

© М.М. Кононенко<sup>1</sup>, О.Є. Хоменко<sup>1</sup>, І.О. Садовенко<sup>1</sup>, В.В. Соболев<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна

## МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЗОН РУЙНУВАННЯ МАСИВУ ПОРІД ВИБУХОМ

© M. Kononenko<sup>1</sup>, O. Khomenko<sup>1</sup>, I. Sadovenko<sup>1</sup>, V. Sobolev<sup>1</sup>

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

## MATHEMATICAL SIMULATION OF ROCK MASS DESTRUCTION ZONES BY EXPLOSION

**Мета.** Вдосконалення параметрів зон руйнування порідного масиву вибухом залежно від тиску продуктів вибуху в зарядній порожнині та фізико-механічних властивостей порід, шляхом суміщення аналітичного і чисельного математичного моделювання.

**Методика дослідження.** З використанням теорії пружності та основних положень квазістатично-хвильової гіпотези механізму руйнування твердого середовища під дією вибуху проведено аналітичне моделювання параметрів утворення зон зминання та подрібнення масиву гірських порід навколо зарядної порожнини при його вибуховому навантаженні. За зміною напружено-деформованого стану масиву під дією вибуху проведено чисельне моделювання зон зминання, інтенсивного подрібнення та тріщиноутворення методом скінченних елементів. Для встановлення придатності отриманих аналітичних моделей до розрахунків радіусів зазначених зон проведено порівняння результатів аналітичного та чисельного моделювання.

**Результати дослідження.** Розроблені аналітичні моделі радіусів зон зминання, інтенсивного подрібнення та тріщиноутворення, що формуються навколо зарядної порожнини у масиві гірських порід при його вибуховому навантаженні з урахуванням тиску продуктів вибуху, межі міцності порід на розтягання-стискання, їх структурної будови, тріщинуватості та ущільнення під дією гірського тиску. Чисельним моделюванням руйнування порід навколо зарядної порожнини встановлено степеневі залежності зміни радіусів зон зминання та подрібнення масиву в залежності від діаметру зарядної порожнини, тиску продуктів вибуху і межі міцності порід на стискання. Порівнянням результатів аналітичного та чисельного моделювання для жорстких крайових умов однорідного нетріщинуватого масиву встановлено розбіжність величин радіусів означених зон – 4, 8 і 6% відповідно.

**Наукова новизна.** Встановлені математичним моделюванням радіуси зон зминання, інтенсивного подрібнення та тріщиноутворення, що формуються при вибуховому руйнуванні гірського масиву, змінюються за степеневою залежністю від діаметру заряду вибухової речовини, тиску продуктів вибуху у зарядній порожнині, міцності порід на розтягання-стискання, коефіцієнтів структури породи, структурного ослаблення та ущільнення, визначають підвищення точності оцінки параметрів руйнування гірського масиву до 50%.

**Практичне значення.** За математичними моделями радіусів зон зминання, інтенсивного подрібнення та тріщиноутворення, що формуються у масиві порід навколо зарядної порожнини під дією вибуху, визначаються вдосконалені параметри буропідричних робіт для проведення гірничих виробок, порожнин спеціального призначення і відбивання масиву.

**Ключові слова:** порідний масив, буропідричні роботи, вибухова речовина, зарядна порожнина, зони руйнування масиву порід.

**Вступ.** Однією з найбільш розвинених галузей промисловості України є чорна металургія, у зародженні та становленні якої відіграла сировинна база залізних руд [1]. Видобування залізних руд пов'язане з руйнуванням великих об'ємів міцних гірських порід, що вимагає попереднього їх подрібнення за допомогою буропідривних робіт (БПР). Сама технологія виконання БПР потребує постійного вдосконалення з урахуванням сучасних досягнень науки та техніки [2]. Сьогодні одним із напрямків удосконалення технології ведення БПР, є підвищення безпеки підривних робіт і зниження їх впливу на довкілля. Це можливо за рахунок заміщення тротиловмісних вибухових речовин (ВР) емульсійними вибуховими речовинами (ЕВР) вітчизняного виробництва [3], які є абсолютно безпечні у транспортуванні [4] й зберіганні [5], економічно вигідні [6] та екологічно чисті [7].

Згідно Цільової регіональної програми переходу гірничо-збагачувальних комбінатів на безтритилові екологічно чисті ВР з 2004 року рудні та нерудних кар'єри почали переходити на використання нових безтритилових ВР. І вже у 2011 році використання цих ВР на гірничих підприємствах з відкритим способом розробки досягло 99%. Підземна розробка залізних руд у повному обсязі реалізується буропідривними роботами (БПР) із застосуванням промислових вибухових речовин (ПВР), з яких на сьогодні 58% – це емульсійні. Впровадження ЕВР, що розпочате у 2009 році, розкрило недосконалість існуючих методик визначення параметрів БПР. Офіційно діючі методики не враховують фізико-хімічні особливості та детонаційні характеристики ЕВР, структурну будову порід їх тріщинуватість та ущільнення під дією гірського тиску, що призводить до використання некоректних параметрів буропідривних робіт з негативними наслідками.

Тому особлива увага науковців і виробників приділяється вдосконаленню та розробці нових методик розрахунку параметрів БПР, що суттєво підвищують ефективність створення підземної інфраструктури при видобуванні руд і формуванні порожнини спеціального призначення. Отже необхідність підвищення ефективності руйнування гірських порід вибухом із застосуванням не тільки ЕВР, а і всіх ВР є актуальною науково-технічною проблемою.

**Постановка завдання.** Відомо, що гірська порода уявляє собою неоднорідне тверде тіло, яке має складну структуру, а сам механізм її руйнування ще більш складний. У загальному випадку механізм руйнування гірських порід вибухом характеризується короткочасністю прикладення навантаження та залежить від багатьох факторів. Останнім часом пізнання процесу вибуху значно розширилось, але на сьогодні не існує загальновизнаного уявлення про механізм руйнування порід вибухом. Це пов'язане з різноманітністю, складністю та швидкоплинністю явищ, які є слідством дії вибуху у твердому середовищі [8]. До числа явищ процесу вибуху відносяться: детонація заряду ВР, розширення зарядної порожнини (шпуру або свердловини), механічна взаємодія продуктів 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 [9]. Аналізом гіпотез, які по-

яснюють фізичну сутність процесу руйнування масиву гірських порід вибухом [10], встановлено сучасні погляди на дію вибуху у твердому середовищі, яким є спільна дія продуктів вибуху та хвиль напружень.

Науковці з України, Польщі, Сербії, Німеччини, Швеції, Китаю, США, Австралії та інших країн дослідили механізм руйнування порід вибухом та запропонували виробникам значну кількість методик розрахунку параметрів БПР для проведення виробок і відбивання масиву на підставі розроблених теорій. Однак, більшість з цих методик має емпіричну основу, яка ґрунтується на використанні поправних коефіцієнтів, а меншість – аналітичну, що базується на визначенні зон руйнування масиву. Всі теорії та методики розрахунку параметрів БПР сформовані на різних закономірностях і уявленнях про механізм руйнування масиву гірських порід вибухом та не враховують детонаційні характеристики сучасних ЕВР. Тому, спираючись на спільну дію продуктів вибуху та хвиль напружень в масиві порід, необхідно вдосконалити математичні моделі зон руйнування масиву порід вибухом залежно від детонаційних характеристик ВР та фізико-механічних властивостей середовища.

**Методика досліджень.** Метою дослідження є вдосконалення параметрів зон руйнування порідного масиву вибухом залежно від тиску продуктів вибуху в зарядній порожнині та фізико-механічних властивостей порід, шляхом суміщення аналітичного і чисельного математичного моделювання.

Для досягнення поставленої мети вирішені наступні завдання:

- узагальнені теорії визначення зон руйнування масиву порід навколо зарядної порожнини;
- деталізовані зони, що утворюються навколо зарядної порожнини під дією вибуху за деформацією та руйнуванням середовища;
- виявлено з використанням аналітичного моделювання закономірності утворення зон зминання, інтенсивного подрібнення та тріщиноутворення, що формуються в масиві порід навколо зарядної порожнини під дією вибуху;
- виконане чисельне моделювання руйнування масиву порід навколо зарядної порожнини та встановлені закономірності зміни радіусів зон зминання та подрібнення залежно від тиску продуктів вибуху і фізико-механічних властивостей порід.

**Виклад основного матеріалу.** В результаті вибуху подовженого заряду ВР у необмеженому середовищі навколо зарядної порожнини, утворюються зони зминання, радіальних тріщин та пружних деформацій. Аналізом теорій та методик розрахунку розмірів цих зон встановлено [10], що для розрахунку раціональних параметрів БПР за різними критеріями руйнування середовища дослідники встановлювали закономірності утворення тільки двох зон – зминання [11] та тріщиноутворення [12]. Також всі ці теорії не розглядають зони інтенсивного подрібнення, радіус якої є вирішальним при визначенні лінії найменшого опору. Тому надалі більш детально розглянутий механізм руйнування гірських порід навколо зарядної порожнини з точки зору видів та критеріїв руйнування середовища.

Відомо, що в результаті підривання заряду ВР за рахунок високого тиску продуктів вибуху, що виділилися з надзвуковою швидкістю, у конденсованому середовищі утворюється ударна хвиля [13]. У межах радіусу дії ударної хвилі формується зона стискання [14], в якій порода зазнає руйнування до ультрадисперсних частинок і виникає зона зминання. Причиною одного з можливих, а може й головного механізму руйнування гірської породи в цій зоні вибуху можуть бути термопружні напруження. В якості альтернативного або як додаткового фактору розглядається механізм, обумовлений переходом мікроструктури кристалічних компонентів породи в стан нестійкості. Причиною є перенасичення мікроструктури породи лінійними і точковими дефектами. Перевищення значення критичної концентрації дефектів призводить до надмірного запасу внутрішньої енергії з подальшим спонтанним або вимушеним руйнуванням хімічних зв'язків, особливо під час виходу хвиль розрідження на вільну поверхню. В зоні стискання, згідно досліджень [15], масив змінює свою структуру, а також відбувається інтенсивне дрібнодисперсне подрібнення породи на частинки розміром 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 тверджень Ржевського В.В. і Новіка Г.Я. у цій зоні енергія вибуху витрачається на подолання опору породи зсуву, розтягання та частково стискання. Покровський Г.І. зазначає, що після утворення ущільненого шару навколо зарядної порожнини (зона зминання) з'являється зона, яка пронизана радіальними тріщинами у вигляді променів, між якими є тріщини 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: інтенсивного подрібнення, у якій діють напруження стискання від зниженого тиску продуктів вибуху і безпосередньо зону тріщиноутворення, де порода буде деформуватися під дією напружень зсуву та розтягання.

Далі хвиля напружень переходить у сейсмічну хвилю, яка не руйнує масив, а лише стрясає, тому за зоною тріщиноутворення з'являється зона стрясання [16]. У зоні стрясання також частково відбувається руйнування порід за природними тріщинами без подрібнення масиву на окремі частини. Спираючись на виконаний аналіз процесу руйнування гірських порід дією вибуху, проведена остаточна градація зон, які утворюються навколо зарядної порожнини (табл.).

Таблиця

Деталізація зон, які утворюються навколо зарядної порожнини

| Зона     | Хвиля     | Деформації       | Вид руйнування           |
|----------|-----------|------------------|--------------------------|
| Перша    | Ударна    | Пластичні        | Зминання                 |
| Друга    | Напружень | Пружно-пластичні | Інтенсивного подрібнення |
| Третя    |           |                  | Тріщиноутворення         |
| Четверта | Сейсмічна | Пружні           | Стрясання                |

Для вирішення задач подрібнення гірських порід вибухом при розрахунку параметрів БПР представляють інтерес перші три зони (див. табл.) – зминання, інтенсивного подрібнення та тріщиноутворення. Четверта зона важлива для врахування сейсмічної дії вибуху.

Для математичного моделювання дії вибуху розроблено параметричну схему до визначення зон зминання, інтенсивного подрібнення та тріщиноутворення, що утворюються навколо зарядної порожнини при підриванні заряду ВР (рис. 1).

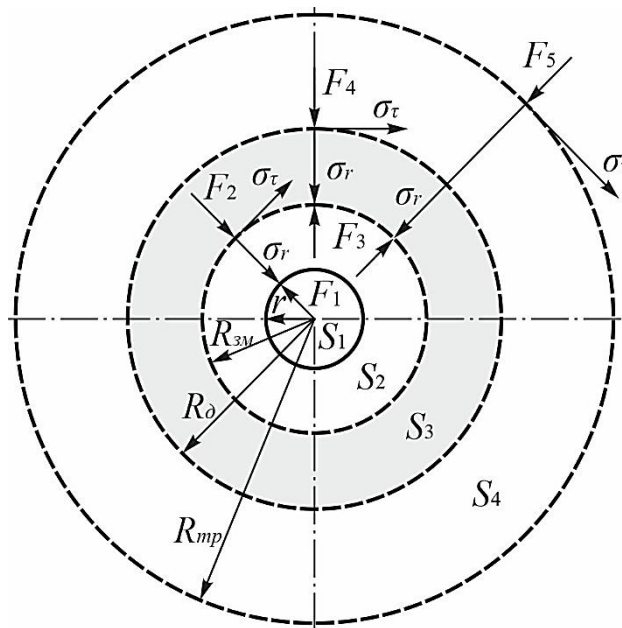


Рис.1. Параметрична схема до визначення зон зминання, інтенсивного подрібнення та тріщиноутворення:  $S_1, S_2, S_3, S_4$  – площі зарядної порожнини та відповідних зон,  $m^2$ ;  $F_1, F_2, F_3, F_4, F_5$ , – діючі сили, Н;  $\sigma_r$  – радіальні напруження,  $H/m^2$ ;  $\sigma_\tau$  – тангенціальні напруження,  $H/m^2$ ;  $r$  – радіус зарядної порожнини, м;  $R_{3m}$  – радіус зони зминання, м;  $R_d$  – радіус зони інтенсивного подрібнення, м;  $R_{mp}$  – радіус зони тріщиноутворення, м

Механічні напруження  $\sigma$ , що виникають в масиві порід під дією енергії вибуху для зони зминання, інтенсивного подрібнення та тріщиноутворення визначаються наступними співвідношеннями

$$\sigma = \frac{P_1 \cdot r^2}{R_{3m}^2 - r^2}, \text{ Н/м}^2, \quad (1)$$

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

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

де  $P_1$  – тиск продуктів вибуху [17] з достатньою точністю відповідає виразу

$$P_1 = \frac{\rho \cdot D^2}{8} \cdot K_{\partial 3}, \text{ Па}, \quad (4)$$

де  $\rho$  – щільність (густина) ВР, кг/м<sup>3</sup>;  $D$  – швидкість детонації ВР, м/с;  $K_{\partial 3}$  – коефіцієнт, що враховує зміну тиску продуктів вибуху на стінки зарядної порожнини в залежності від діаметру заряду ВР [18]

$$K_{\partial 3} = \left( \frac{d_3}{d} \right)^3, \quad (5)$$

де  $d_3$  – діаметр заряду ВР, м;  $d$  – діаметр зарядної порожнини, м;  $P_2$  – зниження тиску продуктів вибуху на масив за рахунок збільшення площі контакту

$$P_2 = \frac{P_1 \cdot r}{R_{3M}}, \text{ Па}. \quad (6)$$

Вирази (1) – (3) це рівняння задачі Ламе Г. [19], згідно теорії, за якої у товстостінних циліндрах в умовах дії внутрішнього тиску, радіальні напруження  $\sigma_r$  у всіх точках циліндра будуть від'ємні (напруження стискання), а тангенціальні напруження  $\sigma_t$  – позитивні (напруження розтягання), тобто це головні напруження.

Для визначення еквівалентного напруження  $\sigma_{екв}$  у об'ємному напруженому стані використана Третя теорія міцності, яка підтвердила достовірність прогнозних параметрів радіусів воронки викиду в умовах реальних об'єктів [20]. Отже головні напруження:  $\sigma_1 = \sigma_t = \sigma$ ;  $\sigma_2 = 0$ ;  $\sigma_3 = \sigma_r = -\sigma$ . За вказаною теорією, еквівалентне напруження дорівнює  $\sigma_{екв} = \sigma_1 - \sigma_3$ ; тоді для зони зминання

$$\sigma_{екв} = \frac{2 \cdot P_1 \cdot r^2}{R_{3M}^2 - r^2}, \text{ Н/м}^2; \text{ інтенсивного подрібнення} - \sigma_{екв} = \frac{2 \cdot P_2 \cdot R_{3M}^2}{R_{\partial}^2 - R_{3M}^2}, \text{ Н/м}^2;$$

$$\text{тріщиноутворення} - \sigma_{екв} = \frac{2 \cdot P_2 \cdot R_{3M}^2}{R_{mp}^2 - R_{3M}^2}, \text{ Н/м}^2. \text{ При утворенні зон зминання та ін-}$$

тенсивного подрібнення діє умова всебічного стиснення  $\sigma_{екв} = \sigma_{ст}$ .

З теорії пружності та пластичності відомо, що при зовнішньому діаметрі циліндра більшим за внутрішній у 4 рази і розрахунки припускають розбіжність до 6%, то рішення не пов'язане з формою зовнішнього контуру, а циліндр знаходиться в умовах чистого зсуву, тобто для зони тріщиноутворення  $\sigma_{екв} = \tau_3$ . Ґрунтуючись на вище наведеному і з урахуванням динамічного коефіцієнту при ударному навантаженні, після необхідних перетворень отримано аналітичні вирази радіусів зон

– зминання

$$R_{3M} = 0,5 \cdot d \cdot \sqrt{1 + \frac{\rho \cdot D^2 \cdot K_{\partial 3}}{2 \cdot \sigma_{ст}}}, \text{ м}; \quad (7)$$

– інтенсивного подрібнення

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

– тріщиноутворення

$$R_{mp} = R_{3M} \cdot \sqrt{1 + \frac{\rho \cdot D^2 \cdot d \cdot K_{\partial 3}}{8 \cdot R_{3M} \cdot \tau_3}}, \text{ м}; \quad (9)$$

де  $\sigma_{cm}$  – межа міцності порід на стискання, Па;  $\tau_3$  – межа міцності порід на зсув, Па.

Для підвищення точності розрахунків радіусів вказаних зон у надані формули введено коефіцієнти структури породи, структурного ослаблення масиву та ущільнення порід під дією гравітаційних сил (гірського тиску). За необхідних перетворень формули розрахунку радіусів зон є наступними

– змінання

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

– інтенсивного подрібнення

$$R_{\partial} = R_{3M} \cdot \sqrt{1 + \frac{\rho \cdot D^2 \cdot d \cdot K_{\partial 3}}{8 \cdot R_{3M} \cdot \sigma_{cm} \cdot K_{cn} \cdot K_c \cdot K_y}}, \text{ м}; \quad (11)$$

– тріщиноутворення

$$R_{mp} = R_{3M} \cdot \sqrt{1 + \frac{\rho \cdot D^2 \cdot d \cdot K_{\partial 3}}{8 \cdot R_{3M} \cdot \tau_3 \cdot K_{cn} \cdot K_c \cdot K_y}}, \text{ м}; \quad (12)$$

де  $K_{cn}$  – коефіцієнт структури породи, який залежить від властивостей масиву [21]: для в'язких, пружних і пористих порід  $K_{cn} = 2,0$ , для дислокованих, з мінливим заляганням та дрібною тріщинуватістю  $K_{cn} = 1,4$ , для сланцевих, з мінливою міцністю та напластуванням, перпендикулярним напрямку зарядної порожнини  $K_{cn} = 1,3$ , для масивних, крихких  $K_{cn} = 1,1$ , для монолітних  $K_{cn} = 1,0$ , для дрібнопористих, нещільних  $K_{cn} = 0,8$ ;  $K_c$  – коефіцієнт структурного ослаблення масиву, що визначається за однією з формул наданих у роботі [10];  $K_y$  – емпіричний коефіцієнт ущільнення порід під дією гірського тиску  $K_y = \frac{\gamma + 0,1 \cdot H}{\gamma}$  [22];  $\gamma$  – щільність порід, кг/м<sup>3</sup>;  $H$  – глибина гірничих робіт, м.

З метою підтвердження достовірності отриманих аналітичних моделей для розрахунків радіусів зон змінання, інтенсивного подрібнення та тріщиноутворення проведено чисельне моделювання методом скінченних елементів за ліцензійним програмним продуктом системи інженерного аналізу SolidWorks

Simulation. Для проведення чисельного скінченно-елементного аналізу моделі руйнування масиву навколо зарядної порожнини було сформовано вихідні дані: геометричні розміри моделі, середні значення фізико-механічних властивостей гірських порід за всіма залізородними шахтами України, граничні навантаження за жорсткими умовами. Обчислювальні експерименти проводили для межі міцності порід на стискання 40 – 200 МПа, діаметрів зарядної порожнини 0,04 – 0,12 м та тиску продуктів вибуху 1000, 1500 і 2000 МПа. Жорсткість крайових умов надана з урахуванням динамічної дії вибуху та основних положень опору матеріалів [23], енергетичної теорії [24] і роботи [25]. У якості прикладу розглянуто відображення головного напруження стискання  $\sigma_3$  та розтягання  $\sigma_1$  моделі для порід з межею міцності на стискання 100 МПа, при діаметрі зарядної порожнини 0,04 м і тиску продуктів вибуху у 1000 МПа, що подано на рис. 2.

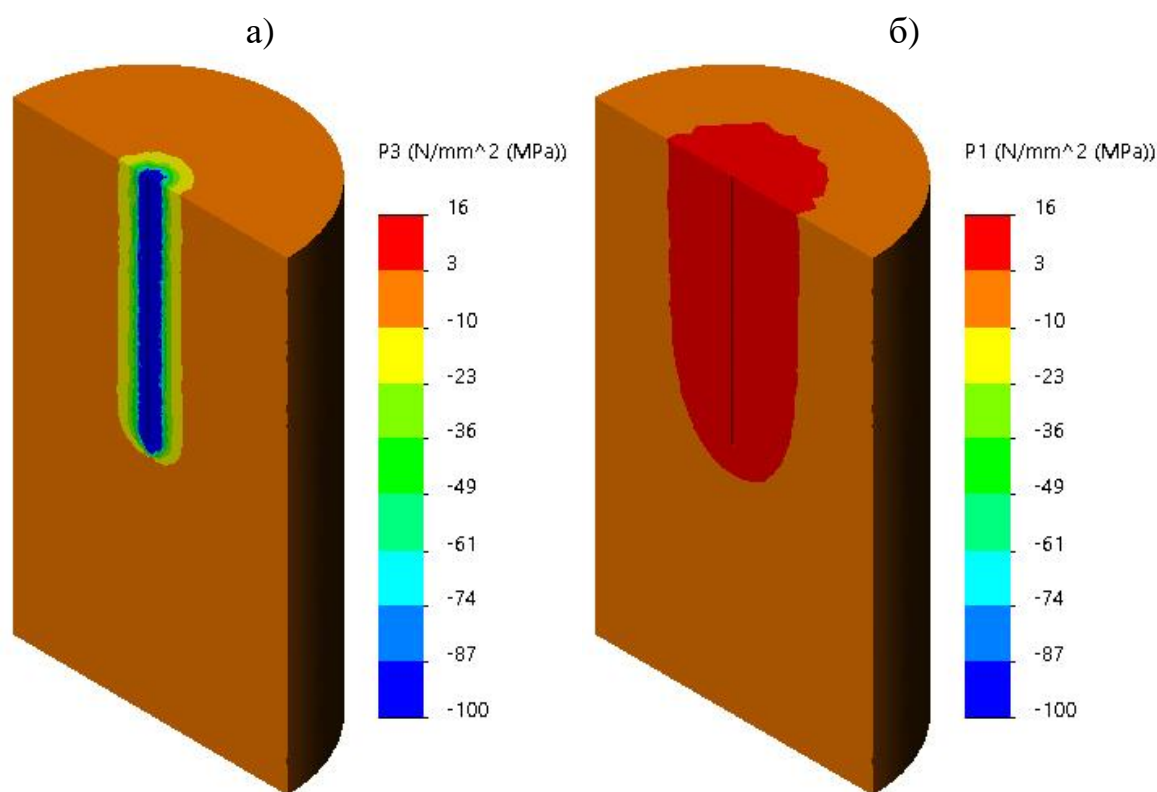


Рис. 2. Відображення головного напруження стискання  $\sigma_3$  (а) і розтягання  $\sigma_1$  (б) для порід з межею міцності на стискання 100 МПа при діаметрі зарядної порожнини 0,04 м і тиску продуктів вибуху 1000 МПа

За результатами модельних вимірів при тиску продуктів вибуху 1500 МПа отримані графіки (рис. 3).



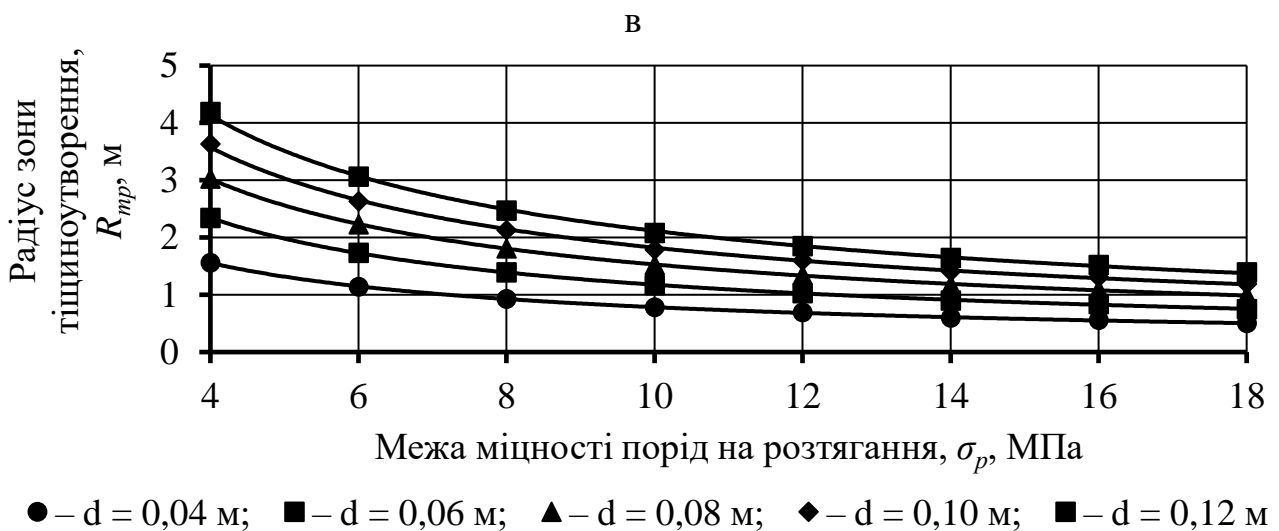
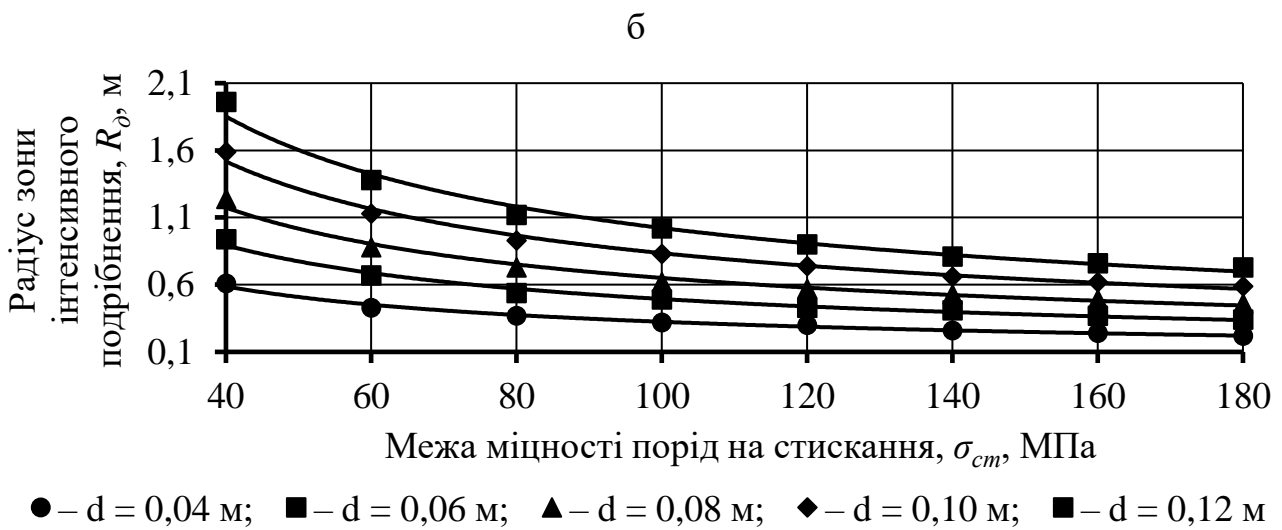
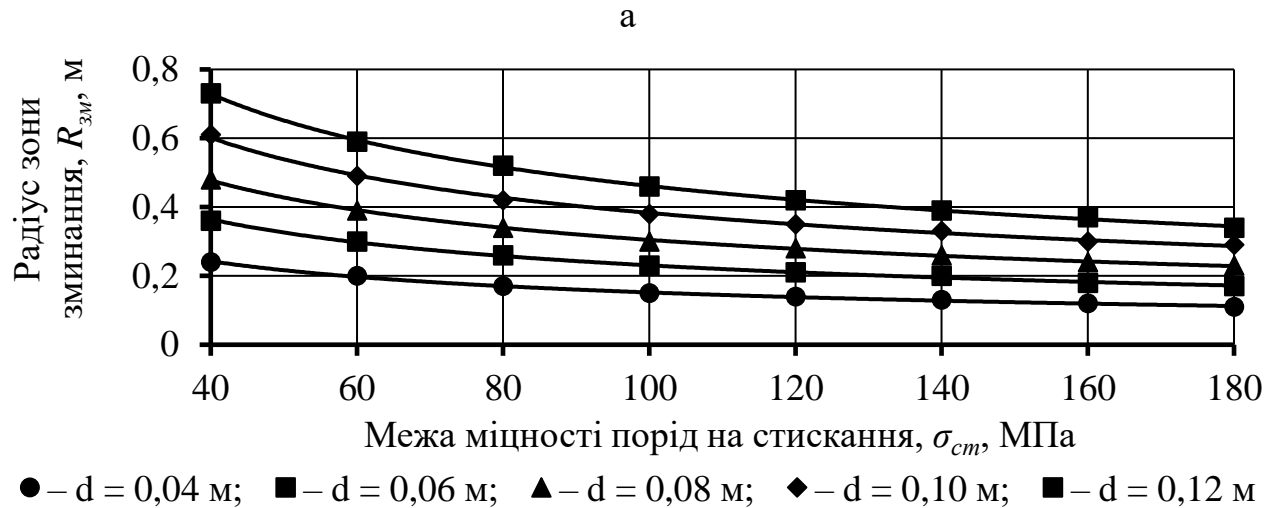


Рис. 3. Графіки залежності радіусу зони змінання (а), інтенсивного подрібнення (б) та тріщиноутворення (в) від межі міцності порід на розтягання-стискання та діаметру зарядної порожнини при тиску продуктів вибуху 1500 МПа

Регресійним аналізом встановлені степеневі залежності зміни радіусів зон  
– зминання

$$R_{zm} = 0,372 \cdot d \cdot \rho^{0,499} \cdot D^{0,998} \cdot \sigma_{cm}^{-0,501} \cdot K_{\partial z}^{0,499}, \text{ м}; \quad (13)$$

– інтенсивного подрібнення

$$R_{\partial} = 0,424 \cdot d \cdot \rho^{0,648} \cdot D^{1,296} \cdot \sigma_{cm}^{-0,651} \cdot K_{\partial z}^{0,648}, \text{ м}; \quad (14)$$

– тріщиноутворення

$$R_{mp} = 0,036 \cdot d \cdot \rho^{0,743} \cdot D^{1,486} \cdot \sigma_{cm}^{0,747} \cdot \tau_3^{-1,494} \cdot K_{\partial z}^{0,743}, \text{ м}. \quad (15)$$

Порівнянням результатів аналітичних оцінок з результатами чисельного моделювання встановлено розбіжність параметрів зон зминання, інтенсивного подрібнення та тріщиноутворення – 4, 8 і 6%, відповідно. Це вказує на високу достовірність отриманих результатів і придатність формул (10) – (12) до визначення радіусів вказаних зон, що вдосконалюють розрахунок параметрів БПР при проведенні гірничих виробок [26], порожнин спеціального призначення і відбиванні масиву руди [27].

**Висновки.** Аналізом уявлень про механізм руйнування масиву гірських порід вибухом, а також теорій формування радіусів зон, які утворюються навколо зарядної порожнини під дією вибуху встановлено, що дослідження тяжіють до розгляду фізичного механізму тільки двох зон – зминання та тріщиноутворення, а перехідна зона – інтенсивного подрібнення, у межах якої продовжується дія тиску продуктів вибуху, не деталізована. Аналізом деформації гірських порід навколо зарядної порожнини з точки зору схеми та критерію руйнування середовища виконано деталізацію зон, що утворюються навколо зарядної порожнини, якими є зони зминання, інтенсивного подрібнення, тріщиноутворення й стрясання.

Аналітичним моделюванням механізму утворення зон зминання та подрібнення масиву гірських порід навколо зарядної порожнини під дією вибуху отримані аналітичні моделі радіусів зон зминання, інтенсивного подрібнення та тріщиноутворення, які утворюються навколо зарядної порожнини у масиві гірських порід при його вибуховому навантаженні з урахуванням тиску продуктів вибуху, міцності порід на розтягання-стискання, їх структурної будови, тріщинуватості та ущільнення під дією гірського тиску.

Чисельним моделюванням руйнування порід навколо зарядної порожнини, з використанням метода скінченних елементів, встановлено степеневі залежності зміни радіусів зон зминання та подрібнення масиву в залежності від діаметру зарядної порожнини, тиску продуктів вибуху і межі міцності порід на стискання. Порівнянням результатів аналітичних оцінок радіусів зон зминання, інтенсивного подрібнення та тріщиноутворення з результатами чисельного моделювання для жорстких крайових умов встановлена розбіжність величин радіусів цих зон – 4, 8 і 6% відповідно. Це вказує про високу достовірність отриманих результатів і придатності отриманих аналітичних моделей до розрахунку радіусів цих зон.

**Перелік посилань**

1. 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>
2. 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>
3. Krysin, R.S., Ishchenko, N.I., Klimenko, V.A., Piven, V.A., & Kuprin, V.P. (2004). Explosive ukranit-PM-1: Equipment and fabrication technology. *Gornyi Zhurnal*, (8), 32-37.
4. 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>
5. 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.  
<https://doi.org/10.15407/mining10.02.0064>
6. Kononenko M., Khomenko O., Myronova I., & Kovalenko I. (2022). Economic and environmental aspects of using mining equipment and emulsion explosives for ore mining. *Mining Machines*, 40(2), 88-97.  
<https://doi.org/10.32056/KOMAG2022.2.4>
7. Myronova, I. (2015). The level of atmospheric pollution around the iron-ore mine. *New Developments In Mining Engineering 2015*, 193-197.  
<https://doi.org/10.1201/b19901-35>
8. Kazakov, N.N. (1975). *Vzryvnaya otboyka rud skvazhinnymi zaryadami*. Nedra.
9. Komir, V.M., Kuznetsov, V.M., Vorob'yev, V.V., & Chebenko, V.N. (1988). *Povyshenie effektivnosti deystviya vzryva v tverдой srede*. Nedra.
10. 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>
11. Esen S., Onederra I., & Bilgin H.A. (2003). Modelling the size of the crushed zone around a blasthole. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, (40), 485-495.  
[https://doi.org/10.1016/s1365-1609\(03\)00018-2](https://doi.org/10.1016/s1365-1609(03)00018-2).
12. Torbica, S., & Lapcevic, V. (2014). Rock breakage by explosives. *European International Journal of Science and Technology*, 3(2), 96-104.
13. Danilenko V.V. (2010). *Vzryv: fizika, tekhnika, tekhnologiya*. Energoatomizdat.
14. Sobolev, V.V., Kulivar, V.V., Kyrychenko, O.L., Kurliak, A.V., & Balakin, O.O. (2020). Evaluation of blast wave parameters within the near-explosion zone in the process of rock breaking with borehole charges. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, (2), 47-52.  
<https://doi.org/10.33271/nvngu/2020-2/047>
15. Erofeev, I.E. (1977). *Povyshenie effektivnosti burovzryvnykh robot na rudnikakh*. Nedra.
16. Mosinets, V.N., & Gorbacheva, N.P. (1972). A seismological method of determining the parameters of the zones of deformation of rock by blasting. *Soviet Mining Science*, 8(6), 640-647.  
<https://doi.org/10.1007/bf02497586>
17. Persson, P. A., Holmberg, R., & Lee, J. (1993). *Rock blasting and explosives engineering*. Boca Raton, Fla.: CRC Press, 560 p.
18. 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>
19. Fesik, S.P. (1982). *Spravochnik po soprotivleniyu materialov*. Budivel'nik.

20. Andrievskii, A.P., Kutuzov, B.N., Matveev, P.F., & Nikolaev, Y.I. (1996). Formation of the blast crater in a rock mass blast-loaded by column charges. *Journal of Mining Science*, 32(5), 390-394.  
<https://doi.org/10.1007/bf02046160>
21. 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>
22. Khomenko, O., & Kononenko, M. (2019). Geo-energetics of Ukrainian crystalline shield. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, (3), 12-21.  
<https://doi.org/10.29202/nvngu/2019-3/3>
23. Belyaev N.M. (1962). *Soprotivlenie materialov*. Moskva: Fizmatgiz, 856 p.
24. Anistratov Yu.I. (1996). Energeticheskaya teoriya rascheta tekhnologii otkrytykh gornyykh robot. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten*, (3), 20-29.
25. Pokrovskiy, G.I. (1980). *Vzryv*. Moskva: Nedra, 190 p.
26. Кононенко М.М., Хоменко О.С., & Коробка Є.О. (2021). Параметри буропідричних робіт для проведення гірничих виробок. *Фізико-технічні проблеми горного виробництва*, (23), 54-71.  
<https://doi.org/10.37101/ftpgp23.01.004>
27. Кононенко М.М., Хоменко О.С., & Косенко А.В. (2022). Чисельне моделювання лінії найменшого опору при підриванні зарядів. *Збірник наукових праць НГУ*, (69), 43-57.  
<https://doi.org/10.33271/crpnmu/69.043>

#### ABSTRACT

**Purpose.** Improving the parameters of the rock mass destruction zones by a blasting, depending on the pressure of the explosion products in the charging cavity and the physical and mechanical properties of rocks by combining analytical and numerical mathematical simulation.

**The methodology of research.** Using the theory of elasticity and the main provisions of the quasi-static wave hypothesis of the mechanism of destruction of a solid medium under the action of an explosion, an analytical simulation of the parameters of the formation of crush zones and grinding of a rock mass around the charging cavity under its explosive load was carried out. After the change in the stress-strain state of the massif under the action of the explosion, numerical simulation of the crushing zones, intensive grinding and cracking by the finite element method was carried out. To establish the suitability of the obtained analytical models for calculating the radii of the indicated zones, the results of analytical and numerical simulation were compared.

**Findings.** Analytical models have been developed for the radii of the zones of crushing, intense grinding and cracking, which are formed around the charging cavity in the rock mass under its explosive load, taking into account the pressure of the explosion products, the tensile-compressive strength of the rocks, their structural structure, and fracturing. Numerical simulation of the destruction of rocks around the charging cavity established the power-law dependences of the change in the radii of the crushing zones and the grinding of the massif depending on the diameter of the charging cavity, the pressure of the explosion products, and the compressive strength of the rocks. By comparing the results of analytical and numerical simulation for rigid boundary conditions of a homogeneous non-fractured massif, the discrepancy between the radii of the indicated zones is found to be 4, 8 and 6%, respectively.

**The originality.** The radii of the zones of crushing, intense grinding and cracking, established by mathematical simulation, formed during the explosive destruction of the rock mass, change according to a power law dependence on the diameter of the explosive charge, the pressure of the explo-

sion products in the charging cavity, the strength of the rocks in tension-compression, the coefficients of the rock structure, structural weakening and compaction, determine the increase in the accuracy of estimating the parameters of the destruction of the rock mass up to 50%.

**Practical implications.** Based on mathematical models of the radii of the zones of crushing, intense grinding and cracking, which are formed in the rock mass around the charging cavity under the action of an explosion, improved parameters of drilling and blasting operations are determined for mine workings, special-purpose cavities and breaking of the massif.

**Keywords:** *rock mass, drilling and blasting, explosive, charging cavity, rock mass destruction zone.*