$$a = 0,475 \cdot P_1^{0,72} \cdot d. \quad (25)$$

Формулу (23) підставимо у формулу (7) і отримаємо:

$$W_M = 0,475 \cdot d \cdot P_1^{0,72} \cdot \sigma_p^{-0,73}, \text{ м}. \quad (26)$$

Межа міцності порід на розтягання з формули (26) знаходиться за виразом:

$$\sigma_p = 4 \cdot \tau_3^2 \cdot \sigma_{cm}^{-1}, \text{ Па}, \quad (27)$$

де τ_3 – межа міцності порід на зсув, Па; σ_{cm} – межа міцності порід на стискання, Па.

Підставивши формули (23) і (27) у формулу (26) та виконавши необхідні перетворення, отримаємо закономірність зміни величини максимальної величини ЛНО залежно від діаметру зарядної порожнини і діаметру самого заряду ВР, щільності та швидкості детонації ВР, межі міцності моделі на стискання і зсув

$$W_M = 0,0386 \cdot d \cdot \rho^{0,72} \cdot D^{1,44} \cdot \sigma_{cm}^{0,73} \cdot \tau_3^{-1,46} \cdot K_{\partial z}^{0,72}, \text{ м}. \quad (28)$$

Виконавши аналіз результатів вимірювань максимальної величини ЛНО для моделі, розроблено розрахункову схему для встановлення аналітичної закономірності максимальної величини ЛНО, що подано на рис. 4.

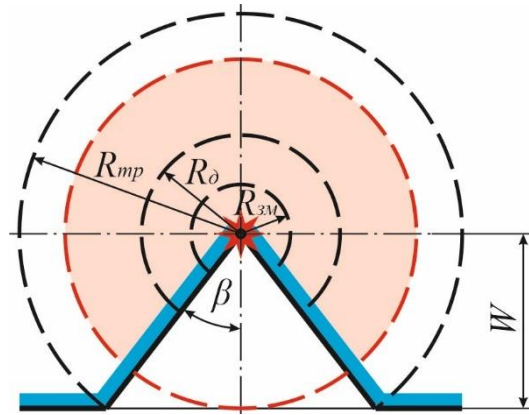


Рис. 4. Розрахункова схема для визначення величини ЛНО

Згідно розрахункової схеми (див. рис. 4) максимальне значення величини ЛНО можна встановити за розмірами зон тріщиноутворення та інтенсивного подрібнення [12]. За допомогою тригонометричних функцій отримаємо аналітичну закономірність розрахунку максимальної величини ЛНО заряду ВР за зоною тріщиноутворення

$$W_{mp} = R_{mp} \cdot \cos \beta, \text{ м}, \quad (29)$$

де β – половина кута при вершині конусу воронки викиду, що дорівнює 37° ; R_{mp} – радіус зони тріщиноутворення, з роботи [12]

$$R_{mp} = R_{зм} \cdot \sqrt{1 + \frac{\rho \cdot D^2 \cdot d \cdot K_{\delta z}}{8 \cdot R_{зм} \cdot \tau_z \cdot K_c \cdot K_y}}, \text{ м}, \quad (30)$$

де K_c – коефіцієнт структурного послаблення масиву; K_y – коефіцієнт ущільнення порід за рахунок дії гірського тиску $K_y = (\gamma + 0,1 \cdot H)$; γ – щільність порід, кг/м^3 ; H – глибина гірничих робіт, м; $R_{зм}$ – радіус зони змінання, з роботи [12]

$$R_{зм} = 0,5 \cdot d \cdot \sqrt{1 + \frac{\rho \cdot D^2 \cdot K_{\delta z}}{2 \cdot \sigma_{cm} \cdot K_c \cdot K_y}}, \text{ м}. \quad (31)$$

Згідно основних положень квазістатично-хвильової гіпотези дії вибуху у гірській породі масив руйнується завдяки комбінованій дії тиску продуктів вибуху та хвиль напружень, тому для встановлення величини ЛНО використовуємо розміри зони інтенсивного подрібнення [12]. В цій зоні порода руйнується завдяки дії напружень стискання, що утворюються від тиску продуктів детонації та інтенсивного розкриття тріщин. Площа зони інтенсивного подрібнення

$$S_{\delta} = \pi \cdot R_{\delta}^2, \text{ м}^2. \quad (32)$$

де R_{δ} – радіус зони інтенсивного подрібнення, з роботи [12]

$$R_{\partial} = R_{3M} \cdot \sqrt{1 + \frac{\rho \cdot D^2 \cdot d \cdot K_{\partial 3}}{8 \cdot R_{3M} \cdot \sigma_{cm} \cdot K_c \cdot K_y}}, \text{ м.} \quad (33)$$

З формули (32) ЛНО за зоною інтенсивного подрібнення

$$W_{\partial} = \sqrt{\pi} \cdot R_{\partial}, \text{ м.} \quad (34)$$

Для встановлення найбільш придатної аналітичної закономірності до розрахунку ЛНО, виконаємо порівняння формул (29) і (34) з отриманою за результатами моделювання воронки викиду формулою (28). Для розрахунку ЛНО необхідно позначити наступні вихідні параметри: у якості ВР для розрахунку обираємо ЕВР Україніт-ПП-2 з наступними детонаційними характеристиками: густина ЕВР – 1100 кг/м³ та швидкість детонації – 5100 м/с. До гірничо-технічних умов відносяться: діаметри зарядної порожнини та заряду ВР – 0,043 м і межа міцності гірських порід на стискання – 40 – 180 МПа, тиск продуктів вибуху розраховується за формулою (23). Тріщинуватість масиву й ущільнення порід під дією гірського тиску не враховували. Результати розрахунку максимальної величини ЛНО за результатами моделювання МСЕ воронки викиду згідно формули (28) порівнювали з результатами розрахунку ЛНО за аналітичними формулами (29) і (34), які подано у вигляді гістограми (рис. 5).

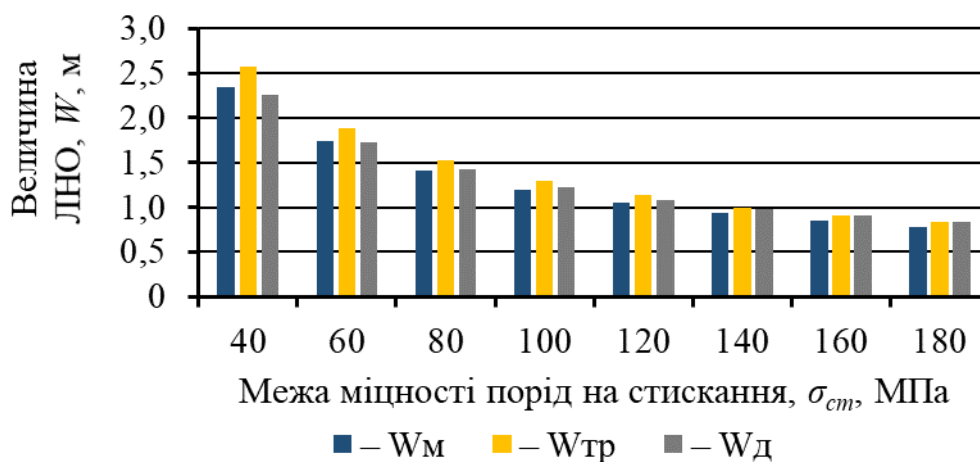


Рис. 5. Гістограма порівняння результатів розрахунку величини ЛНО за результатами моделювання W_m , розмірами радіусів зон тріщиноутворення $W_{тр}$ та інтенсивного подрібнення W_{∂}

Як видно з гістограми розбіжність результатів розрахунку ЛНО для моделі W_m та розрахованої ЛНО за радіусом зони тріщиноутворення $W_{тр}$ складає 6 – 9%. Розбіжність результатів величини ЛНО для моделі W_m та розрахованої ЛНО за радіусом зони інтенсивного подрібнення W_{∂} склало 1 – 6%. Це вказує на високу достовірність отриманих результатів і придатності встановлених аналітичних закономірностей до розрахунку величини ЛНО за зоною тріщиноутворення або інтенсивного подрібнення. Порівнянням результатів розрахунку

ЛНО за цими закономірностями встановлено найбільш коректну формулу розрахунку максимальної величини ЛНО за радіусом зони інтенсивного подрібнення, так як вона найбільш правильно представляє процес руйнування масиву гірських порід вибухом, особливо у породах міцністю 40 – 60 МПа. Встановлена закономірність розрахунку ЛНО за зоною інтенсивного подрібнення дозволить проектувати раціональні параметри БПР при виконанні очисних робіт, що пов'язані з відбиванням руд, за різними схемами розташування штангових шпурів або свердловин [24].

Висновок: Чисельним моделюванням процесу утворення воронки викиду МСЕ за головним напруженням розтягання отримано степеневу закономірність зміни величини ЛНО залежно від діаметру зарядної порожнини, щільності та швидкості детонації ВР, межі міцності моделі на стискання і зсув. Розроблено розрахункову схему, за якою отримано аналітичні закономірності визначення ЛНО за зонами інтенсивного подрібнення та тріщиноутворення. Порівнянням отриманих формул встановлено розбіжність результатів розрахунку ЛНО для моделі W_m та ЛНО за радіусом зони тріщиноутворення $W_{mp} - 6 - 9\%$, а з ЛНО за радіусом зони інтенсивного подрібнення $W_o - 1 - 6\%$. Подальше порівняння результатів розрахунку ЛНО за зонами тріщиноутворення та інтенсивного подрібнення дало змогу обрати найбільш коректну формулу розрахунку ЛНО, якою виявилась аналітична закономірність розрахунку ЛНО за зоною інтенсивного подрібнення, тому що розрахована ЛНО за зоною тріщиноутворення для порід міцністю 40 – 60 МПа дає некоректні результати.

Перелік посилань

1. Вилкул, Ю.Г., Сторчак, С.А., Яременко, В.И., & Кравцов, Н.К. (2011). Рациональная разработка и обогащение железорудного сырья Криворожского бассейна. *Качество минерального сырья*, 20-25.
2. Коваленко, И.Л., Ступник, Н.И., Короленко, М.К., Полторащенко, С.П., Карапа, И.А., Киященко, Д.В., & Небогин, В.З. (2016). Особенности технологии формирования скважинных зарядов эмульсионными ВВ Украинит в подземных условиях. *Вісник Криворізького національного університету*, (41), 3-6.
3. Ткачук, К.Н., & Федоренко, П.И. (1990). *Взрывные работы в горнорудной промышленности*. Вища школа.
4. Тараютін, В.М., & Косенко, А.В. (2018). Обґрунтування ресурсозберігаючих технологічних процесів при підземному видобутку різносортих залізних руд Кривбасу. *Вісник Криворізького національного університету*, (46), 152–159.
5. Tarasyutin, V.M. (2015). Geotechnology features of high quality martite ore from deep mines of Kryvyi Rih basin. *Наукowyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, (1), 54–60.
6. Родионов, В.Н., Адушкин, В.В., Костюченко, В.Н., Николаевский, В.Н., Ромашов, А.Н., & Цветков, В.М. (1971). *Механический эффект подземного взрыва*. Недра.
7. Баум, Ф.А., Орленко, Л.П., & Станюкович, К.П. (1975). *Физика взрыва*. Наука.
8. Носков, В.Ф. Камащенко, В.И., & Жабин, Н.И. (1982). *Буровзрывные работы на открытых и подземных разработках*. Недра.
9. Садовский, М.А. (2004). *Избранные труды. Геофизика и физика взрыва..*
10. Адушкин, В.В., & Спивак, А.А. (2007). *Подземные взрывы*. Наука.

11. Кудрявцев, М.И., & Гайдуков, В.С. (2011). К вопросу о путях снижения выхода негабаритных фракций обрушенной руды при подземной разработке богатых руд Кривбасса. In *Сталій розвиток гірничо-металургійної промисловості* (pp. 25–26). КТУ.
12. Kononenko, M., & Khomenko, O. (2021). New theory for the rock mass destruction by blasting. *Mining Of Mineral Deposits*, 15(2), 111-123.
<http://doi.org/10.33271/mining15.02.111>
13. Терпигорев, А.М. (1961). *Справочник по горнорудному делу. Подземные работы*. Государственное научно-техническое издательство литературы по горному делу.
14. Khomenko, O., Kononenko, M., Myronova, I., & Savchenko, M. (2019). Application of the emulsion explosives in the tunnels construction. *E3S Web of Conferences*, 123, 01039.
<http://doi.org/10.1051/e3sconf/201912301039>
15. Kononenko, M., Khomenko, O., Savchenko, M., & Kovalenko, I. (2019). Method for calculation of drilling-and-blasting operations parameters for emulsion explosives. *Mining of Mineral Deposits*, 13(3), 22-30.
<http://doi.org/10.33271/mining13.03.022>
16. Khomenko, O., Kononenko, M., & Myronova, I. (2017). Ecological and technological aspects of iron-ore underground mining. *Mining of Mineral Deposits*, 11(2), 59–67.
<http://doi.org/10.15407/mining11.02.059>
17. Kononenko, M., Khomenko, O., Kovalenko, I., & Savchenko, M. (2021). Control of density and velocity of emulsion explosives detonation for ore breaking. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, (2), 69-75.
<http://doi.org/10.33271/nvngu/2021-2/069>
18. Алямовский, А.А. (2015). *SolidWorks Simulation. Инженерный анализ для профессионалов: задачи, методы, рекомендации*. ДМК Пресс.
19. Мухутдинов, А.Р., & Ефимов, М.Г. (2018). *Основы применения ANSYS Autodyn для решения задач моделирования быстропотекающих процессов*. КНИТУ.
20. Беляев, Н.М. (1962). *Сопротивление материалов*. Физматгиз.
21. Волчков, В.М., Кожанова, Т.Е., Стяжин, В.Н. (2019). *Моделирование физических процессов в SolidWorks Simulation*. ВолГТУ.
22. Torbica, S., & Lapcevic, V. (2015). Estimating extent and properties of blast-damaged zone around underground excavations. *Revista Escola de Minas*, 68(4), 441-453.
<http://doi.org/10.1590/0370-44672015680062>
23. Kononenko, M., & Khomenko, O. (2021). Mathematic simulation for the rock mass destruction by blasting. In *Physical and Chemical Geotechnologies* (pp. 27–37). DUT.
<http://doi.org/10.15407/pcgt.21.05>
24. Khomenko, O., Kononenko, M., & Savchenko, M. (2018). *Technology of underground mining of ore deposits*. DUT.
<http://doi.org/10.33271/dut.001>

ABSTRACT

Purpose. To establish the analytical regularity of the calculation of the maximum value of the line of least resistance (LLR) of the explosive (E), taking into account the physical and mechanical properties of the rock mass and the detonation characteristics of the explosive.

The methodology of research. Numerical modeling by the finite element method (FEM) to change the stress-strain state of the model established the value of the LLR at different diameters of the charge cavity, the pressure of explosion products and the tensile strength of rocks. Regression analysis obtained an empirical pattern of changes in the LLR depending on the physical and mechanical properties of the rock mass and the detonation characteristics of explosives. Mathematical modeling establishes analytical regularities of LLR calculation for zones of crack formation and intensive fragmentation.

Findings. According to the change in the stress state of the model material around the charging cavity, the empirical regularity of changing the maximum value of the LLR depending on the diameter of the charging cavity and the diameter of the explosive charge, the density and rate of detonation of explosives, the compressive and shear strength. According to the developed calculation scheme, analytical regularities of LLR calculation for zones of crack formation and intensive fragmentation are obtained. By comparing the results of LLR calculation according to the obtained regularities, the most correct formula for LLR calculation was chosen, which turned out to be the analytical regularity of LLR calculation for the zone of intensive fragmentation.

The originality. The power law is established for determining the LLR of an E, which comprehensively takes into account the radius of the crush zone, the diameter of the charging cavity and charge, the density and detonation velocity of E, the compressive strength of rocks, their fracturing and compaction under the action of rock pressure, which makes it possible to calculate the parameters of drilling and blasting (D&B) for breaking massif along the zone of intensive fragmentation.

Practical implications. According to the results of the research, an analytical regularity of the calculation of the LLR of the explosive charge in the zone of intensive fragmentation was obtained, the use of which will allow to rationalize the D&B parameters in ore mining with the help of industrial explosives.

Keywords: *explosive, charging cavity, stress-strain state, zone of intensive fragmentation, line of least resistance*