

MODELING OF COMPRESSION ZONES AND ROCK MASSIF BREAKAGE UNDER THE ACTION OF EXPLOSION ENERGY

M. Kononenko^{1}, O. Khomenko¹*

¹ *Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine*

** Corresponding author: kmn211179@gmail.com*

Abstract. Mathematical models of the formation of breaking zones, intensive grinding and cracking, which are formed around the charging cavity in the rock massif with taking into account the action of rock pressure and energy characteristics of the explosives were created based on the results of modeling of the action of the explosion in a solid medium. Numerical solution of mathematical models allowed to establish the power dependences of the formation of these zones, which occur in monolithic non-fractured and fractured massifs under their explosive loading, depending on the physical-and-mechanical properties of rocks, energy characteristics of explosives and rock pressure. Comparison of the results of numerical modeling of the radiuses of these zones with previously identified patterns allowed to establish the discrepancy of the results with already well-known methods, which does not exceed for the zone of compression and cracking up to 1%, and intensive grinding up to 9%. Application of the obtained results of modeling the radiuses of the breaking zones, intensive grinding and cracking, which are formed in the rock massif around the charging cavity, allows calculating the line of least resistance for blast holes and boreholes during mining.

Key words: rock massif, charging cavity, explosive, explosion loading, grinding zone

МОДЕЛЮВАННЯ ЗОН ЗМИНАННЯ ТА ПОДРІБНЕННЯ МАСИВУ ПОРІД ПІД ДІЄЮ ЕНЕРГІЇ ВИБУХУ

М. Кононенко^{1}, О. Хоменко¹*

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

** Відповідальний автор: kmn211179@gmail.com*

Анотація. За результатами моделювання дії вибуху у твердому середовищі було розроблено математичні моделі утворення зон зминання, інтенсивного подрібнення та тріщиноутворення, які формуються навколо зарядної порожнини у масиві гірських порід з урахуванням дії гірського тиску та детонаційних характеристик вибухової речовини. Чисельне рішення математичних моделей дозволило встановити степеневі залежності формування зазначених зон, що виникають у монолітному нетріщинуватому, так і у тріщинуватому масивах при його вибуховому навантаженні, що залежать від фізико-механічних властивостей гірських порід, детонаційних характеристик вибухівки та дії гірського тиску. Порівняння результатів чисельного моделювання радіусів цих зон з раніше виявленими закономірностями дозволило встановити розбіжність результатів з відомими методиками, що не перевищує для зони зминання і тріщиноутворення – 1%, а інтенсивного подрібнення – 9%. Використання отриманих результатів моделювання радіусів зон зминання, інтенсивного подрібнення та тріщиноутворення, які формуються у масиві порід навколо зарядної порожнини, дозволяє розраховувати лінію найменшого опору для шпурів і свердловин при виконанні гірничих робіт.

Ключові слова: масив порід, зарядна порожнина, вибухова речовина, вибухове навантаження, зона подрібнення

Вступ

Підземний видобуток руд пов'язаний з руйнуванням великих об'ємів міцних гірських порід, розробка яких вимагає попереднє подрібнення за допомогою буропідривних робіт

(БПР). На підставі цього особлива увага науковців і виробничників приділяється вдосконаленню та розробці нових методик розрахунку параметрів БПР, які забезпечують покращення показників прохідницьких і видобувних робіт [1, 2].

Вивчення гіпотез механізму руйнування масиву гірських порід вибухом, дозволив встановити сучасні погляди на дію вибуху у твердому середовищі, якими є спільна дія продуктів детонації та хвиль напружень. Подальший аналіз теорій розрахунку величин радіусів зон, які утворюються навколо зарядної порожнини під дією вибуху, дозволив встановити, що всі дослідники розглядали утворення тільки двох зон – зминання та тріщиноутворення, а більшість формул для їх розрахунку мають емпіричний вид. Теорії розрахунку радіусів цих зон створено для монолітних порід без урахування зміни фізико-механічних властивостей гірських порід під дією гірського тиску. Це вказує на те, що більшість з них розроблялися для умов ведення вибухових робіт на відкритих гірничих роботах. Також у деяких формулах розрахунку зон наводиться коефіцієнт відносної працездатності вибухівки, який не враховує енергетичні характеристики сучасних вибухових речовин (ВР) [3], що призводить до отримання неточних результатів.

Тому спираючись на спільну дію квазістатичної та хвильової гіпотез дії вибуху в масиві, потрібно розробити таку теорію руйнування масиву гірських порід, за якою можна розрахувати величини зон, що утворюються навколо зарядної порожнини з врахуванням фізико-механічних властивостей середовища, дії гірського тиску та детонаційних характеристик вибухівки.

Методика

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

- розробка параметричних схем щодо зон руйнування середовища навколо зарядної порожнини під дією енергії вибуху;
- формування математичних моделей щодо зон зминання, інтенсивного подрібнення та тріщиноутворення, які утворюються навколо зарядної порожнини у масиві гірських порід при його вибуховому навантаженні;
- чисельне рішення математичних моделей та встановлення закономірностей зміни радіусів цих зон у залежності від фізико-механічних властивостей масиву, детонаційних характеристик ВР і дії гірського тиску.

Розробку нової 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.

Результати та обговорення

Як відомо з теорії дії вибуху [4] та згідно з [5], у гірській породі після детонації ВР за рахунок тиску продуктів вибуху утворюється ударна хвиля. 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. [4], у цій зоні енергія вибуху витрачається на подолання опору породи здвигу, розтягання та частково стискання. Також, Покровський Г.І. у своїй праці [5] зазначає, 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 розтягання.

Далі хвиля механічних напружень переходить у сейсмічну хвилю, яка не руйнує масив, а лише його стрясає, тому за зоною тріщиноутворення з'являється зона стрясування [4, 5]. 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 дією вибуху, проведемо градацію зон, які утворюються навколо зарядної порожнини, що подано у табл. 1.

Таблиця 1 – Деталізація зон, які утворюються навколо зарядної порожнини

Зона	Хвиля	Деформації	Руйнування
Перша	Ударна	Пластичні	Зминання
Друга	Напружень	Пружно-пластичні	Інтенсивного подрібнення
Третя			Тріщиноутворення
Четверта	Сейсмічна	Пружні	Стрясування

Згідно нової теорії руйнування масиву порід за допомогою енергії вибуху [6] після вибухового перетворення заряду ВР, що розташований у зарядній порожнині, від якої у всі сторони масиву порід 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 параметричною схемою, що подано на рис. 1.

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

– зминання

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

– інтенсивного подрібнення

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

– тріщино утворення

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

де r – радіус зарядної порожнини, м; $R_{зм}$ – радіус зони 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 [6]

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

де P_1 – тиск продуктів вибуху, згідно з [7] з достатньою точністю можна визначити як

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

де ρ – щільність ВР, кг/м³; D – швидкість детонації ВР, м/с.

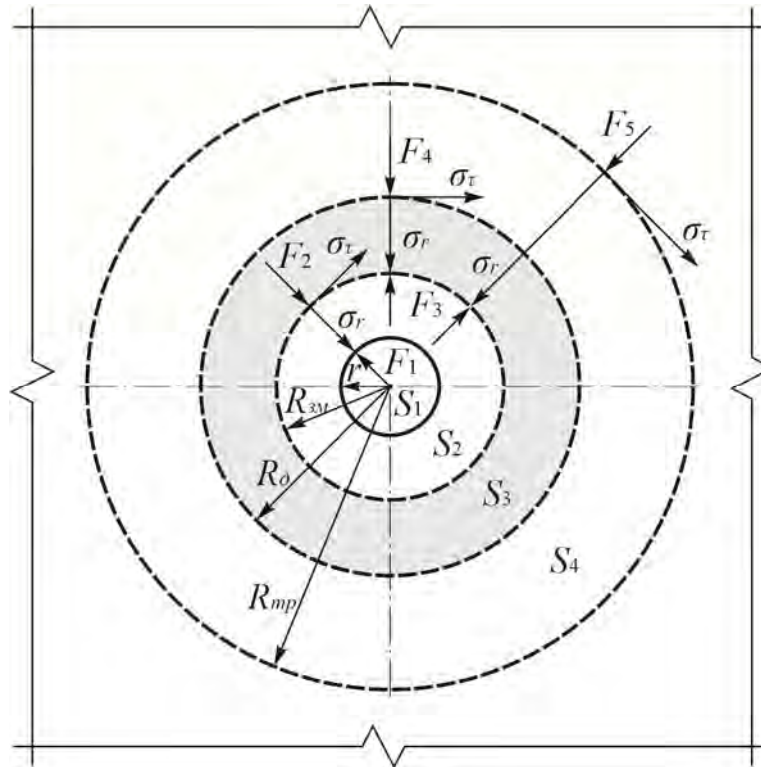


Рисунок 1 – Параметрична схема до визначення зон змінання, інтенсивного подрібнення та тріщиноутворення, що утворюється навколо зарядної порожнини при підриванні заряду ВР

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_τ – позитивні (напруження розтягання). Тобто напруження σ_r і σ_τ 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.

Головні напруження

$$\sigma_1 = \sigma_\tau = \sigma;$$

$$\sigma_2 = \sigma_z = 0;$$

$$\sigma_3 = \sigma_r = -\sigma.$$

За Третьою теорією міцності при складному напруженому стані, еквівалентне напруження дорівнює:

$$\sigma_{екв} = \sigma_1 - \sigma_3 \leq [\sigma];$$

або для зони:

– зминання

$$\sigma_{екв} = \frac{2 \cdot P_1 \cdot r^2}{R_{зм}^2 - r^2}, \text{ Н/М}^2; \quad (6)$$

– інтенсивного подрібнення

$$\sigma_{екв} = \frac{2 \cdot P_2 \cdot R_{зм}^2}{R_{\partial}^2 - R_{зм}^2}, \text{ Н/М}^2; \quad (7)$$

– тріщиноутворення

$$\sigma_{екв} = \frac{2 \cdot P_2 \cdot R_{зм}^2}{R_{тр}^2 - R_{зм}^2}, \text{ Н/М}^2. \quad (8)$$

Для утворення зон зминання та інтенсивного подрібнення виконується умова всебічного стискання $\sigma_{екв} \leq \sigma_{ст}$. 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 $\sigma_{екв} \leq \tau_3$. Грунтуючись вище наведеним і з урахуванням динамічного коефіцієнту при ударному навантаженні та виконавши необхідні перетворення отримуємо математичні моделі радіусів зон:

– зминання

$$R_{зм} = 0,5 \cdot d \cdot \sqrt{1 + \frac{\rho \cdot D^2}{2 \cdot \sigma_{ст}}}, \text{ м}; \quad (9)$$

– інтенсивного подрібнення

$$R_{\partial} = R_{зм} \cdot \sqrt{1 + \frac{\rho \cdot D^2 \cdot d}{8 \cdot R_{зм} \cdot \sigma_{ст}}}, \text{ м}; \quad (10)$$

– тріщиноутворення

$$R_{тр} = R_{зм} \cdot \sqrt{1 + \frac{\rho \cdot D^2 \cdot d}{8 \cdot R_{зм} \cdot \tau_3}}, \text{ м}; \quad (11)$$

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

Отримані формули (9) – (11) дозволяють розраховувати радіуси зон зминання, інтенсивного подрібнення та тріщиноутворення, які утворюються в масиві навколо зарядної порожнини з урахуванням детонаційних характеристик ВР і фізико-механічних властивостей 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 гравітаційних сил (гірського тиску) [8, 9]. Виконавши необхідні перетворення, отримуємо формули розрахунку радіусів зон:

– зминання

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

– інтенсивного подрібнення

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

– тріщиноутворення

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

де K_c – коефіцієнт структурного послаблення масиву; K_y – коефіцієнт ущільнення порід за рахунок дії гірського тиску, згідно праці [8]

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

де γ – щільність порід, кг/м^3 ; H – глибина гірничих робіт, м.

Чисельне моделювання зон, що утворюються в масиві гірських порід навколо зарядної порожнини при вибуховому навантаженні, необхідно для отримання чисельного рішення математичних моделей та встановлення закономірностей зміни радіусів цих зон в залежності від змін гірничо-геологічних і гірничо-технічних умов проведення підривання.

Вихідними даних для проведення чисельного моделювання зон зминання, інтенсивного подрібнення та тріщиноутворення, що утворюються навколо зарядної порожнини при її вибуховому навантаженні є: тиск продуктів детонації (вибуху) – 1000, 1500 і 2000 МПа; межа міцності порід на стискання – 40 – 180 МПа; діаметр зарядної порожнини – 0,04, 0,06, 0,08, 0,10 та 0,12 м. Для більш високої точності отримання результатів чисельного моделювання використовували математичні моделі радіусів зон зминання, інтенсивного подрібнення та тріщиноутворення без врахування гірського тиску та тріщинуватості масиву. Тому розрахунок величин радіусів зон виконували за наступними формулами: зони зминання – (9), інтенсивного подрібнення – (10), тріщиноутворення – (11).

За результатами розрахунку розглянемо характер зміни величини радіусу зони зминання в залежності від діаметру зарядної порожнини та межі міцності порід на стискання при тиску продуктів вибуху у 1500 МПа (рис. 2).

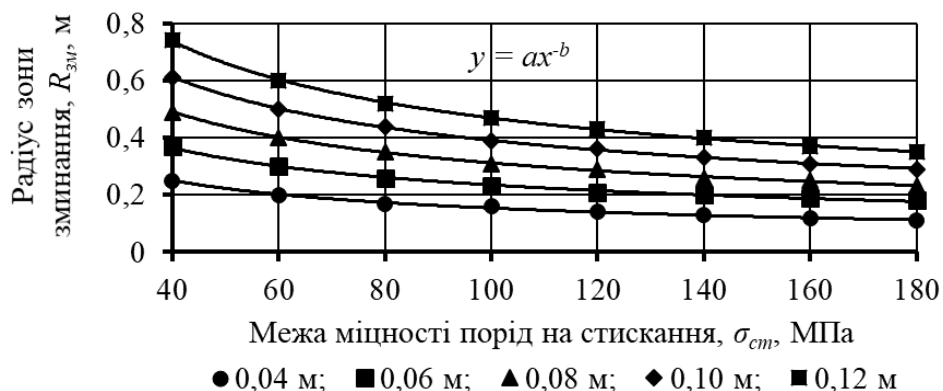


Рисунок 2.6 – Графік зміни радіусу зони зминання від міцності порід на стискання та діаметру зарядної порожнини при тиску продуктів вибуху 1500 МПа

Провівши апроксимацію максимальних значень, отримано залежності зміни радіусу зони зминання $R_{зм}$ від межі міцності гірських порід на стискання σ_{cm} для різних діаметрів зарядної порожнини d .

Для масиву гірських порід при тиску продуктів вибуху у зарядній порожнині $P_1 = 1000$ МПа:

– при $d = 0,04$ м

$$R_{зм} = 1290 \cdot \sigma_{см}^{-0,501}, \text{ м, при } R^2 = 0,9949; \quad (16)$$

– при $d = 0,06$ м

$$R_{зм} = 1900 \cdot \sigma_{см}^{-0,502}, \text{ м, при } R^2 = 0,996; \quad (17)$$

– при $d = 0,08$ м

$$R_{зм} = 2550 \cdot \sigma_{см}^{-0,499}, \text{ м, при } R^2 = 0,9973; \quad (18)$$

– при $d = 0,10$ м

$$R_{зм} = 3180 \cdot \sigma_{см}^{-0,5}, \text{ м, при } R^2 = 0,9993; \quad (19)$$

– при $d = 0,12$ м

$$R_{зм} = 3850 \cdot \sigma_{см}^{-0,501}, \text{ м, при } R^2 = 0,999, \quad (20)$$

де $\sigma_{см}$ – межа міцності порід на стискання, Па; R^2 – величина достовірності апроксимації.

Таким чином, у формулах (16) – (20), при різних діаметрах зарядної порожнини, радіус зони зминання в залежності від межі міцності гірських порід на стискання змінюється за степеневою залежністю

$$R_{зм} = a \cdot \sigma_{см}^{-0,5}, \quad (21)$$

де a – число, яке має відому величину.

Значення числа a в залежності від діаметру зарядної порожнини змінюється за наступним законом:

$$a = 32000 \cdot d, \text{ при } R^2 = 0,9997, \quad (22)$$

де d – діаметр зарядної порожнини, м.

Для масиву гірських порід при тиску продуктів вибуху у зарядній порожнині $P_1 = 1500$ МПа:

– при $d = 0,04$ м

$$R_{зм} = 1550 \cdot \sigma_{см}^{-0,502}, \text{ м, при } R^2 = 0,995; \quad (23)$$

– при $d = 0,06$ м

$$R_{зм} = 2300 \cdot \sigma_{см}^{-0,498}, \text{ м, при } R^2 = 0,996; \quad (24)$$

– при $d = 0,08$ м

$$R_{зм} = 2950 \cdot \sigma_{см}^{-0,497}, \text{ м, при } R^2 = 0,998; \quad (25)$$

– при $d = 0,10$ м

$$R_{зм} = 3900 \cdot \sigma_{см}^{-0,501}, \text{ м, при } R^2 = 0,9994; \quad (26)$$

– при $d = 0,12$ м

$$R_{зм} = 4500 \cdot \sigma_{см}^{-0,498}, \text{ м, при } R^2 = 0,9996. \quad (27)$$

Таким чином, у формулах (23) – (27), при різних діаметрах зарядної порожнини, радіус зони зминання в залежності від межі міцності гірських порід на стискання змінюється за степеневою залежністю, що показує формула (21).

Значення числа a в залежності від діаметру зарядної порожнини змінюється за наступним законом:

$$a = 39000 \cdot d, \text{ при } R^2 = 0,9803. \quad (28)$$

Для масиву гірських порід при тиску продуктів вибуху у зарядній порожнині $P_1 = 2000$ МПа:

– при $d = 0,04$ м

$$R_{зм} = 1800 \cdot \sigma_{см}^{-0,501}, \text{ м, при } R^2 = 0,9987; \quad (29)$$

– при $d = 0,06$ м

$$R_{зм} = 2700 \cdot \sigma_{см}^{-0,5}, \text{ м, при } R^2 = 0,9988; \quad (30)$$

– при $d = 0,08$ м

$$R_{зм} = 3650 \cdot \sigma_{см}^{-0,501}, \text{ м, при } R^2 = 0,999; \quad (31)$$

– при $d = 0,10$ м

$$R_{зм} = 4500 \cdot \sigma_{см}^{-0,499}, \text{ м, при } R^2 = 0,9996; \quad (32)$$

– при $d = 0,12$ м

$$R_{зм} = 5450 \cdot \sigma_{см}^{-0,501}, \text{ м, при } R^2 = 0,9995. \quad (33)$$

Таким чином, у формулах (29) – (33), при різних діаметрах зарядної порожнини, радіус зони зминання в залежності від межі міцності гірських порід на стискання змінюється за степеневою залежністю, яку подано у формулі (21).

Значення числа a в залежності від діаметру зарядної порожнини змінюється за наступним законом:

$$a = 45000 \cdot d, \text{ при } R^2 = 0,9998. \quad (34)$$

Так, у формулах (22), (28) і (34) при різному тиску продуктів вибуху, число a в залежності від діаметру зарядної порожнини змінюється за залежністю

$$a = b \cdot d, \quad (35)$$

де b – дане число, яке має відому величину.

Значення числа b в залежності від тиску продуктів вибуху змінюється за наступним законом

$$b = 1,01 \cdot P_1^{0,5}, \text{ при } R^2 = 0,9999, \quad (36)$$

де P_1 – тиск продуктів вибуху, Па.

Підставимо формулу (36) у формулу (35) і отримуємо:

$$a = 1,01 \cdot P_1^{0,5} \cdot d. \quad (37)$$

Формулу (37) підставимо у формулу (21) і отримаємо

$$R_{зм} = 1,01 \cdot d \cdot P_1^{0,5} \cdot \sigma_{см}^{-0,5}, \text{ м.} \quad (38)$$

Підставивши формулу (5) у формулу (38) та виконавши необхідні перетворення, отримаємо закономірність зміни величини радіусу зони зминання для монолітних нетріщинуватих порід в залежності від діаметру зарядної порожнини, щільності та швидкості детонації ВР і міцності порід на стискання

$$R_{зм} = 0,357 \cdot d \cdot \rho^{0,5} \cdot D \cdot \sigma_{см}^{-0,5}, \text{ м.} \quad (39)$$

Радіус зони змінання для монолітних нетріщинуватих порід з урахуванням дії гірського тиску

$$R_{зм} = 0,357 \cdot d \cdot \rho^{0,5} \cdot D \cdot \sigma_{cm}^{-0,5} \cdot K_y^{-0,5}, \text{ м.} \quad (40)$$

Радіус зони змінання для тріщинуватих порід з урахуванням дії гірського тиску

$$R_{зм} = 0,357 \cdot d \cdot \rho^{0,5} \cdot D \cdot \sigma_{cm}^{-0,5} \cdot K_y^{-0,5} \cdot K_c^{-0,5}, \text{ м.} \quad (41)$$

За результатами розрахунку розглянемо характер зміни величини радіусу зони інтенсивного подрібнення в залежності від діаметру зарядної порожнини та межі міцності порід на стискання при тиску продуктів вибуху у 1500 МПа (рис. 3).

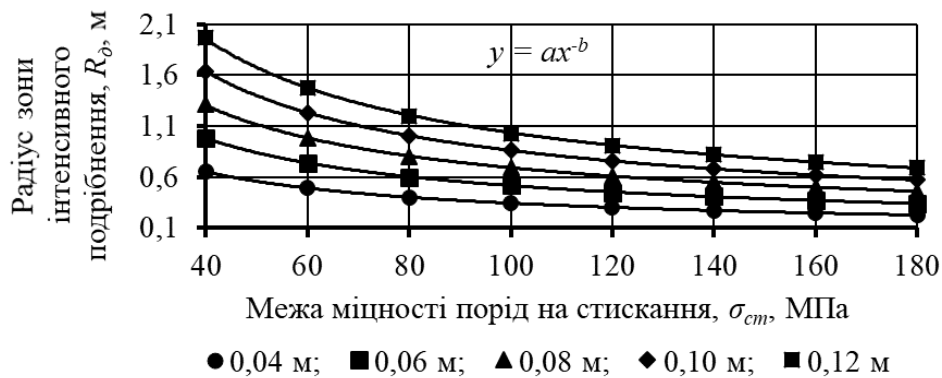


Рисунок 3 – Графік зміни радіусу зони інтенсивного подрібнення від міцності порід на стискання та діаметру зарядної порожнини при тиску продуктів вибуху 1500 МПа

Згідно з наведеною послідовністю встановлення закономірності зміни величини радіусу зони змінання для монолітних нетріщинуватих порід в залежності від діаметру зарядної порожнини, щільності та швидкості детонації ВР і міцності порід на стискання аналогічно виконаємо і для виявлення закономірності зміни величини радіусу зони інтенсивного подрібнення.

Провівши апроксимацію максимальних значень отримано залежність зміни величини радіусу зони інтенсивного подрібнення від межі міцності гірських порід на стискання при різних діаметрах зарядної порожнини та тиску продуктів вибуху

$$R_0 = 1,5 \cdot d \cdot P_1^{0,67} \cdot \sigma_{cm}^{-0,67}, \text{ м.} \quad (42)$$

Підставивши формулу (5) у формулу (42) та виконавши необхідні перетворення, отримаємо закономірність зміни величини радіусу зони інтенсивного подрібнення для монолітних нетріщинуватих порід в залежності від діаметру зарядної порожнини, щільності та швидкості детонації ВР і міцності порід на стискання

$$R_0 = 0,37 \cdot d \cdot \rho^{2/3} \cdot D^{4/3} \cdot \sigma_{cm}^{-2/3}, \text{ м.} \quad (43)$$

Радіус зони інтенсивного подрібнення для монолітних нетріщинуватих порід з урахуванням дії гірського тиску

$$R_0 = 0,37 \cdot d \cdot \rho^{2/3} \cdot D^{4/3} \cdot \sigma_{cm}^{-2/3} \cdot K_y^{-2/3}, \text{ м.} \quad (44)$$

Радіус зони інтенсивного подрібнення для тріщинуватих порід з урахуванням дії гірського тиску

$$R_{\delta} = 0,37 \cdot d \cdot \rho^{2/3} \cdot D^{4/3} \cdot \sigma_{cm}^{-2/3} \cdot K_y^{-2/3} \cdot K_c^{-2/3}, \text{ м.} \quad (45)$$

У зв'язку з тим, що при формуванні зони тріщиноутворення відіграють роль напруження розтягання та здвигу, тому в якості прикладу розглянемо характер зміни величини радіусу зони тріщиноутворення в залежності від діаметру зарядної порожнини та межі міцності порід на розтягання при тиску продуктів вибуху у 1500 МПа (рис. 4).



Рисунок 4 – Графік зміни радіусу зони тріщиноутворення від міцності порід на розтягання та діаметру зарядної порожнини при тиску продуктів вибуху 1500 МПа

За наведеною послідовністю встановлення закономірності зміни величини радіусу зони зминання для монолітних нетріщинуватих порід в залежності від діаметру зарядної порожнини, щільності та швидкості детонації ВР і міцності порід на стискання аналогічно виконаємо і для виявлення закономірності зміни величини радіусу зони тріщиноутворення.

Провівши апроксимацію максимальних значень отримано залежність зміни величини радіусу зони тріщиноутворення від межі міцності гірських порід на розтягання при різних діаметрах зарядної порожнини та тиску продуктів вибуху

$$R_{mp} = 0,458 \cdot d \cdot P_1^{0,75} \cdot \sigma_p^{-0,75}, \text{ м.} \quad (46)$$

Підставивши формулу (5) у формулу (46) та виконавши необхідні перетворення, отримаємо закономірність зміни величини радіусу зони тріщиноутворення для монолітних нетріщинуватих порід в залежності від діаметру зарядної порожнини, щільності та швидкості детонації ВР і міцності порід на розтягання

$$R_{mp} = 0,096 \cdot d \cdot \rho^{0,75} \cdot D^{1,5} \cdot \sigma_p^{-0,75}, \text{ м.} \quad (47)$$

Радіус зони тріщиноутворення для монолітних нетріщинуватих порід з урахуванням дії гірського тиску в залежності від діаметру зарядної порожнини, щільності та швидкості детонації ВР і міцності порід на розтягання

$$R_{mp} = 0,096 \cdot d \cdot \rho^{0,75} \cdot D^{1,5} \cdot \sigma_p^{-0,75} \cdot K_y^{-0,75}, \text{ м.} \quad (48)$$

Радіус зони тріщиноутворення для тріщинуватих порід з урахуванням дії гірського тиску в залежності від діаметру зарядної порожнини, щільності та швидкості детонації ВР і міцності порід на розтягання

$$R_{mp} = 0,096 \cdot d \cdot \rho^{0,75} \cdot D^{1,5} \cdot \sigma_p^{-0,75} \cdot K_y^{-0,75} \cdot K_c^{-0,75}, \text{ м.} \quad (49)$$

Межа міцності порід на розтягання з формули, що подано у працях [10, 11]

$$\sigma_p = 4 \cdot \tau_3^2 \cdot \sigma_{cm}^{-1}, \text{ Па.} \quad (50)$$

Підставивши формулу (50) у формулу (47) та виконавши необхідні перетворення, отримаємо закономірність зміни величини радіусу зони тріщиноутворення для монолітних нетріщинуватих порід в залежності від діаметру зарядної порожнини, щільності та швидкості детонації ВР, межі міцності порід на стискання та здвиг

$$R_{mp} = 0,034 \cdot d \cdot \rho^{0,75} \cdot D^{1,5} \cdot \sigma_{cm}^{0,75} \cdot \tau_3^{-1,5}, \text{ м.} \quad (51)$$

Підставивши формулу (50) у формулу (48) та виконавши необхідні перетворення, отримаємо закономірність зміни величини радіусу зони тріщиноутворення для монолітних нетріщинуватих порід з урахуванням дії гірського тиску в залежності від діаметру зарядної порожнини, щільності та швидкості детонації ВР, межі міцності порід на стискання та здвиг

$$R_{mp} = 0,034 \cdot d \cdot \rho^{0,75} \cdot D^{1,5} \cdot \sigma_{cm}^{0,75} \cdot \tau_3^{-1,5} \cdot K_y^{-0,75}, \text{ м.} \quad (52)$$

Підставивши формулу (50) у формулу (49) та виконавши необхідні перетворення, отримаємо закономірність зміни величини радіусу зони тріщиноутворення для тріщинуватих порід з урахуванням дії гірського тиску в залежності від діаметру зарядної порожнини, щільності та швидкості детонації ВР, межі міцності порід на стискання та здвиг

$$R_{mp} = 0,034 \cdot d \cdot \rho^{0,75} \cdot D^{1,5} \cdot \sigma_{cm}^{0,75} \cdot \tau_3^{-1,5} \cdot K_y^{-0,75} \cdot K_c^{-0,75}, \text{ м.} \quad (53)$$

Результати розрахунку величини радіусу зони зминання за методикою Андрієвського О.П. і Кутузова Б.М. [12, 13] порівнювали з результатами чисельного рішення математичної моделі за запропонованою методикою для умов монолітного нетріщинуватого масиву отриманих за формулою (39). Розбіжність результатів за цими методиками не перевищує 1%, що вказує на високу достовірність отриманих результатів та коректності чисельного рішення математичної моделі зони зминання.

Далі проводили аналіз отриманих результатів розрахунку величини радіусу зони інтенсивного подрібнення за методикою Torbica S., Lapčević V. [14, 15], які порівнювали з результатами чисельного рішення математичної моделі за запропонованою методикою для умов монолітного нетріщинуватого масиву отриманих за формулою (43). Розбіжність результатів за цими методиками не перевищує 9%, що вказує на високу достовірність отриманих результатів та коректності чисельного рішення математичної моделі зони інтенсивного подрібнення.

Подальший аналіз отриманих результатів розрахунку величини радіусу зони тріщиноутворення за методикою Андрієвського О.П. і Кутузова Б.М. [12, 13], які порівнювали з результатами чисельного рішення математичної моделі за запропонованою методикою для умов монолітного нетріщинуватого масиву отриманих за формулою (51). Розбіжність результатів розрахунків за цими методиками не перевищує 1%, що вказує на високу достовірність отриманих результатів і коректності чисельного рішення математичної моделі зони тріщиноутворення.

Висновки

1. Математичне моделювання механізму утворення зон зминання та подрібнення масиву гірських порід навколо зарядної порожнини при його вибуховому навантаженні дозволило розробити математичні моделі утворення зон зминання, інтенсивного подрібнення та тріщиноутворення, які виникають навколо зарядної порожнини у монолітному та тріщинуватому масиві гірських порід при його вибуховому навантаженні з урахуванням

фізико-механічних властивостей середовища, детонаційних характеристик ВР та дії гірського тиску.

2. Чисельне моделювання зон, що утворюються в масиві гірських порід навколо зарядної порожнини під дією вибуху дозволило отримати ступеневі закономірності утворення зон змінання, інтенсивного подрібнення та тріщиноутворення, що виникають навколо зарядної порожнини, в залежності від фізико-механічних властивостей гірських порід, детонаційних характеристик ВР, дії гірського тиску та тріщинуватості масиву. Порівняння результатів чисельного рішення математичних моделей цих зон з раніше встановленими закономірностями дозволило встановити розбіжність результатів розрахунку з відомими методиками, що не перевищує для зони змінання і тріщиноутворення – 1%, а інтенсивного подрібнення – 9%, що вказує на високу достовірність отриманих результатів та коректності чисельного рішення розроблених математичних моделей.

References

1. 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>
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. 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>
4. Ржевский В.В., Новик Г.Я. (1984). *Основы физики горных пород*. Москва : Недра, 359 с.
Rzhevskiy, V.V., & Novik, G.Ya. (1984). *Osnovy fiziki gornykh porod*. Moskva: Nedra, 359 p.
5. Покровский Г.И. *Взрыв*. Москва : Недра, 1980. 190 с.
Pokrovskiy, G.I. (1980). *Vzryv*. Moskva: Nedra, 190 p.
6. Кутузов Б.Н., Андриевский А.П. (2002). *Новая теория и новые технологии разрушения горных пород удлинёнными зарядами взрывчатых веществ*. Новосибирск : Наука, 96 с.
Kutuzov B.N. Andrievskiy A.P. (2002). *Novaya teoriya i novye tekhnologii razrusheniya gornykh porod udlinennymi zaryadami vzryvchatykh veshchestv*. Novosibirsk: Nauka, 96 p.
7. Persson, P.A., Holmberg, R., & Lee, J. (1993). *Rock blasting and explosives engineering*. Boca Raton, Fla.: CRC Press, 560 p.
8. 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>
9. 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>
10. Шашенко А.Н., Сургай Н.С., Парчевский Л.Я. (1994). *Методы теории вероятностей в геомеханике*. Киев : Техніка, 216 с.
Shashenko, A.N., Surgay, N.S., & Parchevskiy, L.Ya. (1994). *Metody teorii veroyatnostey v geomekhanike*. Kiev: Tekhnika, 216 p.
11. Шашенко О.М., Тулуб С.Б., Сдвижкова О.О. (2002). *Деякі задачі статистичної геомеханіки*. Київ : Пульсари, 304 с.
Shashenko, O.M., Tulub, S.B., & Sdvyzhkova O.O. (2002). *Deiaki zadachi statystychnoi heomekhaniky*. Kyiv: Pulsary, 304 p.
12. 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>
13. 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>
14. Torbica, S., & Lapcevic, V. (2014). Rock breakage by explosives. *European International Journal of Science and Technology*, 3(2), 96-104.
15. 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>