

© В.В. Соболев¹, М.М. Кононенко¹, О.Є. Хоменко¹, А.В. Косенко¹¹ Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЗОНИ ЗМИНАННЯ МАСИВУ СВЕРДЛОВИННИМ ЗАРЯДОМ ВИБУХОВОЇ РЕЧОВИНИ ЗА УДАРНОЮ АДІАБАТОЮ ПОРОДИ

V. Sobolev¹, <https://orcid.org/0000-0003-1351-6674>M. Kononenko¹, <https://orcid.org/0000-0002-1439-1183>O. Khomenko¹, <https://orcid.org/0000-0001-7498-8494>A. Kosenko¹, <https://orcid.org/0000-0003-3058-4820>¹ Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine

MATHEMATICAL SIMULATION OF THE CRUSH ZONE OF A ROCK MASS BY A BOREHOLE CHARGE OF EXPLOSIVE SUBSTANCE ALONG THE SHOCK ADIABAT OF THE ROCK

Мета. Встановлення параметрів зони зминання при руйнуванні масиву гірських порід свердловинним зарядом вибухової речовини з урахуванням ударної адіабати даної породи.

Методика дослідження. Використана методика розрахунків ударно-хвильових параметрів гірських порід з урахуванням ударних адіабат та законів теорії пружності, проведено аналітичне моделювання параметрів утворення зони зминання масиву гірських порід навколо свердловини при її вибуховому навантаженні. За зміною напружено-деформованого стану масиву під дією вибуху проведено чисельне моделювання зони зминання методом скінченних елементів. Для встановлення придатності отриманої аналітичної моделі до розрахунків радіусу зазначеної зони проведено порівняння результатів аналітичного та чисельного моделювання.

Результати дослідження. За ударною адіабатою породи розроблена аналітична модель радіусу зони зминання, що формується у масиві гірських порід при підриванні свердловинного заряду з урахуванням діаметру свердловини, величини тиску і масової швидкості частинок породи на контакт вибухової речовини з породою та меж міцності породи на розтягання-стискання. Порівнянням результатів дослідження математичної моделі радіуса зони зминання за ударною адіабатою породи, з отриманою раніше аналітичною моделлю, розрахованою на основі тиску продуктів вибуху встановлено розбіжність, що не перевищує 6%. Порівнянням результатів аналітичних оцінок радіуса зони зминання з результатами чисельного моделювання, встановлена розбіжність величини радіусу означеної зони, яка не перевищує 5%.

Наукова новизна. Величина радіусу зони зминання, що формується в масиві при підриванні свердловинного заряду, змінюються за степеневу залежністю від діаметру свердловини, тиску і масової швидкості частинок породи на контакт вибухової речовини з породою та меж міцності породи на розтягання-стискання, що дозволяє оцінити параметри руйнування масиву гірських порід у ближній зоні вибуху.

Практичне значення. Математичною моделлю радіусу зони зминання за ударною адіабатою породи, що формується у масиві порід навколо свердловини під дією вибуху, визначаються параметри руйнування масиву гірських порід у ближній зоні вибуху.

Ключові слова: масив порід, свердловина, вибухова речовина, ударна адіабата породи, зона зминання.

Вступ. Дослідження механізмів руйнування гірських порід, розроблення способів управління ними та безпека виконання підричних робіт – єдиний комплекс основних завдань науки про руйнування гірських порід вибухом. Звичайно, що до цього переліку актуальних завдань входить забезпечення як економічної ефективності процесів гірничодобувного виробництва, так і підвищення рівня екологічної безпеки довкілля [1, 2]. Кінцевою метою вибухового руйнування масиву гірських порід при видобутку корисних копалин є досягнення заданого гранулометричного складу гірничої маси [3–6]. У процесі вибухового руйнування порід при масових вибухах характерним є утворення та вихід великої маси високодисперсної фракції в атмосферу, що в цілому відноситься до велими негативних показників буропідричних робіт. Утворення дрібної фракції є наслідком застосування вибухової технології руйнування порід, якій поки що немає альтернативи, але яка породжує низку проблем наукового, економічного, технологічного, екологічного та соціального характеру.

Постановка завдання. Теоретична оцінка виходу високодисперсної фракції при переході на свердловини малого діаметру з припущення, що питома витрата вибухової речовини (ВР) та коефіцієнт корисної дії (к.к.д) вибуху не змінюються, показала неоптимістичний результат – вихід дрібних фракцій залежить від діаметра заряду [7]. Проте практика свідчить про підвищення к.к.д. вибуху при зменшенні діаметра заряду ВР.

Відомо, що під час вибуху в породі навколо свердловинного та шпурового заряду утворюється зона дрібних і ультрадисперсних фракцій, водночас порода тут переподрібнюється так, що видувається продуктами детонації, які витікають зі свердловини [8]. Як свідчать експерименти, підривання із застосуванням повітряних проміжків обумовлює суттєве зменшення зони переподрібнення, яке призводить до зниження кількості пилу, що утворюється, і збільшення витрат частини енергії вибуху [9, 10].

У роботі [11] запропоновано методику оцінки радіусу зони переподрібнення, яка заснована на тому, що на поверхні межі розділу «продукти вибуху – гірська порода» початковий тиск на фронті ударної хвилі розраховується в пружному наближенні. Однак відомо [12], що початковий тиск визначається для пружного середовища в акустичному наближенні, сам характер поведінки матеріалу в ближній зоні є також і пластичним, а пористість і тріщинуватість середовища призводить до порушення умов ідеальної пружності. Радіус зони переподрібнення гірської породи під час вибуху можна визначити, використовуючи експериментальні залежності зміни напружень в масиві [13]. Такий підхід виявляється трудомістким, оскільки заснований на експериментальних даних, в яких не розглянуті фізичні процеси, що відбуваються при руйнуванні гірських порід, та параметри хвиль напружень в зоні руйнування, в якій утворюються дрібнодисперсні фракції.

Проходження ударної хвилі в зоні породи, що примикає до зарядної порожнини, супроводжується зсувом породи з незворотною деформацією. Очевидно, що процес роздавлювання буде відбуватися доти, доки тиск на фронті ударної хвилі не стане меншим за максимальне значення напруження, за якого відбува-

ється руйнування породи. Але теоретичної ясності немає для руйнувань у ближній зоні. Уявлення про те, що тиск перевищує межу міцності – по суті нічого не пояснює, оскільки суцільне тверде тіло не руйнується під дією всебічного гідростатичного тиску будь-якої величини. У роботі [5], наприклад, положення характеризується так: «У ближній зоні середовище переподрібнюється і його поведінка уподібнюється до рідини. Спроби теоретичного опису процесів, що відбуваються в зоні зминання, особливого успіху не мали через відсутність повноцінних експериментальних даних щодо поведінки матеріалу». Задовільне пояснення руйнування у ближній зоні вибуху в гірській породі також має пояснити, чому не відбувається утворення порошку у разі вибухового стискання металу (пластичний матеріал), навіть якщо тиск у декілька разів перевищує його межу міцності.

На думку А.Є. Войтенко одна з можливих причин сильного подрібнення гірської породи у ближній зоні вибуху – термопружні напруження, що виникають після проходження сильної ударної хвилі [14]. Сценарій руйнування у ближній зоні вибуху наступний. Після детонації заряду ВР в гірській породі поширюється сильна ударна хвиля. Після проходження ударної хвилі гірська порода залишається нагрітою до значної температури, що є наслідком незворотних втрат енергії ударної хвилі. Мікроструктура мінеральних компонентів породи насичується дефектами кристалічної будови та водночас набуває запасу додаткової внутрішньої енергії [15–17]. Підвищена температура викликає термопружні напруження, які у свою чергу викликають руйнування гірської породи на кшталт послідовного лущення шарів, починаючи з вільної поверхні.

Зі збільшенням відстані від заряду температура нагрівання знижується і, починаючи з деякого радіусу, термопружні сили не можуть викликати руйнування гірської породи. Все, що відбувається з гірською породою в такій концепції, чітко поділяється на два послідовні в часі процеси: перший – нагрівання ударною хвилею, другий – руйнування термопружними напруженнями. Обидва явища порізно добре відомі. Для обох є теоретичні моделі, що дозволяє розглядати їх у сукупності. Запропонований метод розрахунку радіусу ближньої зони вибуху [14], для прогнозу та визначення втрат корисних копалин у вигляді переподрібнених компонентів, не задовольняє через занижені оцінки.

Враховуючи недоліки моделей визначення радіусу ближньої зони вибуху в роботах [18, 19], запропоновано нову методику аналітичного моделювання параметрів утворення зон зминання та подрібнення скельного масиву навколо зарядної порожнини при його підриванні. Автори використовували теорію пружності та основні положення квазістатично-хвильової гіпотези механізму руйнування твердого середовища під дією вибуху, враховуючи тиск продуктів вибуху, межу міцності порід на розтягання-стискання, їх структурну будову, тріщинуватість та ущільнення під дією гірського тиску.

За результатами моделювання встановлено степеневі залежності зміни радіусів зон зминання, інтенсивного подрібнення та тріщиноутворення масиву гірських порід навколо зарядної порожнини під дією вибуху. Шляхом порівняння результатів аналітичного і чисельного моделювання для жорстких крайових умов однорідного нетріщинуватого масиву встановлено розбіжність значень радіусів

означених зон 4, 8 і 6% відповідно. Отримані аналітичні моделі радіусів зон зминання, інтенсивного подрібнення та тріщиноутворення підвищують точність оцінки параметрів руйнування гірського масиву вибухом до 50%.

Використовуючи фізико-хімічні властивості ВР та закономірності оптичних способів ініціювання детонації первинних і вторинних ВР [20, 21], можна зі зміною конструкції заряду виконати ініціювання окремих частин заряду з точністю до 0,1 мс, активно впливаючи на характер перебігу хімічних реакцій, амплітуду та тривалість імпульсу тиску [22]. З досвіду досліджень у галузі фізико-хімічних перетворень конденсованих речовин під час впливу ударних хвиль різної інтенсивності [23–25] тощо, у розрахунках параметрів ударного стиснення необхідно враховувати зв'язок стану порід до та після проходження ударної хвилі, тобто необхідне знання ударної адіабати порід та ізентропи продуктів детонації ВР.

Поширення ударної хвилі за речовиною або сумішшю речовин, коли тиск ударного стиснення перевищує межі плинності кожної з компонент середовища, описується рівняннями гідродинаміки, що мають абсолютно загальне значення, безвідносно до агрегатного стану речовини. Іншими словами, стан твердої речовини, як і рідини, описується змінними тиску та об'єму, а не тензорами напружень і деформацій. Це дає змогу розглядати тверду речовину (або пористу суміш) як рідину, розраховуючи її характеристики та ударну адіабату, як для рідини. Тому, спираючись на метод динамічної стисливості речовини, що заснований на швидкості ударних хвиль і масовій швидкості частинок породи за фронтом ударної хвилі, а також згідно законам теорії пружності, необхідно встановити параметри ближньої зони руйнування масиву гірських порід свердловинним зарядом ВР з урахуванням ударної адіабати даної породи.

Мета досліджень. Метою дослідження є встановлення параметрів зони зминання при руйнуванні масиву гірських порід свердловинним зарядом ВР з урахуванням ударної адіабати даної породи.

Для досягнення поставленої мети вирішені наступні завдання:

- проведено математичне моделювання механізму утворення зони зминання в масиві гірських порід за ударною адіабатою породи навколо свердловини при її вибуховому навантаженні;
- встановлено закономірність утворення зони зминання за ударною адіабатою породи, яка формується навколо свердловини в масиві гірських порід під дією вибуху;
- проведено порівняння математичної моделі радіуса зони зминання, визначеного за ударною адіабатою породи, з отриманою раніше аналітичною моделлю, розрахованою за тиском продуктів вибуху у свердловині;
- виконано чисельне моделювання руйнування масиву гірських порід свердловинним зарядом ВР та встановлено параметри зони зминання залежно від діаметру свердловини, тиску на межі ВР-порода та фізико-механічних властивостей породного масиву;
- проведено порівняння параметрів радіуса зони зминання розрахованою за ударною адіабатою породи, з результатами чисельного моделювання руйнування масиву порід свердловинним зарядом.

Для розробки математичної моделі формування зони зминання за ударною адіабатою породи, навколо свердловини під дією вибуху, використовували метод динамічної стисливості речовини, що заснований на швидкості ударних хвиль і масовій швидкості частинок породи за фронтом ударної хвилі та загальновідомі закони теорії пружності. За зміною головних напружень стискання, для визначення параметрів зони зминання навколо свердловин при їх вибуховому навантаженні, проводили чисельне моделювання за допомогою методу скінченних елементів, у ліцензійному програмному продукті для інженерного аналізу SolidWorks Simulation.

Виклад основного матеріалу. Розрахунок тиску продуктів вибуху свердловинного заряду ВР на контакті з породою, проведемо з використанням простої схеми, що представлена на рис. 1 [26, 27].

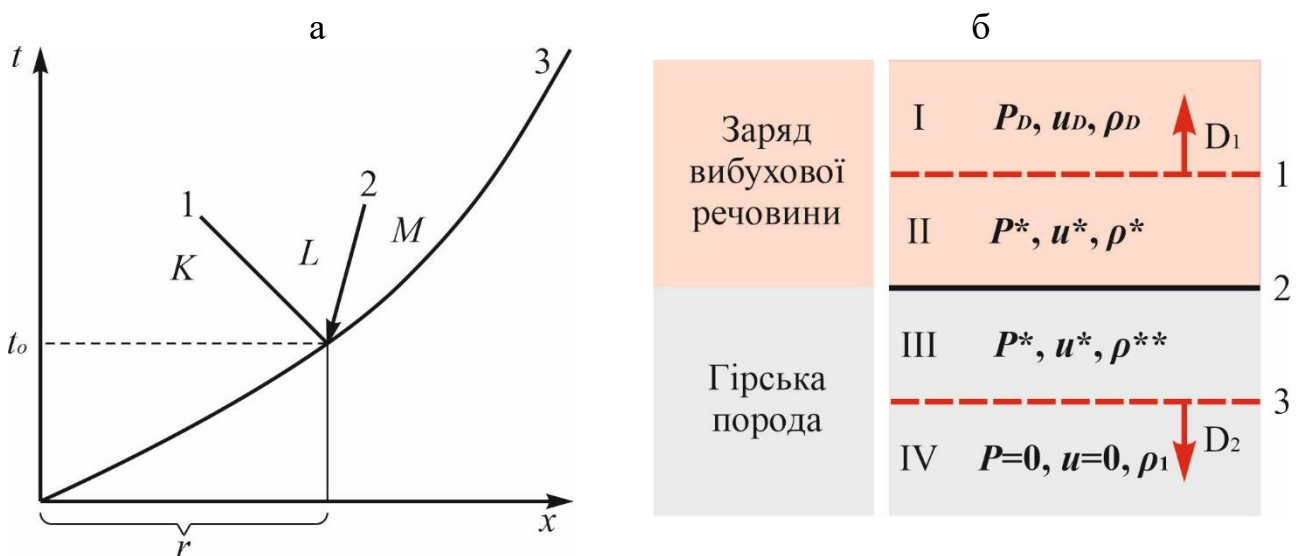


Рис. 1. Схема навантаження ударною хвилею стінки свердловини під час контактного вибуху: 1 – відбита ударна хвиля в продуктах вибуху; 2 – межа розділу ВР-порода; 3 – ударна хвиля в породі

Шар ВР має кінцеву товщину, що дорівнює радіусу (r) свердловинного заряду (див. рис. 1, а). За $t = 0$ детонаційна хвиля, що виникає біля осі заряду, являє собою циліндричний фронт, що розходиться, який у момент $t = t_0$ досягає стінки свердловини. За малої кривизни розбіжний фронт циліндричної детонаційної хвилі в момент удару по стінці свердловини можна вважати плоским. Розглянемо простий випадок поширення в породі одиночної ударної хвилі без урахування взаємодії її з різного роду дефектами, прояву інших можливих ефектів. Розглядається фізична система, в якій акустична жорсткість породи більша за акустичну жорсткість продуктів вибуху. Вплив розвантаження з вільної поверхні заряду в задачі не розглядається, оскільки заряд ВР вільної поверхні не має.

На рис. 1, а введено такі позначення: K – течія в цій ділянці є центрованою простою хвилею з постійною ентропією; L – ділянка взаємодії відбитої ударної хвилі в продуктах вибуху та центрованої хвилі розрідження; M – течія ізентропової простої хвилі. На рис. 1, б D_1 і D_2 відповідно швидкості поширення відбитої

ударної хвилі в продуктах вибуху та швидкість ударної хвилі в породі. Швидкість детонації заряду ВР дорівнює D . I – стан за фронтом детонаційної хвилі з тиском P_D , густиною ρ_D і масовою швидкістю частинок за фронтом хвилі u_D ; II – стан у продуктах вибуху за фронтом відбитої ударної хвилі від поверхні породи (межі розділу) з відповідними значеннями тиску P^* , масова швидкість частинок за фронтом ударної хвилі u^* та густина середовища за ударною хвилею, що поширюється від межі розділу ρ^* ; III – стан у породі за фронтом ударної хвилі, що відповідає тиску P^* , масовій швидкості частинок u^* і густині ρ^{**} ; IV – початковий стан породи, який відповідає початковим параметрам (тиску P , масовій швидкості частинок u і щільності ρ_1). Параметри потоку за детонаційною хвилею P_D , u_D , ρ_D і щільність породи ρ_1 відомі. Отже, у задачі необхідно визначити чисельні значення P^* , u^* , ρ^* , ρ^{**} .

Використаємо рівняння політропи продуктів вибуху в такому вигляді

$$P = \frac{D^2 \cdot k^2}{\rho_D^{k-1} \cdot (k+1)^{k+1}} \cdot \rho^{*k}, \quad (1)$$

де: k – показник політропи, який можна знайти з графіка, що подано на рис. 2.

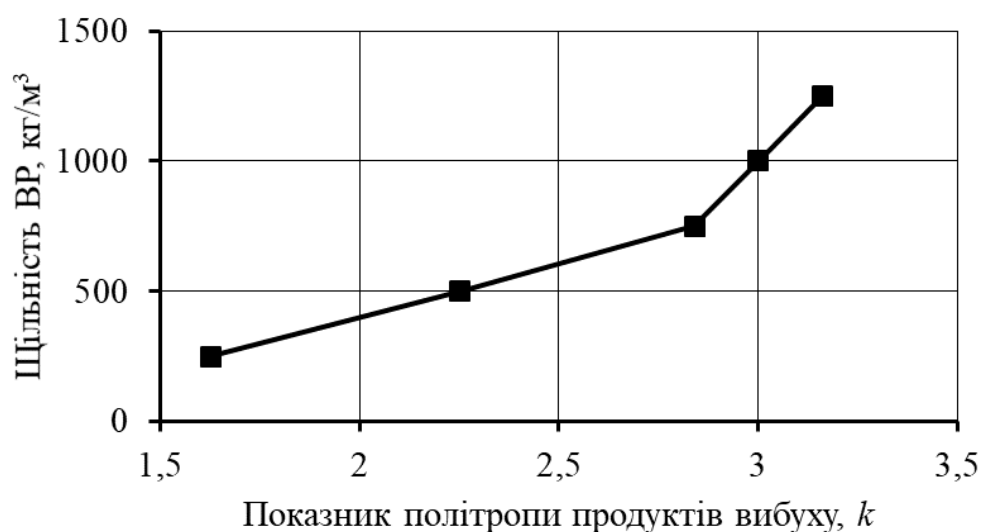


Рис. 2. Графік залежності значення політропи продуктів вибуху від густини ВР

Співвідношення на ударній хвилі 1 (у продуктах вибуху). Для визначення параметрів на відбитій ударній хвилі 1 використано такі співвідношення

$$\rho_D \cdot (D_1 + u_D) = \rho^* \cdot (D_1 + u^*); \quad (2)$$

$$P^* - P_D = \rho_D \cdot (D_1 + u_D)(u_D - u^*). \quad (3)$$

Співвідношення (2) і (3) містять три параметри, які необхідно визначити. Виключивши D_1 , отримаємо рівняння кривої в площині (P, u)

$$u_D - u^* = \left[(P^* - P_D) \cdot \left(\frac{1}{\rho_D} - \frac{1}{\rho^*} \right) \right]^{1/2}. \quad (4)$$

З урахуванням (1) рівняння (4) набуде такого вигляду

$$(u_D - u^*)^2 = \left(\frac{P^*}{P_D} - 1 \right) \cdot \left[1 - \left(\frac{P^*}{P_D} \right)^{1/k} \right] \cdot \left(\frac{P_D}{\rho_D} \right). \quad (5)$$

Вираз (5) є рівнянням ізентропи продуктів вибуху, що наведено на рис. 3. На ізентропі точка А відповідає умові Чепмена-Жуге.

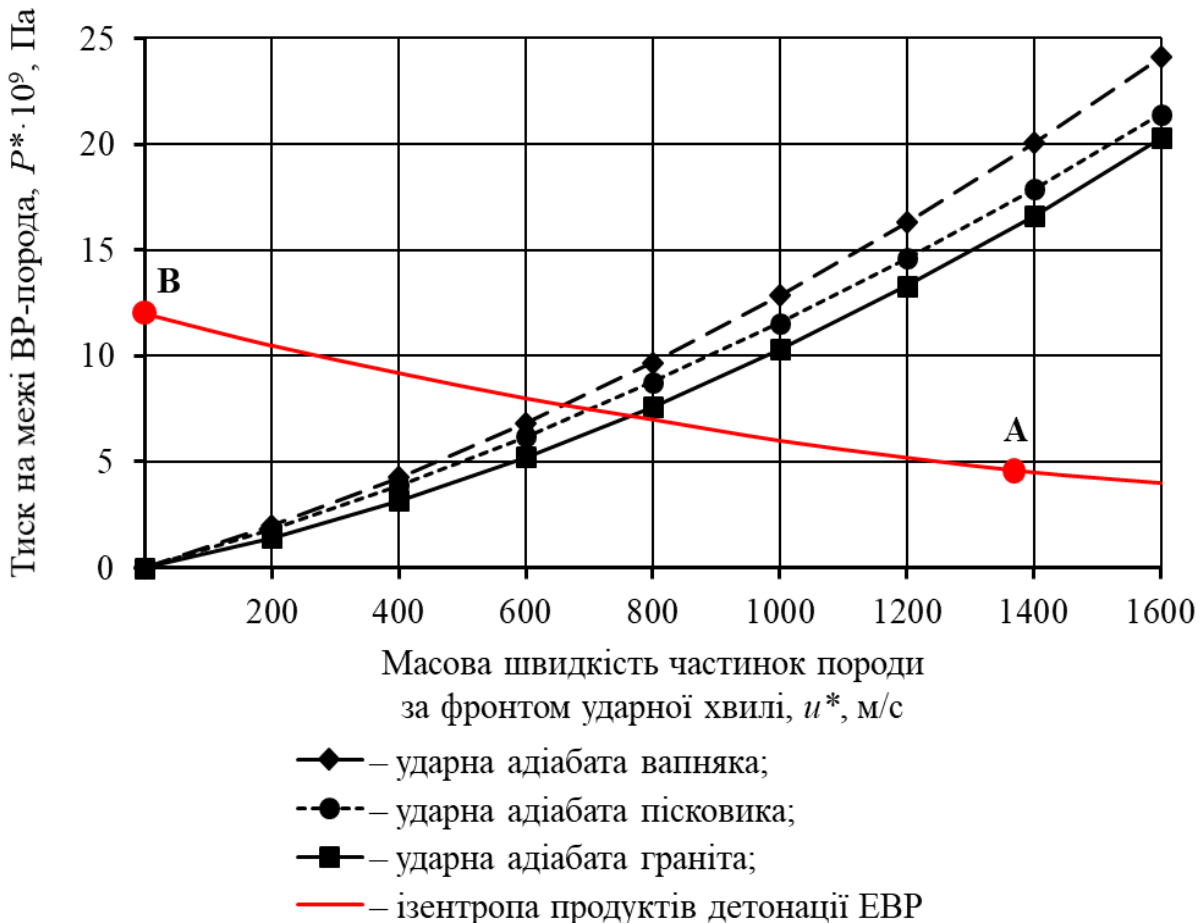


Рис. 3. Ударні адіабати гірських порід та ізентропа продуктів детонації емульсійної ВР (ЕВР)

Визначення параметрів на ударній хвилі 3 (у породі). Використаємо лінійну залежність швидкості ударної хвилі від масової швидкості частинок за фронтом її хвилі

$$D = a + b \cdot u, \quad (6)$$

де a і b – коефіцієнти.

Значення коефіцієнтів часто приймають такими, що наведені в роботах [12, 27, 28]. Однак для підвищення точності розрахунків необхідне експериментальне визначення коефіцієнтів a і b для порід кожного нового родовища і часто для нових горизонтів у межах одного родовища.

Співвідношення на фронті ударної хвилі мають вигляд

$$\rho_1 \cdot D_2 = \rho^{**} \cdot (D_2 - u^*); \quad (7)$$

$$P^* = \rho_1 \cdot D_2 \cdot u^*. \quad (8)$$

З урахуванням (6) ударну адіабату породи представимо залежністю у вигляді

$$P^* = \rho_1 \cdot (a + b \cdot u^*) \cdot u^*. \quad (9)$$

Значення масової швидкості u^* знайдемо спільним розв'язанням рівнянь (5) і (9)

$$(u_D - u^*)^2 = \left(\frac{\rho_1 \cdot (a + b \cdot u^*) \cdot u^*}{P_D} - 1 \right) \cdot \left[1 - \left(\frac{\rho_1 \cdot (a + b \cdot u^*) \cdot u^*}{P_D} \right)^{1/k} \right] \cdot \left(\frac{P_D}{\rho_D} \right). \quad (10)$$

Таким чином, розв'язуючи рівняння (7), (9) і (10), знаходимо значення P^* , u^* і ρ^* . Точка перетину на кожній з ударних адіабат (вапняку, пісковиків і граніту) з ізентропою (див. рис. 3) відповідають тиску та масовій швидкості на межі контакту заряду ВР з породою.

З рівнянь (1) і (9) знаходимо відповідно ρ^* і u^* . Тоді зі співвідношень на фронті ударної хвилі в породі (7) і (8) значення щільності породи можна знайти з такого виразу

$$\rho^{**} = \rho_1 \cdot \left(1 - \frac{\rho_1 \cdot u^{*2}}{P^*} \right)^{-1}. \quad (11)$$

Експериментальні значення коефіцієнтів у рівнянні (6) наведено в табл. 1. На графіку (див. рис. 3), зображено ударні адіабати порід та ізентропу продуктів вибуху.

Таблиця 1

Чисельні значення тиску і масової швидкості
в деяких середовищах залежно від марки ВР

Гірська порода	Щільність породи, кг/м ³	Коефіцієнти у рівнянні (6)		ВР	
		a , м/с	b	ρ , кг/м ³	D , м/с
Вапняк	2800	3266	1,32	1000	4200
Пісковик	2500	3400	1,22		
Граніт	2600	2435	1,525		

Тиск у точці В відповідає умові лобового зіткнення детонаційних хвиль ВР або зіткненню детонаційної хвилі з жорсткою стінкою. Точки перетину ізентропи з ударними адіабатами порід (див. рис. 3) відповідають тиску та масовій швидкості на межі ВР-порода. Якщо ж точки перетину ізентропи з будь-якими

матеріалами лежать нижче за точку Чепмена-Жуге, то це свідчить про те, що акустична жорсткість продуктів вибуху вища за акустичну жорсткість цих матеріалів.

Параметри зони зминання. Для встановлення величини радіусу зони зминання скористаємося методикою визначення напружень в товстостінних циліндрах, за умови дії у них внутрішнього тиску та коли циліндр має безкінечно велику товщину, тобто необмежене середовище [29]. Згідно з цією методикою

$$\sigma_r = -\frac{P_p \cdot r^2}{R_{зм}^2}; \quad (12)$$

$$\sigma_t = \frac{P_p \cdot r^2}{R_{зм}^2}. \quad (13)$$

де r – радіус зарядної порожнини (шпур або свердловина), м; P_p – тиск у зарядній порожнині, Н/м²; $R_{зм}$ – радіус зони зминання, м.

Для визначення еквівалентного напруження $\sigma_{екв}$ у об'ємному напруженому стані використана П'ята теорія міцності (Мора), що широко застосовується в розрахунках на міцність матеріалів, які мають різні значення меж міцності на розтягання та стискання [30].

Головні напруження

$$\sigma_1 = \sigma_t = \frac{P_p \cdot r^2}{R_{зм}^2}; \quad \sigma_2 = \sigma_o = 0; \quad \sigma_3 = \sigma_r = -\frac{P_p \cdot r^2}{R_{зм}^2}.$$

За П'ятою теорією міцності Мора, еквівалентне напруження дорівнює

$$\sigma_{екв} = \sigma_1 - \frac{\sigma_p}{\sigma_{см}} \sigma_3;$$

або

$$\sigma_{екв} = \frac{P_p \cdot r^2 \cdot \left(1 + \frac{\sigma_p}{\sigma_{см}}\right)}{R_{зм}^2}, \text{ Н/м}^2. \quad (14)$$

З рівняння (14) радіус зони зминання

$$R_{зм} = r \cdot \sqrt{\frac{P_p \cdot \left(1 + \frac{\sigma_p}{\sigma_{см}}\right)}{\sigma_{екв}}}, \text{ м.} \quad (15)$$

Враховавши умови всебічного стискання порід $\sigma_{екв} = \sigma_{см}$ та виконавши необхідні перетворення, отримуємо

$$R_{зм} = 0,5 \cdot d \cdot \sqrt{\frac{P_p \cdot \left(1 + \frac{\sigma_p}{\sigma_{см}}\right)}{\sigma_{см}}}, \text{ м}, \quad (16)$$

де d – діаметр зарядної порожнини, м; P_p – тиск у зарядній порожнині, Па; σ_p і $\sigma_{см}$ – відповідно межа міцності породи на розтягання та стискання, Па.

Замінивши у рівнянні (16) P_p на вираз (9) P^* остаточно отримуємо формулу розрахунку величини радіуса зони зминання

$$R_{зм} = 0,5 \cdot d \cdot \sqrt{\frac{\rho_1 \cdot (a + b \cdot u^*) \cdot u^* \cdot \left(1 + \frac{\sigma_p}{\sigma_{см}}\right)}{\sigma_{см}}}, \text{ м}. \quad (17)$$

де ρ_1 – щільність породи, кг/м³; u^* – масова швидкість частинок породи за фронтом ударної хвилі у точці перетину ізентропи продуктів детонації ВР та ударної адіабати породи (див. рис. 3), м/с.

Порівняння величини радіусу зони зминання, що отримано за результатами дослідження розробленої математичної моделі (17), зі значеннями, які розраховано за формулою, що подано в роботах [18, 19], необхідно для оцінки отриманої аналітичної моделі. Тому, метою порівняння є оцінка результатів дослідження розробленої математичної моделі радіусу зони зминання, що отримано за ударною адіабатою породи з раніше встановленою аналітичною моделлю, яку розроблено за тиском продуктів вибуху у зарядній порожнині (шпурі або свердловині) [18], що має вигляд

$$R_{зм} = 0,5 \cdot d \cdot \sqrt{1 + \frac{\rho \cdot D^2}{2 \cdot \sigma_{см}}}, \text{ м}, \quad (18)$$

де ρ – щільність або густина ВР, кг/м³.

Методика оцінки результатів дослідження математичної моделі радіуса зони зминання складається з таких етапів:

- формування вихідних даних для проведення оцінки математичної моделі радіуса зони зминання;
- виявлення закономірностей зміни радіусу зони зминання, залежно від гірничо-геологічних і гірничо-технічних умов проведення вибуху;
- оцінка результатів дослідження розробленої математичної моделі радіуса зони зминання та встановлення достовірності отриманих результатів з відомою аналітичною моделлю [18].

Вихідними даними для проведення оцінки математичної моделі радіуса зони зминання, що утворюються в масиві гірських порід навколо свердловини при її вибуховому навантаженні є: густина наливної ЕВР – 1000 кг/м³; швидкість детонації ЕВР – 4200 м/с; межа міцності порід на стискання вапняку – 60 МПа, пісковика – 80 МПа, граніту – 160 МПа; щільність вапняку – 2800 кг/м³, пісковика – 2500 кг/м³, граніту – 2600 кг/м³; масова швидкість частинок породи за

фронтом ударної хвилі (рис. 3) вапняку – 650 м/с, пісковика – 700 м/с, граніту – 775 м/с; коефіцієнти a і b приймаються за табл. 1; діаметр свердловини – 0,127 м, 0,152 м, 0,178 м, 0,203 м та 0,229 м. Розрахунок радіуса зони зминання виконували за формулами (17) і (18).

Як приклад розглянемо результати дослідження радіуса зони зминання, що утворюється в масиві гірських порід навколо свердловини при її вибуховому навантаженні, що подано в табл. 2.

Таблиця 2

Результати розрахунку радіуса зони зминання

Порода	Діаметр свердловини, м				
	0,127	0,152	0,178	0,203	0,229
	За формулою (17)				
Вапняк	0,74	0,89	1,04	1,19	1,34
Пісковик	0,64	0,77	0,90	1,03	1,16
Граніт	0,45	0,54	0,63	0,72	0,81
	За формулою (18)				
Вапняк	0,77	0,93	1,08	1,24	1,40
Пісковик	0,67	0,80	0,94	1,07	1,21
Граніт	0,48	0,57	0,67	0,76	0,86

Результати розрахунку радіуса зони зминання (див. табл. 2) за математичною моделлю, згідно з формулою (17), порівнювали з результатами розрахунку для крайових умов монолітного нетріщинуватого масиву порід, отриманих за формулою (18). Як видно з табл. 2, розбіжність аналітичних параметрів не перевищує 6%. Це вказує на високу достовірність отриманих результатів і придатність математичної моделі, за формулою (17), для проведення оцінки величини радіуса зони зминання за ударною адіабатою породи.

Отже, порівняння математичних моделей радіуса зони зминання, що утворюється в масиві гірських порід навколо свердловини при її вибуховому навантаженні, дозволило:

– за результатами дослідження математичних моделей радіуса зони зминання, що формується навколо свердловини встановити, що на величину радіуса істотно впливає діаметр свердловини, межа міцності порід на стискання та тиск на межі ВР-порода;

– порівняти результати дослідження математичної моделі радіуса зони за ударною адіабатою породи із аналітичною моделлю за тиском продуктів вибуху у свердловині, що була раніше отримана, та встановити розбіжність результатів розрахунку, які не перевищують 6%, що вказує на високу достовірність отриманих результатів і придатність аналітичної моделі, за формулою (17), для проведення оцінки величини радіусу зони зминання за ударною адіабатою породи.

Сьогодні одним з найбільш ефективних методів дослідження механізму вибухового руйнування гірських порід є використання чисельного моделювання

методом скінченних елементів (МСЕ) [31, 32], який є одним з найбільш розвинених методів моделювання явищ і процесів з максимальним наближенням до реальності [33]. Використання чисельного моделювання дозволяє вивчати процеси та явища, що в практичних умовах неможливо або економічно недоцільно досліджувати [34, 35]. Тому, для підтвердження достовірності отриманої аналітичної моделі розрахунку радіуса зони зминання за ударною адіабатою породи, проведено чисельне моделювання МСЕ, у ліцензійному програмному продукті системи інженерного аналізу SolidWorks Simulation. Метою чисельного моделювання є визначення радіуса зони зминання за головним напруженням стискання, внаслідок зміни напружено-деформованого стану масиву гірських порід під дією вибуху. Методика чисельного моделювання, за допомогою методу скінченних елементів, містила у собі виконання таких етапів:

- створення геометрії моделі;
- визначення фізико-механічних властивостей матеріалу моделі;
- встановлення вихідного навантаження, обмежень та сітки моделі;
- проведення обчислювального експерименту та обробка результатів.

Згідно з першим етапом моделювання створювали геометрію моделі. Для виключення впливу геометрії моделі на результати моделювання були прийняті такі її розміри: діаметр та висота – 20 м, глибина свердловини – 10 м, діаметр свердловини – 0,127 м, 0,152 м, 0,178 м, 0,203 м і 0,229 м.

У ролі вихідних даних матеріалу моделі будуть слугувати середні значення показників фізико-механічних властивостей порід, що подано у табл. 3.

Таблиця 3

Середні значення показників фізико-механічних властивостей порід

Найменування	Вапняк	Пісковик	Граніт
Модуль пружності, $\times 10^{10}$ Па	6	8	16
Коефіцієнт Пуассона	0,25	0,25	0,25
Модуль зсуву, $\times 10^{10}$ Па	2,4	3,2	6,5
Щільність, кг/м ³	2800	2500	2600
Межа міцності на розтягання, $\times 10^6$ Па	6	8	16
Межа міцності на стискання, $\times 10^6$ Па	60	80	160

Обчислювальний експеримент, з визначення зміни напружено-деформованого стану масиву порід навколо свердловини під дією вибуху, виконували у такій послідовності. Спочатку викреслювали геометрію моделі. У середовищі SolidWorks Simulation обирали новий статистичний аналіз. Потім приймали матеріал моделі з фізико-механічними властивостями, що наведено у табл. 3. У ролі критерію руйнування породи застосовували критерій Кулона-Мора. Після чого фіксувалась геометрія моделі, застосовувався тиск у свердловинах за всією їх довжиною, що визначається за формулою (9). Для виключення впливу величини недозаряду на результати експерименту його не враховували. Далі створювали сітку

моделі на підставі кривизни з високою її щільністю. Потім запускали обчислювальну програму для поточного дослідження. Далі за головними напруженнями стискання σ_3 встановлювали радіус зони змінання згідно умови $\sigma_3 \geq \sigma_{ст}$. Як приклад розглянуто відображення головного напруження стискання σ_3 моделі для вапняку, пісковика та граніту з межею міцності на стискання 60 МПа, 80 МПа і 160 МПа відповідно, при діаметрі зарядної порожнини 0,229 м, що подано на рис. 5.

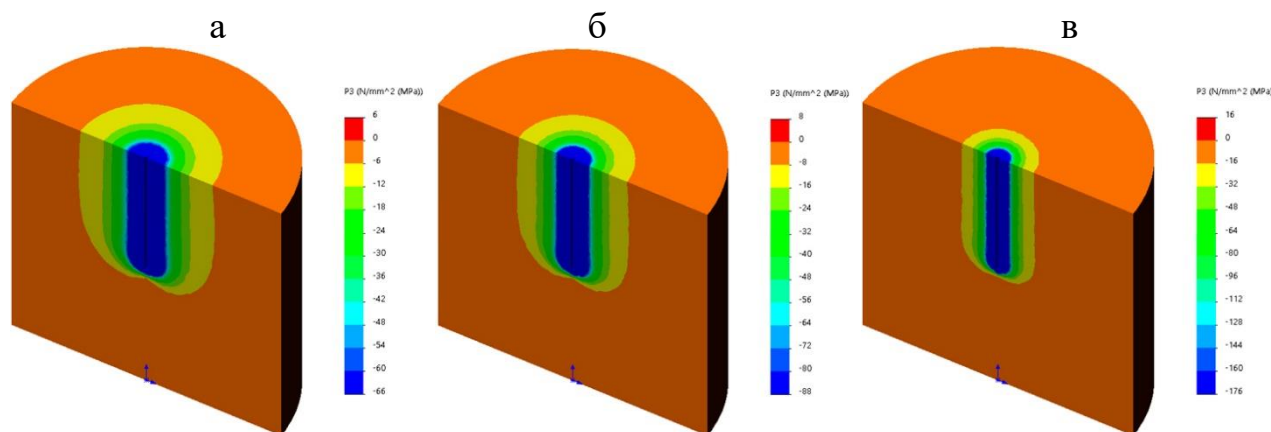


Рис. 5. Відображення головного напруження стискання σ_3 для вапняку (а), пісковика (б) і граніту (в) при діаметрі свердловини 0,229 м

Результати чисельного моделювання радіусу зони змінання, що формується в масиві гірських порід при підриванні свердловинного заряду ВР подано в табл. 4.

Таблиця 4

Результати чисельного моделювання радіусу зони змінання

Порода	Діаметр свердловини, м				
	0,127	0,152	0,178	0,203	0,229
Вапняк	0,76	0,91	1,06	1,21	1,36
Пісковик	0,66	0,78	0,92	1,05	1,19
Граніт	0,47	0,56	0,65	0,75	0,83

Порівнянням результатів аналітичних оцінок (див. табл. 2) з результатами чисельного моделювання (див. табл. 4) встановлено розбіжність параметрів, що не перевищує 5%. Це вказує на високу достовірність отриманих результатів і придатність формули (17) для проведення оцінки величини радіусу зони змінання за ударною адіабатою породи.

Висновки. Математичне моделювання механізму утворення зони змінання в масиві гірських порід за ударною адіабатою породи навколо свердловини при її вибуховому навантаженні дозволили:

– встановити умови утворення зони змінання з використанням ударної адіабати породи, яка формується навколо свердловини в масиві гірських порід при її вибуховому навантаженні, з урахуванням її діаметру, тиску і масової швидкості частинок породи на контакті заряду ВР з породою та меж міцності породи на розтягання-стискання;

– отримати залежність зони зминання, з якої випливає, що радіус ближньої зони вибуху, який буде утворений при підриванні свердловинного заряду ВР, прямо пропорційний діаметру свердловини та квадратному кореню від тиску на межі ВР-порода та зворотно пропорційний квадратному кореню від межі міцності породи на стискання;

– порівняти результати дослідження математичної моделі радіусу зони зминання, визначеного за ударною адіабатою породи, з отриманою раніше аналітичною моделлю, розрахованою на основі тиску продуктів вибуху у свердловині та встановити, що розбіжність між результатами розрахунків не перевищує 6%;

– порівняти результати аналітичних оцінок радіусу зони зминання з результатами чисельного моделювання, для жорстких крайових умов нетріщинуватого масиву та встановити розбіжність величини радіуса означеної зони, яка не перевищує 5%, що свідчить про високу достовірність отриманих результатів та підтверджує придатність аналітичної моделі, наведеної у формулі (17), для оцінки величини радіуса зони зминання за ударною адіабатою породи.

Перелік посилань

1. 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>
2. 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>
3. Efremov, E.I., Komir, V.M., Myachina, N.I., Nikiforova, V.A., Rodak, S.N., & Shelenok, V.V. (1980). Influence of the structure of a medium on fragment-size composition in blasting. *Soviet Mining Science*, 16(1), 18–22. <https://doi.org/10.1007/bf02504281>
4. Mosinets, V.N. (1966). Mechanism of rock breaking by blasting in relation to its fracturing and elastic constants. *Soviet Mining Science*, 2(5), 492–499. <https://doi.org/10.1007/bf02497640>
5. Drukovanyi, M.F., Komir, V.M., Myachina, N.I., Rodak, S.N., & Semenyuk, E.A. (1973). Effect of the charge diameter and type of explosive on the size of the overcrushing zone during an explosion. *Soviet Mining Science*, 9(5), 500–506. <https://doi.org/10.1007/bf02501378>
6. Krysin R.S., Novinskiy V.V. (2006). *Models of explosive crushing of rocks*.
7. Krysin, R.S. (1990). Effect of detonation product outflow on cavity cross-section. *Soviet Mining Science*, 26(6), 518–521. <https://doi.org/10.1007/bf02499448>
8. Sytenkov, V.N., & Kochetov, A.V. (2003). Forecast of dust/gas conditions in deep quarries. *Gornyi Zhurnal*, (8), 86–89.
9. Prokopenko, V.S. (2010). *Blasting rocks with borehole charges of explosives in sleeves*.
10. Прокопенко, В.С., & Туручко, І.І. (2010). Зниження степені переподрібнення флюсових вапняків при вибухах свердловинних зарядів в рукавах. *Вісник НТУУ «КПІ». Серія «Гірництво»*, (19), 63–70.
11. Adushkin, V.V., Budkov, A.M., & Kocharyan, G.G. (2007). Features of forming an explosive fracture zone in a hard rock mass. *Journal of Mining Science*, 43(3), 273–283. <https://doi.org/10.1007/s10913-007-0028-0>
12. Danilenko V.V. (2010). *Explosion: physics, engineering, technology*.
13. Borovikov, V.A., Artemov, V.A., Vanyagin, I.F., Ermolaev, I.Yu., Kozlov, E.N., & Kucheryavyy, V.F. (1985). Influence of an axial cavity in a cylindrical charge on stress wave parameters. *Soviet Mining Science*, 21(6), 505–510. <https://doi.org/10.1007/bf02499798>

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. Butyagin, P. Y. (1971). Kinetics and Nature of Mechanochemical Reactions. *Russian Chemical Reviews*, 40(11), 901–915. <https://doi.org/10.1070/rc1971v040n11abeh001982>
16. Butyagin, P.Y. (2006). *Chemical physics of solids*.
17. Sobolev, V.V., Hapiciev, S.V., Skobenko, O.V., Kulivar, V.V., & Kurliak, A.V. (2022). On the mechanism of ionization of atoms at f compression of a substance converging by front of the shock wave. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, (3), 57–66. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2022-3/057>
18. 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>
19. Kononenko, M., Khomenko, O., Sadovenko, I., Sobolev, V., Pazynich, Yu., & Smolinski, A. (2023). Managing the rock mass destruction under the explosion. *Journal of sustainable mining*, 22(3), 240–247. <https://doi.org/10.46873/2300-3960.1391>
20. Sobolev, V.V., Skobenko, O.V., Kononenko, M.M., Kulivar, V.V., & Kurlyak, A.V. (2023). Profiled detonation waves in the technologies of explosion treatment of metals. *Metallfizika i noveishie tekhnologii*, 45(11), 1349–1384. <https://doi.org/10.15407/mfint.45.11.1349>
21. Sobolev V.V., Shiman, L.N., Nalisko, N.N., & Kirichenko, A.L. (2017). Computational modeling in research of ignition mechanism of explosives by laser radiation. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, (6), 53–60.
22. Sobolev, V.V., Ustimenko, Ye.B., Nalisko, M.M., & Kovalenko, I.L. (2018). The macrokinetics parameters of the hydrocarbons combustion in the numerical calculation of accidental explosions in mines. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, (1), 89–98. <https://doi.org/10.29202/nvngu/2018-1/8>
23. Trunin, R.F. (1997). Comparison of the laboratory data on the compressibility of materials with the results obtained during underground nuclear explosions. *High Temperature*, 35(6), 888–895.
24. Trunin, R.F. (1994). Shock compressibility of condensed materials in strong shock waves generated by underground nuclear explosions. *Physics-Uspekhi*, 37(11), 1123–1145. <https://doi.org/10.1070/pu1994v037n11abeh000055>
25. Kanel', G.I., Fortov, V.E., & Razorenov, S.V. (2007). Shock waves in condensed-state physics. *Physics-Uspekhi*, 50(8), 771–791. <https://doi.org/10.1070/pu2007v050n08abeh006327>
26. Zeldovich, Ya.B., & Rayzer, Yu.P. (1963). *Physics of shock waves and high-temperature hydrodynamic phenomena*.
27. Baum, F.A., Orlenko, L.P., Stanyukovich, K.P., Chelyshev, V.P., & Shekhter, B.I. (1975). *Physics of Explosion*.
28. Al'tshuler, L. V., Il'kaev, R. I., & Fortov, V. E. (2021). Use of powerful shock and detonation waves to study extreme states of matter. *Physics-Uspekhi*, 64(11), 1167–1179. <https://doi.org/10.3367/ufne.2021.09.039092>
29. Belyaev N.M. (1962). *Resistance of materials*.
30. Гребенніков, М.М., Мірошніков В.Ю., & Пекельний М.І. (2022). *Теорії міцності. Складний онір*.
31. Babets, D., Sdvyzhkova, O., Hapiciev, S., Shashenko, O., & Vasyl, V. (2023). Multifactorial analysis of a gateroad stability at goaf interface during longwall coal mining – A case study. *Mining of Mineral Deposits*, 17(2), 9–19. <https://doi.org/10.33271/mining17.02.009>
32. Lapčević, V., Torbica, S., Stojanović, M., & Vojinović, I. (2023). Development and Validation of Universal 3D Blast Fragmentation Model. *Applied Sciences*, 13(14), 8316. <https://doi.org/10.3390/app13148316>

33. Moldabayev, S. K., Sdvyzhkova, O. O., Babets, D. V., Kovrov, O. S., & Adil, T. K. (2021). Numerical simulation of the open pit stability based on probabilistic approach. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, (6), 29–34. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2021-6/029>
34. Aitkazinova, S., Sdvyzhkova, O., Imansakipova, N., Babets, D., & Klymenko, D. (2022). Mathematical modeling the quarry wall stability under conditions of heavily jointed rocks. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 6, 18–24. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2022-6/018>
35. Kononenko, M., Khomenko, O., Kosenko, A., Myronova, I., Bash, V., & Pazynich, Y. (2024). Raises advance using emulsion explosives. *E3S Web of Conferences*, 526, 01010. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202452601010>

ABSTRACT

Purpose. Setting the parameters of the crush zone during the destruction of a rock mass by a borehole charge of explosives, taking into account the shock adiabat of a given rock.

The methodology of research. The calculation methodology of shock-wave parameters of rocks taking into account shock adiabats and the laws of elasticity theory was used, analytical simulation of the parameters of formation of the crush zone of the rock mass around the borehole under explosive loading was carried out. Numerical simulation of the crush zone by the finite element method was carried out for the change in the stress-strain state of the mass under the action of the explosion. To establish the suitability of the obtained analytical model for calculating the radius of the specified zone, a comparison of the results of analytical and numerical simulation was carried out.

Findings. An analytical model of the radius of the crush zone formed in the rock mass during blasting of a borehole charge has been developed based on the shock adiabat of the rock, taking into account the borehole diameter, the pressure value and the mass velocity of rock particles at the contact of the explosive with the rock and its tensile-compressive strength limits. A comparison of the results of the study of the mathematical model of the radius of the crush zone based on the shock adiabat of the rock with the previously obtained analytical model calculated based on the pressure of the explosion products revealed a discrepancy of no more than 6 %. A comparison of the results of analytical estimates of the radius of the crush zone with the results of numerical modeling revealed a discrepancy in the radius of the specified zone within 5 %.

The originality. The radius of the crush zone formed in the rock mass during blasting of a borehole charge changes according to a power law dependence on the borehole diameter, pressure and mass velocity of rock particles at the contact of the explosive with the rock and the tensile-compressive strength limits of the rock, which allows us to estimate the parameters of destruction of the rock mass in the nearby blast zone.

Practical implications. The mathematical model of the radius of the crush zone along the shock adiabat of the rock formed in the rock mass around the borehole under the action of the explosion determines the parameters of the destruction of the rock mass in the nearby explosion zone.

Keywords: rock mass, borehole, explosive, rock shock adiabat, crush zone.

дата першого надходження статті до видання	03.07.2025
дата прийняття до друку статті після рецензування	04.08.2025
дата публікації (оприлюднення)	05.09.2025