

Mathematic simulation for the rock mass destruction by blasting

Maksym Kononenko^{1*}, Oleh Khomenko¹

¹Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine

*Corresponding author: kmn211179@gmail.com

Abstract. Modeling of rock mass destruction by explosion allowed to obtain mathematical models of the formation of crushing zones, intensive grinding and crack formation, which are formed around the charging cavity in the rock mass with taking into account the diameter of the charging cavity and the diameter of the explosive charge, detonation compaction of rocks under the action of rock pressure. According to the obtained mathematical models, the radii of the crushing zones, intensive grinding and crack formation during blasting in the charging cavity of the cartridge emulsion explosive Ukrainit-P-SA and bulk emulsion explosive Ukrainit-PP-2 were calculated. This allowed us to establish that the diameter of the explosive charge significantly affects the pressure of the explosion products in the charging cavity. It is established that during the charge of bulk emulsion explosive Ukrainit-PP-2 is detonated, the radii of the destruction of the rock mass around the charging cavity are increased by 1.5 – 2.0 times in comparison with the cartridge emulsion explosive Ukrainit-P-SA.

Keywords: rock mass, charging cavity, explosive, charge diameter, zone of intensive crushing

Математичне моделювання руйнування масиву порід вибухом

Максим Кононенко^{1*}, Олег Хоменко¹

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

*Відповідальний автор: kmn211179@gmail.com

Анотація. Моделювання руйнування масиву порід вибухом дозволило отримати математичні моделі утворення зон зминання, інтенсивного подрібнення та тріщиноутворення, які формуються навколо зарядної порожнини в масиві гірських порід з урахуванням діаметру зарядної порожнини та діаметру самого заряду вибухової речовини, детонаційних характеристик вибухівки, межі міцності порід, тріщинуватості масиву та ущільнення порід під дією гірського тиску. За отриманими математичними моделями розраховано радіуси зон зминання, інтенсивного подрібнення та тріщиноутворення при підірванні у зарядній порожнині патрованої емульсійної вибухової речовини Україніт-П-СА і наливної емульсійної вибухової речовини Україніт-ПП-2. Це дозволило встановити, що діаметр заряду вибухової речовини істотно впливає на величину тиску продуктів вибуху у зарядній порожнині. Встановлено, що при підірванні заряду наливної емульсійної вибухової речовини Україніт-ПП-2 радіуси руйнування масиву порід навколо зарядної порожнини зростають в 1,5 – 2,0 рази у порівнянні з патрованою емульсійної вибухової речовини Україніт-П-СА.

Ключові слова: масив гірських порід, зарядна порожнина, вибухова речовина, діаметр заряду, зона інтенсивного подрібнення

1. Вступ

Гірничодобувна промисловість є провідною галуззю, яка впливає на економічний й технічний розвиток країн всього світу. Так однією з найбільш розвинених галузей промисловості України є чорна металургія, у зародженні та становленні якої головну роль відіграла сировинна база залізних і марганцевих руд, розробку яких було

розпочато наприкінці XIX ст. кількома десятками шахт і кар'єрів. Видобування марганцевих руд здійснюють за допомогою механічного відбивання, а видобуток залізних руд пов'язаний з руйнуванням великих об'ємів міцних гірських порід, розробка яких вимагає попереднього подрібнення за допомогою буропідривних робіт (БПР). Тому особлива увага науковців і виробничників приділяється вдосконаленню та розробці нових методик розрахунку параметрів БПР, які забезпечать покращення показників прохідницьких і видобувних робіт. Ще одним напрямом удосконалення технології ведення БПР, є підвищення безпеки підривних робіт і зниження їх впливу на довкілля за рахунок заміщення тротиловмісних вибухових речовин (ВР) емульсійними вибуховими речовинами (ЕВР) вітчизняного виробництва [1]. ЕВР абсолютно безпечні у транспортуванні й зберіганні [2], екологічно чисті [3] та економічно вигідні [4]. Тому на сьогодні однією з основних проблем гірничого виробництва є підвищення ефективності руйнування гірського масиву вибухом за допомогою ЕВР.

Як відомо, гірська порода – це неоднорідне тверде тіло, яке має складну структуру, а механізм його руйнування ще більш складніший. У загальному випадку сам механізм руйнування гірських порід вибухом характеризується короточасністю прикладення навантаження до руйнованого об'єму середовища та залежить від багатьох факторів. Незважаючи на те, що останнім часом пізнання природи вибуху значно розширилися, на сьогодні не існує загальновизнаної гіпотези про механізм руйнування масиву порід вибухом. Це пов'язано з різноманітністю, складністю та швидкоплинністю явищ, які супроводжують вибух у твердому середовищі [5]. Згідно роботи [6], до числа явищ процесу вибуху відносяться: детонація заряду ВР, розширення зарядної порожнини, механічна взаємодія продуктів детонації (вибуху) із масивом порід, формування та поширення ударних хвиль, розповсюдження та взаємодія хвиль напружень у масиві та його руйнування, зрушення подрібненого матеріалу та розліт кусків. Як зазначено у праці [7], сьогодні існує велика кількість гіпотез, які пояснюють фізичну сутність процесу руйнування масиву гірських порід вибухом.

Аналіз гіпотез руйнування масиву порід вибухом дозволив зробити наступні висновки. Накопичений десятиліттями теоретичний та експериментальний матеріал про уявлення механізму дії вибуху у різноманітних умовах призвело до того, що деякі гіпотези дещо протирічать одна одній, але не заперечують правдоподібності самих гіпотез. Дослідники по-різному описують розподіл напружень та енергії, сам характер руйнування породи, утворення зон навколо зарядної порожнини. Встановлено, що хвильова гіпотеза дає якісну картину механізму руйнування порід вибухом, але останнім часом багато дослідників притримуються поглядів на те, що у процесі руйнування породи беруть участь як хвилі напружень, так і дія тиску продуктів детонації. У цілому в сучасній теорії дії вибуху у твердому середовищі недостатньо вивчено питання критеріїв руйнування масиву порід. Погляди дослідників розходяться, в основному, у питаннях оцінки долі руйнування, що виконується хвильовою та квазістатичною дією вибуху. Це призвело до дуже великої кількості теоретичних уявлень та якісного описання характеру руйнування твердого середовища. Бо це в значній мірі призводить до використання при розробці та проектуванні параметрів БПР великої кількості емпіричних розрахункових формул.

Переважна більшість теорій та методик розрахунку параметрів БПР, які базуються на різних гіпотезах механізму руйнування масиву гірських порід вибухом, що розроблені при врахуванні властивостей тротиловмісних ВР, не враховують детонаційні характеристики ЕВР, які мають вищі енергетичні властивості ніж тротиловмісні аналоги. Тому спираючись на спільну дію квазістатичної та хвильової гіпотез дії вибуху в масиві порід, потрібно розробити таку теорію руйнування масиву

порід, яка б враховувала вплив фізико-механічних властивостей середовища та детонаційні характеристики вибухівок.

2. Методика проведення досліджень

Методика математичного моделювання механізму руйнування масиву навколо зарядної порожнини при його вибуховому навантаженні включала у себе виконання наступних етапів.

1 Розробк параметричних схем щодо зон руйнування масиву порід навколо зарядної порожнини під дією вибуху;

2. Формування математичних моделей щодо зон зминання, інтенсивного подрібнення та тріщиноутворення, які утворюються навколо зарядної порожнини масиві гірських порід при його вибуховому навантаженні;

3. Встановлення закономірностей виявлених зон з урахуванням діаметрів зарядної порожнини та заряду ВР, детонаційних характеристик ВР, міцності та тріщинуватості порід, ущільнення порід під дією гірського тиску.

Розробку теорії руйнування гірських порід вибухом навколо зарядної порожнини виконували за допомогою загальновідомих законів теорії пружності та основних положень квазістатично-хвильової гіпотези механізму руйнування твердого середовища під дією вибуху.

3. Результати та обговорення

З теорії дії вибуху [8] у гірській породі після детонації ВР за рахунок тиску продуктів вибуху утворюється ударна хвиля [9]. У радіусі дії ударної хвилі утворюється зона стискання, в якій порода зазнає пластичних деформацій і формується зона зминання. В цій зоні, порода змінює свою структуру та відбувається інтенсивне дрібнодисперсне її подрібнення на частинки до 1 мм. З віддаленням від зарядної порожнини ударна хвиля переходить у хвилю напружень, яка розповсюджується зі звуковою швидкістю. За зоною зминання утворюється зона подрібнення породи, в якій діють пружно-пластичні деформації. Згідно зі ствердженням Ржевського В.В. [8], у цій зоні енергія вибуху витрачається на подолання опору породи здвигу, розтяганню та частково стисканню. Також, Покровський Г.І. зазначає [9], що після утворення ущільненого шару породи навколо зарядної порожнини (зони зминання) з'являється зона, яка пронизана радіальними тріщинами у вигляді променів, між якими є тріщини, що перпендикулярні до радіусів. Ці тріщини виникають тоді, коли тиск продуктів вибуху знижується і виникає невелике зміщення породи назад, до центру вибуху. На підставі цього, зону подрібнення можна поділити на дві зони: інтенсивного подрібнення, у якій будуть діяти напруження стискання від тиску продуктів вибуху і безпосередньо зону тріщиноутворення, де порода буде деформуватися під дією напружень здвигу та розтяганню. Далі хвиля механічних напружень переходить у сейсмічну хвилю, яка не руйнує масив, а лише його стрясає, тому за зоною тріщиноутворення з'являється зона стрясування [9]. У зоні стрясування також частково відбувається руйнування порід за природними тріщинами без подрібнення масиву на окремі частини. Спираючись на виконаний аналіз процесу руйнування гірських порід під дією вибуху, проведемо градацію зон, які утворюються навколо зарядної порожнини.

Згідно теорії руйнування масиву порід за допомогою енергії вибуху [10] після вибуху заряду ВР, що розташований у зарядній порожнині, у всі сторони масиву буде розповсюджуватись ударна хвиля. Деякий об'єм породи, що знаходиться на незначній відстані від зарядної порожнини, буде стиснуто у нормальному та розтягнуто у тангенціальному напрямках. На фронті цієї зони хвиля механічних напружень перевищить модуль об'ємного стискання середовища, тому порода

поблизу заряду розбивається, створюючи зону пластичних деформацій, так звану зону зминання. Далі після утворення зони зминання та з віддаленням від місця розташування заряду ВР, стискаючі напруження від дії ударної хвилі швидко спадають і на деякій відстані стають менше, а ніж міцність породи на стискання. Тому порода перестає руйнуватися безпосередньо від радіальних напружень, які її стискають. Зменшення дії радіальних напружень призводить до зростання тангенціальних напружень, які розтягують породу в ободових напрямках. Сама ж ударна хвиля від дії вибуху переходить у хвилю напружень з утворенням наступної зони – подрібнення. В цій зоні діють як напруження здвигу, так і розтягання та стискання. Тобто у породі виникають пружно-пластичні деформації. Ці напруження утворюють дві наступні зони – зону інтенсивного подрібнення, де діють напруження стискання, та зону тріщиноутворення, де діють напруження здвигу та розтягання.

Розробку математичних моделей зон зминання, інтенсивного подрібнення та тріщиноутворення, які формуються в масиві навколо зарядної порожнини, виконано користуючись розрахунковими схемами, що подано на рис. 1.

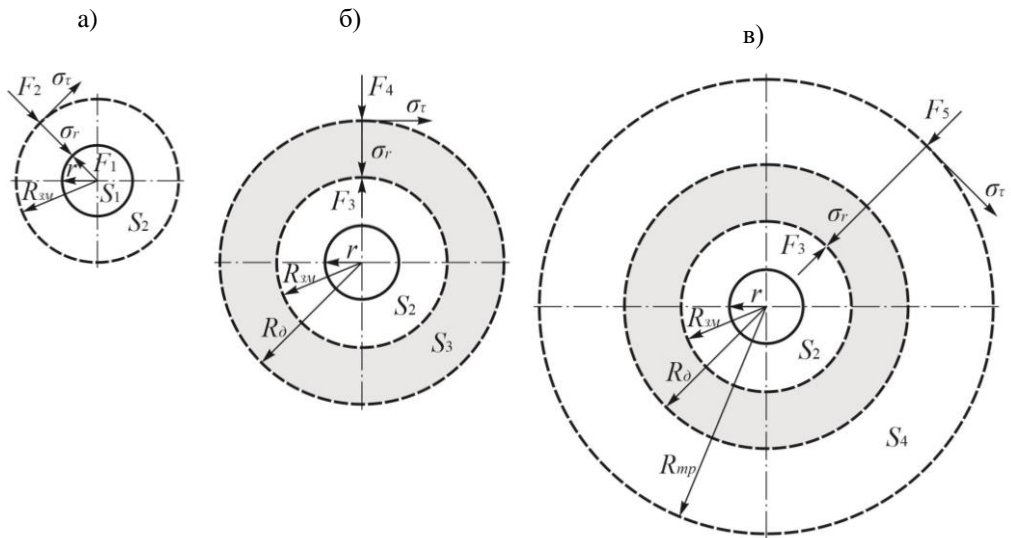


Рисунок 1. Розрахункові схеми до визначення радіусу зони зминання (а), інтенсивного подрібнення (б) та тріщиноутворення (в)

Механічні напруження, що виникають в масиві порід під дією енергії вибуху для зони:

– зминання (рис. 1, а)

$$\sigma = \frac{P_1 \cdot r^2}{R_{зм}^2 - r^2}, \text{ Н/м}^2; \quad (1)$$

– інтенсивного подрібнення (рис. 1, б)

$$\sigma = \frac{P_2 \cdot R_{3M}^2}{R_0^2 - R_{3M}^2}, \text{ Н/м}^2; \quad (2)$$

– тріщиноутворення (рис. 1, в)

$$\sigma = \frac{P_2 \cdot R_{3M}^2}{R_{mp}^2 - R_{3M}^2}, \text{ Н/м}^2, \quad (3)$$

де r – радіус зарядної порожнини, м; R_{3M} – радіус зминання, м; R_0 – радіус зони інтенсивного подрібнення, м; R_{mp} – радіус зони тріщиноутворення, м; P_2 – зниження тиску продуктів вибуху на масив за рахунок збільшення площі контакту [10]

$$P_2 = \frac{P_1 \cdot r}{R_{3M}}, \text{ Н/м}^2, \quad (4)$$

де P_1 – тиск продуктів вибуху на стінки зарядної порожнини з урахування діаметру заряду ВР, згідно з [11] з достатньою точністю можна визначити як

$$P_1 = \frac{\rho \cdot D^2}{8} \cdot K_{03}, \text{ Па}, \quad (5)$$

де ρ – щільність (густина) ВР, кг/м³; D – швидкість детонації ВР, м/с; K_{03} – коефіцієнт, що враховує зміну тиску продуктів вибуху на стінки зарядної порожнини в залежності від діаметру заряду ВР

$$K_{03} = \left(\frac{d_3}{d} \right)^3, \quad (6)$$

де d_3 – діаметр заряду ВР, м; d – діаметр зарядної порожнини, м.

Рівняння (1) – (3) це рівняння задачі Ламе Г., згідно теорії якої при розрахунку товстостінних циліндрів і при умові дії тільки внутрішнього тиску, радіальні напруження σ_r у всіх точках циліндра будуть від’ємні (напруження стискання), а напруження σ_t – позитивні (напруження розтягання). Тобто напруження σ_r і σ_t це головні напруження. Для визначення еквівалентного напруження $\sigma_{екв}$ у об’ємному напруженому стані, скористуємось Третьою теорією міцності, яка добре підтверджена дослідями для матеріалів, що однаково реагують на розтягування та стискання, а також руйнуються шляхом здвигу. Головні напруження $\sigma_1 = \sigma_t = \sigma$, $\sigma_2 = \sigma_o = 0$ та $\sigma_3 = \sigma_r = -\sigma$. За Третьою теорією міцності при складному напруженому стані, еквівалентне напруження дорівнює $\sigma_{екв} = \sigma_1 - \sigma_3 \leq [\sigma]$ або для зони:

– зминання

$$\sigma_{екв} = \frac{2 \cdot P_1 \cdot r^2}{R_{3M}^2 - r^2}, \text{ Н/м}^2; \quad (7)$$

– інтенсивного подрібнення

$$\sigma_{екв} = \frac{2 \cdot P_2 \cdot R_{зм}^2}{R_0^2 - R_{зм}^2}, \text{ Н/м}^2; \quad (8)$$

– тріщиноутворення

$$\sigma_{екв} = \frac{2 \cdot P_2 \cdot R_{зм}^2}{R_{тр}^2 - R_{зм}^2}, \text{ Н/м}^2. \quad (9)$$

Для утворення зон зминання та інтенсивного подрібнення виконується умова всебічного стискання $\sigma_{екв} \leq \sigma_{см}$. Як відомо з теорії пружності та пластичності, якщо зовнішній діаметр циліндра більше внутрішнього у 4 рази, а розрахунки допускають розбіжність до 6%, то в цьому випадку рішення не пов'язане з формою зовнішнього контуру та циліндр знаходиться в умовах чистого здвигу. На підставі цього для зони тріщиноутворення умова має вигляд $\sigma_{екв} \leq \tau_3$. Ґрунтуючись вище наведеним і з урахуванням коефіцієнту динамічності при ударному навантаженні та виконавши необхідні перетворення отримуємо математичні моделі радіусів зон:

– зминання

$$R_{зм} = 0,5 \cdot d \cdot \sqrt{1 + \frac{\rho \cdot D^2 \cdot K_{\partial 3}}{2 \cdot \sigma_{см}}}, \text{ м}; \quad (10)$$

– інтенсивного подрібнення

$$R_0 = R_{зм} \cdot \sqrt{1 + \frac{\rho \cdot D^2 \cdot d \cdot K_{\partial 3}}{8 \cdot R_{зм} \cdot \sigma_{см}}}, \text{ м}; \quad (11)$$

– тріщиноутворення

$$R_{тр} = R_{зм} \cdot \sqrt{1 + \frac{\rho \cdot D^2 \cdot d \cdot K_{\partial 3}}{8 \cdot R_{зм} \cdot \tau_3}}, \text{ м}, \quad (12)$$

де $\sigma_{см}$ – межа міцності порід на стискання, Па; τ_3 – межа міцності порід на здвиг, Па.

Отримані формули (10) – (12) дозволяють розраховувати радіуси зон зминання, інтенсивного подрібнення та тріщиноутворення, які утворюються в масиві навколо зарядної порожнини з урахуванням діаметрів зарядної порожнини та заряду ВР, детонаційних характеристик ВР та міцності порід, але недоліком цих формул є те, що вони не враховують тріщинуватість масиву та вплив гірського тиску. Тому для підвищення точності розрахунків радіусів цих зон у подані формули введемо коефіцієнти структурного послаблення масиву та ущільнення порід під дією гірського тиску [12]. Виконавши необхідні перетворення, отримуємо формули розрахунку радіусів зон:

– зминання

$$R_{зм} = 0,5 \cdot d \cdot \sqrt{1 + \frac{\rho \cdot D^2 \cdot K_{\partial 3}}{2 \cdot \sigma_{см} \cdot K_c \cdot K_y}}, \text{ м}; \quad (12)$$

– інтенсивного подрібнення

$$R_{\partial} = R_{зм} \cdot \sqrt{1 + \frac{\rho \cdot D^2 \cdot d \cdot K_{\partial 3}}{8 \cdot R_{зм} \cdot \sigma_{ст} \cdot K_c \cdot K_y}}, \text{ м}; \quad (13)$$

– тріщиноутворення

$$R_{mp} = R_{зм} \cdot \sqrt{1 + \frac{\rho \cdot D^2 \cdot d \cdot K_{\partial 3}}{8 \cdot R_{зм} \cdot \tau_3 \cdot K_c \cdot K_y}}, \text{ м}, \quad (14)$$

де K_c – коефіцієнт структурного послаблення масиву, який можна розрахувати за однією з формул, що подано у табл. 1; K_y – коефіцієнт ущільнення порід під дією гірського тиску, згідно праці [12]

$$K_y = \frac{\gamma + 0,1 \cdot H}{\gamma}, \quad (15)$$

де γ – щільність порід, кг/м³; H – глибина гірничих робіт, м.

Таблиця 1. Формули розрахунку коефіцієнту структурного послаблення масиву порід

Автор	Формула	Умовні позначення
Фисенко Г.Л. [13]	$K_c = \frac{1}{1 + a \ln \frac{H}{l}}$	H – розмір обвалення, м; l – середній розмір блоку (куску), м; a – коефіцієнт, який залежить від міцності породи у моноліті та її тріщинуватості, що дорівнює 0,5 – 10.
Рац М.В. [14]	$K_c = 0,08 + 0,92 \left(\frac{H}{l} \right)^{-1,2}$	
ВНДМІ (БНіП II-94-80)	$\begin{aligned} K_c &= 0,9 \text{ при } l_m > 1,5 \text{ м} \\ K_c &= 0,8 \text{ при } 1,0 < l_m < 1,5 \text{ м} \\ K_c &= 0,6 \text{ при } 0,5 < l_m < 1,0 \text{ м} \\ K_c &= 0,4 \text{ при } 0,1 < l_m < 0,5 \text{ м} \\ K_c &= 0,2 \text{ при } l_m < 0,1 \text{ м} \end{aligned}$	l_m – відстань між тріщинами, м
Мосинець В.М., Абрамов А.В. [15]	$K_c = \frac{1}{1 + 0,25 \sigma_p \ln \frac{W}{l_{cp}}}$	W – лінія найменшого опору, м; l_{cp} – середня відстань між тріщинами, м.
Андрієвський О.П., Кутузов Б.М. [16]	$K_c = \frac{1}{0,97 + 0,13 \frac{R_{mp}}{l_{cp}}}$	R_{mp} – радіус зони тріщиноутворення у монолітному масиві, м.
Сдвижкова О.О., Шашенко О.М. [17]	$K_c = 1 - \sqrt{0,5 \cdot \eta} \cdot e^{-0,25 \cdot \eta}$	η – коефіцієнт варіації міцності породного масиву.

Для отримання кількісної картини зміни радіусів зон зминання, інтенсивного подрібнення та тріщиноутворення виконаємо розрахунок їх радіусів за допомогою отриманих математичних моделей при підриванні у зарядній порожнині патрованої ЕВР Україніт-П-СА і наливної ЕВР Україніт-ПП-2 [18]. Вихідні дані для проведення розрахунку радіусів зон, що утворюються навколо зарядної порожнини при її вибуховому навантаженні, подано у табл. 2.

Таблиця 2. Вихідні дані для розрахунку радіусів зон зминання, інтенсивного подрібнення та тріщиноутворення при підриванні заряду ВР

Показник	Одиниця виміру	ЕВР	
		Україніт-П-СА	Україніт-ПП-2
Діаметр зарядної порожнини, d	м	0,043	
Діаметр заряду, d_z	м	0,032	0,043
Густина ЕВР за даними практики, ρ	кг/м ³	1150	1250
Швидкість детонації, D	м/с	5050	4930
Межа міцності порід на стискання, σ_{cm}	МПа	40 – 180	

Для більш високої точності отримання результатів використовували математичні моделі радіусів зон зминання, інтенсивного подрібнення та тріщиноутворення без врахування ущільнення порід під дією гірського тиску та тріщинуватості масиву. Тому розрахунок радіусів зон виконували за наступними формулами: зони зминання – (10), інтенсивного подрібнення – (11), тріщиноутворення – (12). У якості прикладу розглянемо зміну радіусів зон зминання, інтенсивного подрібнення та тріщиноутворення в залежності від міцності порід при підриванні у зарядній порожнині патрованої ЕВР Україніт-П-СА і наливної ЕВР Україніт-ПП-2 (рис. 2).

Як видно з графіків (рис. 2), на величину радіусу зон зминання, інтенсивного подрібнення та тріщиноутворення істотно впливає діаметр заряду ВР. Так при підриванні наливної ЕВР Україніт-ПП-2 для умов $d_z = d$ радіус зони зминання в залежності від міцності порід змінюється від 0,42 до 0,19 м, інтенсивного подрібнення – від 1,37 до 0,44 м, а тріщиноутворення – від 3,32 до 1,0 м. При підриванні патрованої ЕВР Україніт-П-СА для умов $d_z < d$ радіус зони зминання в залежності від міцності порід змінюється від 0,27 до 0,12 м, інтенсивного подрібнення – від 0,71 до 0,23 м, а тріщиноутворення – від 1,67 до 0,51 м. Зменшення величини радіусів зон при використанні патрованої ЕВР Україніт-П-СА у порівнянні з наливною ЕВР Україніт-ПП-2 складає для зони зминання 37%, інтенсивного подрібнення 48% та тріщиноутворення 49%. Це вказує на те, що діаметр заряду істотно впливає на величину тиску продуктів вибуху на стінки зарядної порожнини. Тому використання наливної ЕВР Україніт-ПП-2 призводить до збільшення радіусів руйнування масиву порід навколо зарядної порожнини майже в 1,5 – 2,0 рази у порівнянні з патрованою ЕВР Україніт-П-СА.

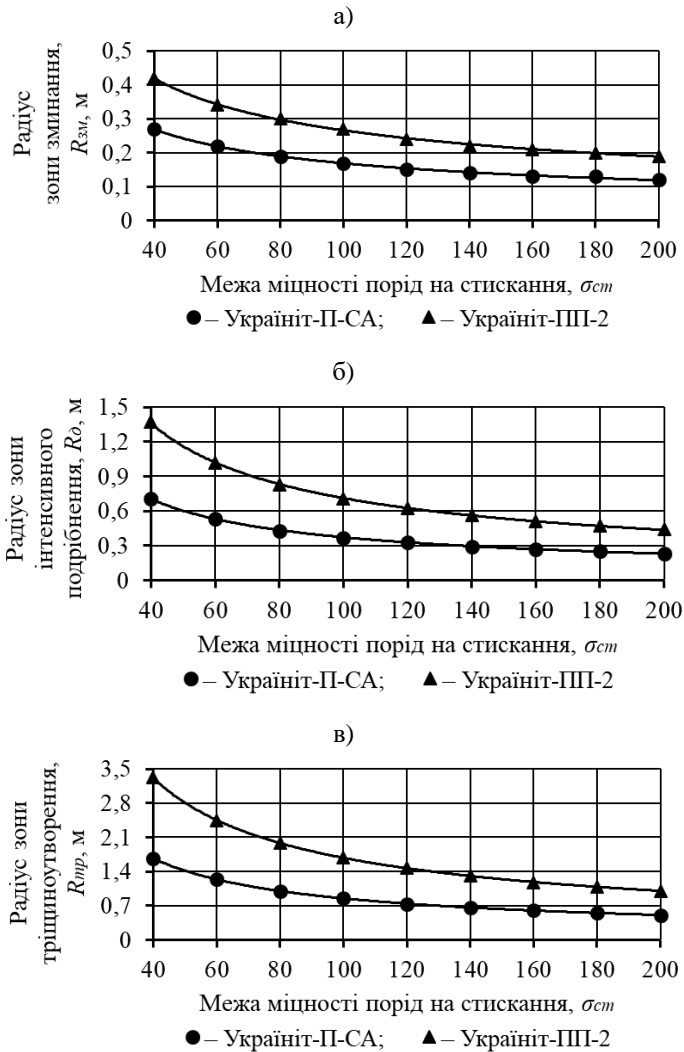


Рисунок 2. Зміна радіусу зони змінання (а), інтенсивного подрібнення (б) та тріщиноутворення (в) залежно від міцності порід при підриванні у зарядній порожнині патронованої ЕВР Україніт-П-СА і наливної ЕВР Україніт-ПП-2

4. Висновки

1. Встановлено математичні моделі утворення зон змінання, інтенсивного подрібнення та тріщиноутворення, які формуються навколо зарядної порожнини в масиві гірських порід при його вибуховому навантаженні з урахуванням діаметрів зарядної порожнини та заряду ВР, детонаційних характеристик вибухівки, межі міцності порід, їх тріщинуватості та ущільнення під дією гірського тиску. Отримано залежність зони змінання, з якої випливає, що радіус зони змінання, що утворена при підриванні заряду ВР, прямо пропорційний радіусу зарядної порожнини та квадратному кореню від тиску, який розвивається продуктами детонації з урахуванням впливу діаметру заряду ВР, та зворотно пропорційний квадратному кореню від межі міцності породи на стиснення, коефіцієнтів ущільнення породи під дією гірського тиску та структурного послаблення масиву. Встановлено, що

радіус зони інтенсивного подрібнення при вибуху заряду ВР, прямо пропорційний радіусу зони зминання та квадратному кореню від тиску продуктів детонації ВР, діаметру зарядної порожнини та коефіцієнту, що враховує зміну тиску продуктів вибуху на стінки зарядної порожнини в залежності від діаметру заряду ВР, та зворотно пропорційний кореню квадратному від радіусу зони зминання, межі міцності породи на стискання, коефіцієнтам структурного послаблення масиву та ущільнення породи під дією гірського тиску. Отримано, що радіус зони тріщиноутворення при вибуху подовженого заряду, прямо пропорційний радіусу зони зминання та квадратному кореню від тиску продуктів детонації ВР, діаметру зарядної порожнини та коефіцієнту, що враховує зміну тиску продуктів вибуху на стінки зарядної порожнини в залежності від діаметру заряду ВР, та зворотно пропорційний кореню квадратному від радіусу зони зминання, межі міцності породи на здвиг, коефіцієнтам структурного послаблення масиву та ущільнення породи під дією гірського тиску.

2. Розрахунок радіусів зон зминання, інтенсивного подрібнення та тріщиноутворення за отриманими математичними моделями при підірванні у зарядній порожнині патрованої ЕВР Україніт-П-СА і наливної ЕВР Україніт-ПП-2, дозволив встановити, що діаметр заряду ВР істотно впливає на величину тиску продуктів вибуху на стінки зарядної порожнини. Тому при підірванні заряду наливної ЕВР Україніт-ПП-2 призводить до збільшення радіусів руйнування масиву порід навколо зарядної порожнини майже в 1,5 – 2,0 рази у порівнянні з патрованою ЕВР Україніт-П-СА.

3. Запропонована теорія може бути використана для розрахунку величин радіусів зон, які утворюються навколо зарядної порожнини при вибуху подовженого заряду ВР, як у монолітному не тріщинуватому, так і у тріщинуватому масивах гірських порід з урахуванням діаметрів зарядної порожнини та заряду вибухівки, ущільнення порід під дією гірського тиску при використанні ВР з різними детонаційними характеристиками [19]. Результати розрахунку цих зон дозволять проектувати раціональні параметри БПР, як при проведенні гірничих виробок [20], так і при виконанні очисних робіт, що пов'язані з відбиванням руд, за різними схемами розташування свердловин [18].

Література

1. Myronova, I. (2016). Prediction of contamination level of the atmosphere at influence zone of iron-ore mine. *Mining of Mineral Deposits*, 10(2), 64-71. <http://doi.org/10.15407/mining10.02.0064>
2. Kholodenko, T., Ustimenko, Y., Pidkamenna, L., & Pavlychenko, A. (2014). Ecological safety of emulsion explosives use at mining enterprises. *Progressive Technologies of Coal, Coalbed Methane, and Ores Mining*, 255-260. <http://doi.org/10.1201/b17547-45>
3. Mironova, I., & Borysovs'ka, O. (2014). Defining the parameters of the atmospheric air for iron ore mines. *Progressive Technologies of Coal, Coalbed Methane, and Ores Mining*, 333-339. <http://doi.org/10.1201/b17547-57>
4. Kholodenko, T., Ustimenko, Y., Pidkamenna, L., & Pavlychenko, A. (2015). Technical, economic and environmental aspects of the use of emulsion explosives by ERA brand in underground and surface mining. *New Developments in Mining Engineering 2015*, 211-219. <http://doi.org/10.1201/b19901-38>
5. Kazakov, N.N. (1975). *Vzryvnaya otboyka rud skvazhinnyimi zaryadami*. Moskva: Nedra, 191 p.
6. Komir, V.M., Kuznetsov, V.M., Vorob'yev, V.V., & Chebenko, V.N. (1988). *Povyshenie effektivnosti deystviya vzryva v tverдой srede*. Moskva: Nedra, 209 p.
7. Efremov, E.I., & Petrenko, V.D. (1984). *Mekhanika vzryvnogo razrusheniya porod razlichnoy struktury*. Kiev: Naukova dumka, 192 p.

8. Rzhavskiy, V.V., & Novik, G.Ya. (1984). *Osnovy fiziki gornykh porod*. Moskva: Nedra, 359 p.
9. Pokrovskiy, G.I. (1980). *Vzryv*. Moskva: Nedra, 190 p.
10. Kutuzov B.N. Andrievskiy A.P. (2002). *Novaya teoriya i novye tekhnologii razrusheniya gornykh porod udlinennymi zaryadami vzryvchatykh veshchestv*. Novosibirsk: Nauka, 96 p.
11. 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>
12. 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>
13. Fisenko G.L. (1965). *Ustoychivost' bortov kar'yerov i otvalov*. Moskva: Nedra, 378 p.
14. Rats M.V. (1973). *Strukturnye modeli v inzhenernoy geologii*. Moskva: Nedra, 216 p.
15. Mosinets, V.N., & Abramov, A.V. (1982). *Razrushenie treshchinovatykh i narushennykh gornykh porod*. Moskva: Nedra, 248 p.
16. Andrievskii, A.P., Kutuzov, B.N., Polovov, B.D., & Matveev, P.F. (1997). Influence of physical and mechanical properties and fissuring of a solid mass on the parameters of the resulting explosion funnel in breaking an exposed surface. *Journal of Mining Science*, 33(4), 345-347. <https://doi.org/10.1007/bf02765853>
17. Shashenko, O.M., Tulub, S.B., & Sdvyzhkova O.O. (2002). *Deiaki zadachi statystychnoi heomekhaniky*. Kyiv: Pulsary, 304 p.
18. 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. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2021-2/069>
19. Khomenko, O., Kononenko, M., Myronova, I., & Savchenko, M. (2019). Application of the emulsion explosives in the tunnels construction. *E3S Web of Conferences*, 123, 01039. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201912301039>
20. 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. <https://doi.org/10.33271/mining13.03.022>