

РОЗРОБКА КОРИСНИХ КОПАЛИН

УДК 622.235

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.5.1/21>**Ищенко К.С.**Інститут геотехнічної механіки імені М.С. Полякова
Національної академії наук України**Новіков Л.А.**Інститут геотехнічної механіки імені М.С. Полякова
Національної академії наук України**Коновал В.М.**

Черкаський державний технологічний університет

Пономаренко І.О.

Черкаський державний технологічний університет

Мазур О.М.

Приватне акціонерне товариство «Украгровибухпром»

Демченко О.В.

Черкаський державний технологічний університет

АНАЛІТИЧНІ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ПІДХОДИ ДО ОЦІНКИ ДІЇ ВИБУХУ В МАСИВІ КРИСТАЛІЧНИХ ГІРСЬКИХ ПОРІД

У роботі розглянуто аналітичні і експериментальні дослідження впливу конструкцій зарядів вибухової речовини різної форми поперечного перерізу при дії вибуху в масиві кристалічних гірських порід складної будови по діаметру середнього куску. Було проведено експериментальні дослідження в лабораторних та полігонних умовах кар'єрів по встановленню характеру руйнування зразків граніту вибухом зарядів різної форми поперечного перерізу, розробці математичної моделі розрахунку по обґрунтуванню виходу фракцій дроблення за діаметром середнього куску згідно закону Розіна – Раммлера. Встановлено, що при вибуховому руйнуванні гранітних моделей рівномірність дроблення забезпечується використанням зарядів різної форми перерізу, а саме: змінного перерізу по колонці заряду та у вигляді квадратної призми. Проведені дослідження в промислових умовах кар'єру ТОВ «Уманський гранітний кар'єр» по оцінці розподілу гранулометричного складу зруйнованої гірничої маси після масового вибуху з використанням зарядів різної форми перерізу шляхом сегментації зображень фрагментів зразків порід з використанням моделі U-CARFnet і U-Net. Проведена порівняльна оцінка запропонованої моделі з традиційними методами сегментації зображень, емпіричним шляхом виведена формула для розрахунку діаметра середнього куску, яка враховує всі фактори при яких руйнується гірська порода, що підтверджує велику збіжність закону Розіна – Раммлера. Якість відбитої вибухом породи на уступі кар'єру оцінювали по діаметру середнього куску з використанням методів U-CARFnet та WipFrag, які обробляли за допомогою комп'ютерної програми. Використання коригованих параметрів буропідривних робіт з використанням комбінованих конструкцій зарядів вибухової речовини різної форми поперечного перерізу дозволило зменшити діаметр середнього куска відбитої гірської маси та знизити витрати вибухової речовини. При цьому вихід кондиційного куска збільшився, що забезпечило рівномірність дроблення відбитої гірської маси.

Ключові слова: тверде середовище, зарядна порожнина, вибухова речовина, вибухове руйнування, хвиля напружень.

© Іщенко К.С., Новіков Л.А., Коновал В.М.,
Пономаренко І.О., Мазур О.М., Демченко О.В., 2025
Стаття поширюється на умовах ліцензії CC BY 4.0

Постановка проблеми. Збільшення вимог до інфраструктурних об'єктів в урбанізованих агломераціях великих міст являє собою будівництво високоякісних автомагістралей, пасажирських та вантажних перевезень залізницями, міського метрополітену, які швидко розширюються та будуються, можуть бути реалізовані застосуванням сучасної буропідривної технології. Вона стала поширеним методом при будівництві таких об'єктів завдяки відпрацьованій технології, простоті освоєння та низькій вартості. Однак, якщо при підготовці буропідривних робіт не будуть враховані і точно проаналізовані геологічні умови масиву гірських порід, це може призвести до неякісних результатів вибухових робіт, до нерівних контурів уступу кар'єру, підготовчої виробки (тунелю), формуванню заколів і навісів та нерівномірності дроблення гірських порід. Якість відбитої гірничої маси, а саме – діаметр середнього куску – є найбільш поширеним показником ефективності вибухових робіт, що може значно вплинути на продуктивність роботи транспортного обладнання (екскаватора) при її екскавації та безпеці гірничих робіт. Тому швидка та точна оцінка якості вибуху має вирішальне значення для подальшої розробки плану ведення гірничих робіт, обґрунтування параметрів буропідривних робіт, вибору сучасного обладнання та порядок виконання технологічних процесів. Ефективність буро вибухових робіт всебічно оцінюється за первинними показниками, таким як безпека, якість та економічні переваги в процесі підривання і вторинним показниками, таким як розмір відбитої гірничої маси. А через те, що при оцінці якості відбитої гірської маси в даний час використовуються сучасні цифрові фото відеокамери з високою роздільною здатністю отриманих знімків розвалу відбитої вибухом гірської маси, сучасних аналітичних методів щодо обґрунтування виходу середнього куску відбитої вибухом гірської маси є актуальним науково-прикладним завданням.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Рациональний розподіл фрагментів вибуху за розмірами та відсотковий вміст відбитої гірничої маси є найважливішими показниками при оцінюванні ефективності вибухових робіт на кар'єрах. Точність статистичного аналізу фрагментів відбитої гірничої маси життєво важлива для гірничодобувного виробництва та проектування вибухових робіт. В даний час на більшості кар'єрів розмір фрагментів відбитої гірничої маси визначається шляхом ручного виміру з оцінкою їх неозброєним оком. Через висоту уступу куски породи, що утво-

рюються при масовому вибуху, можуть покрити велику площу. Ручна оцінка розподілу фрагментів відбитої гірської маси вибухом трудомістка, неефективна і неточна. Однак за тривалих вимірів фрагментів відбитої гірської маси вибухом існують серйозні потенційні загрози безпеці.

В результаті швидкого розвитку комп'ютерного програмного забезпечення в сучасних технологіях обробки експериментальних даних – технологіях обробки зображень, досягла значних успіхів і в даний час широко застосовується, як в гірничій справі [1], так і в різних галузях, з використанням порогової сегментації зображень відбитої гірської маси [2]. Також використано інші модифіковані методи [3, 4]. В результаті точну інформацію про зображення неможливо отримати з використанням згаданих підходів до обробки зображень, тому важко надати точні дані для подальшого розпізнавання зображень. У роботі [5] вперше запропоновано мережу U-Net зі структурою кодер-декодер з невеликою кількістю осередків. Цю технологію успішно використовували у суміжних галузях знань [6-8]. У роботі [9] запропоновано метод сегментації гірської породи з використанням кумулятивних кривих розподілу гранулометричного складу та застосували його для позиціонування та розпізнавання фрагментів гірської породи у кількох варіантах. Тим часом традиційна модель, розроблена на основі запропонованого методу перетворення U-Net враховує невраховані втрати отриманої інформації під час сегментації зображень відбитої вибухом гірської породи. У роботі [10] запропоновано модель RDU-Net для визначення розміру фрагментів відбитої вибухом гірської породи під час транспортування її на конвеєрній стрічці. Інші підходи щодо фрагментації (класифікації) відбитої вибухом гірської породи запропоновано у роботах [11-13], де наведено моделювання процесів грохочення з подвійним віброударним збудженням для поділу по крупності мінеральної сировини, яка важко класифікується. Застосування запропонованого методу дозволило знизити граничну крупність переробленої зволоженої сировини до 0,05-0,1 мм. Дослідженнями доведено, що в оцінці сегментації зображень розвалу гірської породи запропонована модель DUNet перевершувала за ефективністю модель U-Net. У роботі [14] розроблено швидкодійну мережу U-Net, що дозволяє виконувати дослідження по виявленню та сегментації зелених котунів залізної руди на зображеннях. Для оцінки гранулометричного складу руди запропонували модель VGG16 [15]. Робота [16] присвячена сег-

ментації родовищ залізної руди з використанням зображень високого рівня, які отримані шляхом дистанційного зондування на основі Res-U-Net. У роботі [17] представлена модель U-Net для розширеного дослідження (точності) сегментації зображень. Покращена модель U-Net для сегментації зображень кусків гірської породи з VGG-16 в якості кодера наведена у роботі [18]. У роботі [19] запропоновано ефективна модель сегментації, яка заснована на адгезії та перекритті простору між кусками гірської породи на відвалі. Дослідження також було розширено за рахунок включення семантичної сегментації зображень під час дослідження шліфів під мікроскопом. У роботі [20] наведено результати досліджень щодо семантичної сегментації прозорих та непрозорих мінералів з епоксидної смоли на мікрофотографіях шліфів у відбитому світлі з використанням моделі DeepLabv3+. У роботі [21] проведено аналіз розподілу частинок за розмірами фрагментованої породи на основі сегментації супер піксельного зображення. У роботі [22] здійснено порівняння продуктивності двох типів алгоритмів сегментації: Mask R-CNN і SOLO v2. Це дозволяє подолати обмеження на тонких зрізах шліфів, отже, прискорити ідентифікацію межі між зернами з наступною класифікацією мінералів. Багато досліджень з оцінки якості відбійки гірських порід у промислових умовах були проведені вченими за допомогою аналізу розпізнавання зображень. Крім того, було розроблено систему взаємодії людини та комп'ютера для підвищення точності розпізнавання, прискорення швидкості розпізнавання та досягнення калібрування в реальному часі [23-26] та фотограмметричну систему, засновану на зіставленні зображень фрагментації відбитої гірської маси [27-28]. Більшість існуючих методів використовувалися для отримання розподілу фрагментації тріщинуватої породи шляхом отримання характеристик структури зображення. Дослідники в основному використовували моделі Гаусової мережі [29], коефіцієнти перетворення Фур'є, локальні бінарні моди та фільтри Габора [30] для отримання даних про розподіл розмірів фрагментації тріщинуватих порід. У роботі [31] наведено модель нейронної мережі на основі комп'ютерного моделювання сегментації та обробки тріщинуватої породи. Численні дослідники намагалися вирішити вищезгадані проблеми з допомогою різних алгоритмів. У роботі [32] використовується алгоритм ACE + CLANE для обробки зображень розміру відбитих вибухів гірських порід у тунелях. У роботі [33] використо-

вується кластерний аналіз методів комп'ютерного моделювання для сегментації обробки зображень пористих середовищ. У роботі [34] запропоновано метод бінаризації Phansalkar і метод маркування вихідних точок водорозділу. Останній метод дозволяє точно визначати розмір кусків гірських порід. Обмежуючим фактором у методах вимірювання кусків гірських порід є їх швидкість, оскільки повільніші процеси вимірювання можуть вплинути на загальну роботу гірничодобувних підприємств [35]. Розробка програмного забезпечення для аналізу результатів вибухових робіт дозволяє оцінювати ефективність вибуху на основі ключових показників, таких, як гістограма блоковості гірських порід, що відбиваються вибухом, кумулятивна крива розподілу гранулометричного складу, а також аналітичні методи по обґрунтуванню діаметру середнього куску, такий як закон Розіна – Раммлера. Це дозволяє швидко виявляти та ідентифікувати зруйновану вибухом гірничу масу, забезпечуючи технічну підтримку для оптимізації параметрів вибухових робіт. З рештою, цей підхід спрямований на зниження витрат на будівництво та підвищення ефективності вибухових робіт у вирішенні інженерних завдань. Комплексний підхід по сегментації зображень може вирішити труднощі з отриманням інформації про фрагментацію гірничої маси, відбитої вибухом у кар'єрах та забезпечити їх ефективність для прогнозування розподілу (фрагментації) гранулометричного складу гірничої маси відбитої вибухом для обґрунтування (оптимізації) раціональних параметрів вибухових робіт. Одним із недоліків робіт, присвячених обґрунтуванню раціональних параметрів буропідричних робіт по оцінці якості руйнування масиву кристалічних гірських порід є не врахування структури порід, її тріщинуватість і напрямок розповсюдження в масиві які впливають на характер розподілу гранулометричного складу та його фрагментацію на уступі при руйнуванні їх вибухом. Тому в нашій роботі перевага надається експериментальним дослідженням з підкріпленням їх результатами чисельних розрахунків.

Невирішена раніше частина проблеми. В даний час не існує універсального комплексного підходу (теоретичний та експериментальний), який включає: вибір конструкції заряду і типу вибухової речовини; ініціювання зарядів вибухової речовини з урахуванням характеристик масиву порід, що руйнуються, з подальшим отриманням інформації про фрагментацію гірничої маси шляхом сегментації зображень розвалу

гірничої маси на уступі кар'єру. Врахування цих факторів може вирішити труднощі для прогнозування розподілу (фрагментації) гранулометричного складу гірничої маси відбитої вибухом для обґрунтування (оптимізації) раціональних параметрів вибухових робіт.

Робота виконується відповідно до комплексної програми Національної академії наук України з розробки безвідходних технологій видобування корисних копалин відкритим способом «Наукове обґрунтування розвитку безвідходних технологій видобування корисних копалин відкритим способом зі зменшенням їх шкідливого впливу на навколишнє середовище» (№ ДР 0120U101113)

Метою статті є аналітичні і експериментальні дослідження впливу конструкцій зарядів вибухової речовини різної форми поперечного перерізу при дії вибуху в масиві кристалічних гірських порід складної будови для обґрунтування розподілу (фрагментації) гранулометричного складу гірничої маси по діаметру середнього куску.

Наведені у роботі результати досліджень виконано з використанням методів фізичного моделювання вибухового руйнування гірських порід в лабораторних та промислових умовах. Оцінку якості гранулометричного складу гірничої маси виконано шляхом сегментації зображень фрагментів зразків порід з використанням моделі U-CARFnet і U-Net, а по діаметру середнього куску – методами U-CARFnet та WipFrag з обробкою зображень за допомогою комп'ютерної програми та закону Розіна – Раммлера. Результати обробки даних гранулометричного складу представляють у вигляді кривої розподілу, гістограми і даних гранулометричного складу по класам.

Розробка моделі аналітичного обґрунтування гранулометричного розподілу підірваної вибухом кристалічної гірської породи складної будови з використанням закону Розіна – Раммлера, отримання формули для розрахунку середнього діаметра відбитої гірничої маси та обґрунтування в промислових умовах раціональних параметрів комбінованих зарядів ВР різної форми поперечного перерізу.

Виклад основного матеріалу. Теоретична частина. Для аналітичного обґрунтування гранулометричного розподілу підірваної вибухом кристалічної гірської породи складної будови була запропонована формула згідно закону Розіна – Раммлера [36].

$$R = \frac{V(x)}{V_0} = \exp \left[- \left(\frac{x}{x_0} \right)^n \right], \quad (1)$$

де V – загальний об'єм відбитої гірничої маси, m^3 ; $V(x)$ – об'єм усіх фракцій, лінійний розмір яких більше x , x_0 , m^3 ; n – параметр розподілу.

З урахуванням (1) функція розподілу (сумарний відносний об'єм фракцій, довжина яких не перевищує x) має вигляд

$$\Phi(x) = 1 - R(x) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{x}{x_0} \right)^n \right]. \quad (2)$$

Вірогідність того, що розмір фракцій лежить у діапазоні $(x, x+dx)$ тоді можна розрахувати за формулою

$$dp = \Phi'(x)dx = \frac{n}{x_0} \left(\frac{x}{x_0} \right)^{n-1} \exp \left[- \left(\frac{x}{x_0} \right)^n \right]. \quad (3)$$

Тоді кількість кусків в цьому діапазоні визначається за формулою

$$dm = \frac{V_0}{m} dp, \quad (4)$$

де V_0 – середній об'єм куску, який має розміри в діапазоні $(x, x+dx)$, m^3 .

Ввівши таким чином поняття вірогідності співпадає з загальноприйнятим в гірничій справі визначення розподілу гранулометричного складу, а саме

$$dp = \frac{Vdm}{V_0} = \frac{dV}{V_0},$$

або в кінцевих величинах

$$\Delta p_i = \frac{\Delta V_i}{V_0}, \quad (5)$$

де ΔV_i – об'єм фракції, m^3 .

Таким чином, вірогідність того, що кусок має розмір, який лежить в діапазоні від x_i до $x_i + \Delta x_i$, тобто це відносний склад даної фракції. Тоді середній діаметр куску в експериментах можна визначити таким чином

$$\langle x \rangle = \sum_{i=1}^k x_i \frac{\Delta V_i}{V_0}, \quad (6)$$

де k – число груп фракцій.

В нашому випадку маємо

$$\langle x \rangle = \int_0^{\infty} x dp. \quad (7)$$

Тоді підставляючи в формулу (7) рівняння (3) і проводячи інтегрування, отримаємо

$$\langle x \rangle = x_0 \Gamma \left(1 + \frac{1}{n} \right), \quad (8)$$

де $\Gamma \left(1 + \frac{1}{n} \right) = \int_0^{\infty} e^{-t} t^{\frac{1}{n}} dt$ – гама функція

Тоді дисперсія величини x має вигляд

$$D = \int_0^{\infty} (x - \langle x \rangle)^2 dp = \langle x \rangle^2 \left[\frac{1 + \frac{2}{n}}{\Gamma\left(1 + \frac{1}{n}\right)} - 1 \right]. \quad (9)$$

З формули (9) випливає, що $n > 1$. Тоді для показника, що характеризує середній діаметр, можна записати

$$d_{cp} \approx \frac{x_0^2}{n}. \quad (10)$$

Припустимо, що отримані після вибуху куски породи з характерним розміром геометрично однакові. Тоді для площі поверхні та об'єму кусків можна записати:

$$S = K_s x^2;$$

$$V = K_v x^3,$$

де K_s, K_v – постійні коефіцієнти.

Загальну поверхню всіх кусків можна розрахувати за формулою

$$S = \int_0^{\infty} S dm = V_0 \frac{K_s}{K_v} \int_0^{\infty} \frac{dp}{x} = \frac{V_0}{x_0} \frac{K_s}{K_v} \Gamma\left(1 - \frac{1}{n}\right).$$

Очевидно, що теоретично розрахований оптимальний варіант дроблення є руйнування всього об'єму на однакові куски розміром $< x >$. Тоді поверхня всіх кусків визначається за формулою

$$\langle S \rangle = \frac{V_0}{\langle x \rangle} \frac{K_s}{K_v}.$$

Тоді відносну долю додатково створеної поверхні можна визначити за формулою

$$\frac{\Delta S}{\langle S \rangle} = \frac{S - \langle S \rangle}{\langle S \rangle} = \Gamma\left(1 + \frac{1}{n}\right) \Gamma\left(1 - \frac{1}{n}\right) - 1. \quad (11)$$

Таким чином при $n = 1$ з формули (2) отримаємо класичний закон Пуассона. При $\Gamma(0) \rightarrow \infty$ в формулі (11) сумарна поверхня відбитих кусків породи нескінченно велика.

Експериментальна частина. Для підтвердження закону Розіна – Раммлера по обґрунтуванню діаметра середнього куска відбитої гірничої маси в ІГТМ НАН України разом з Черкаським державним технологічним університетом МОН України були проведено експериментальні дослідження процесу вибухового руйнування твердого середовища на моделях в лабораторних і полігонних умовах.

Для обґрунтування конструкцій зарядів вибухової речовини та їх параметрів з метою їх

подальшого використання в промислових умовах, обрано метод фізичного моделювання процесів руйнування твердого середовища на моделях. В якості моделюючого матеріалу обрана модель кубічної форми з розміром бокової грані рівному 150 мм. Моделі виготовляли із гранітних штуфів, відібраних у кар'єрі ТОВ «Уманський гранітний кар'єр» (Звірківське родовище гранітів, Черкаська область) в зоні без впливу вибухових робіт. Штуфи із яких виготовляли моделі представлені сірими і рожевими дрібнозернистими гранітами середньої тріщинуватості міцністю $f = 12-16$ балів за шкалою проф. М. М. Протод'яконова.

У підготовлених моделях в центрі однієї з граней свердлили зарядну порожнину довжиною 105 мм і діаметром від 6 до 8 мм, яка імітує шпур. В підготовлених зарядних порожнинах формували заряди різної форми поперечного перерізу (циліндричні, у вигляді трикутної та квадратної призми) (рис. 1).

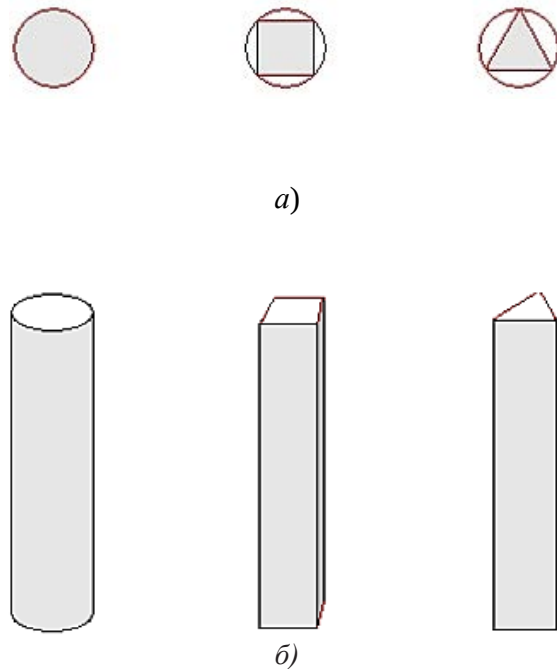


Рис. 1. Конструкції зарядів вибухової речовини з різною формою поперечного перерізу (а) та вид стовпа заряду (б)

У зарядну порожнину в якості вибухової речовини поміщали суміш тєну (80%) і твердого ракетного палива (20%) [37]. Маса заряду вибухової композиції складала 500 мг. Устя порожнини герметизували піщаною набивкою з розміром фракції 0.25 мм.

Гранітна модель встановлювалась у вибухову камеру, де проводився підрив заряду вибухової речовини з використанням електронного пристрою [38]. Далі зруйновані зразки моделі вийма-

лись із вибухової камери з подальшим їх розсіюванням на аналізаторі ситовому А30 зі стандартним набором сит. Отримані значення розподілу гранулометричного складу зруйнованих моделей передавались на ноутбук для їх подальшої обробки з використанням закону Розіна – Раммлера.

Особливий інтерес представляли дослідження в промислових умовах кар'єру ТОВ «Уманський гранітний кар'єр», де розташоване Звірківське родовище гранітів. В якості об'єкту досліджень обрано масиви міцних гірських порід складної будови при руйнуванні яких проведено обґрунтування конструкцій зарядів різної форми поперечного перерізу (рис. 1).

На основі геологічних досліджень оголених блоків гірських порід на уступі кар'єру було виявлено, що вони представлені сірими і рожевими дрібнозернистими гранітами середньої тріщинуватості міцністю $f = 12-16$ балів за шкалою проф. М. М. Протод'яконова. Рівень води у пробурених свердловинах досягає від 1,0 до 2,0 м при середній обводненості масиву 15-20%. Вибухові роботи у кар'єрі проводить ПрАТ «Укграгровибухпром».

Встановлення основних характеристик тріщинуватості гранітного масиву в межах гірничого відводу кар'єру (рис. 2) здійснювалось згідно методики і «Методичних рекомендацій по обґрунтуванню раціональних параметрів буропідричних робіт...» [39], які розроблені в ІГТМ НАН України спільно з Черкаським ДТУ. Була проведена стереофотозйомка оголених порід на горизонті, прийнятому для промислових випробувань раціональних параметрів буропідричних робіт розроблених способів вибухового руйнування гірських порід складної будови [40-43] (блок №1, гор. +108 м.) з наступним дешифруванням фотознімків поверхні уступу кар'єру.

Після обробки даних отримані усереднені параметри основних систем тріщин на кар'єрі (табл. 1).

Для оцінки впливу визначених основних параметрів систем тріщин на характер вибухового руй-

нування анізотропного масиву, вздовж лінії вибою були пробурені і підірвані шпури діаметром від 36 до 43 мм і глибиною від 1 до 1.5 м. В якості вибухової речовини використовували патронований Анемікс-70.

По визначеним параметрам великої a і малої b осі воронки викиду, а також її орієнтації був розрахований коефіцієнт анізотропії $K = a/b$ згідно «Методичних рекомендацій по обґрунтуванню раціональних параметрів буропідричних робіт» [39]. Величина коефіцієнту склала 1.16. З урахуванням величини коефіцієнту K були скореговані параметри сітки свердловин на експериментальній ділянці блоку, яка склала 3.5×3.5 м.

Відповідно до змінених параметрів сітки свердловин, а також з урахуванням виявлених на одному з експериментальних блоків зон підвищеної тріщинуватості (орієнтованих ортогональної лінії вибою), в масиві на уступі блоку висотою 18 м бурили свердловини діаметром 110 мм і глибиною 16 м (згідно з паспортом буропідричних робіт). При цьому довжина свердловинного заряду становила 13 м, а довжина набивки склала 3 м.

Під час випробувань блоки, які підлягають руйнуванню ділилися на експериментальні та контрольні ділянки. На контрольних ділянках зарядження свердловин, пробурених по сітці 3×3 м, проводилося звичайним способом з формуванням свердловинних зарядів суцільної конструкції. На експериментальних ділянках зарядження свердловин здійснювалось за сіткою 3.5×3.5 м з формуванням комбінованих свердловинних зарядів змінного перерізу в зоні монолітних порід. На межі блоку з тильної його частини свердловинні заряди чергувалися між собою і мали форму трикутної та квадратної призм (рис. 4).

Послідовність зарядки свердловин на уступі блоку здійснюється у наступній послідовності [44].

Таблиця 1

Характеристика основних систем тріщин на кар'єрі ТОВ «Уманський гранітний кар'єр»

Найменування систем тріщин (номенклатура Клооса)	Коефіцієнт тріщинуватості	Відстань між стінками тріщин, мм	Відстань між окремими тріщинами, м	Ширина зони підвищеної тріщинуватості, м	Відстань між центрами зон, м
Поздовжні тріщини стискання – тріщини S	2÷4	0.012÷0.16	0.15÷2.9	50÷70	50÷76
Поперечні тріщини відриву – тріщини Q	2÷5	1.2÷4.5	1.3÷6.8	60÷80	65÷80
Горизонтальні тріщини розвантаження – тріщини L	4÷8	0.05÷0.15	0.5÷1.5	зони підвищеної тріщинуватості відсутні	–

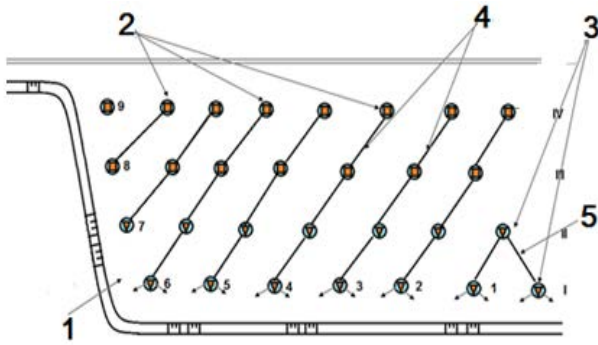


Рис. 2. Схема розміщення свердловин та комутація зарядів на уступі кар'єру ТОВ «Уманський гранітний кар'єр»: 1 – уступ; 2 – ряди свердловин с зарядами квадратної форми; 3 – ряди свердловин с зарядами трикутної форми; 4 – діагональна схема комутації; 5 – схема комутації врубових свердловин

Спочатку у свердловину встановлюють перший проміжний детонатор з тротилової шашкою Т-400Г. Далі в центральну частину свердловини, що залишилася, встановлюють секцію конверсійної ЕВР (Анемікс-70) типу ДКРП-4 з піроксиліновим порохом. У проміжок між поверхневою кромкою свердловини та зарядом подають наступну порцію ЕВР та встановлюють другий (верхній) детонатор Т-400Г. На завершальному етапі свердловину герметизують набивкою із бурового штабу. Потім у свердловинах, пробурених у тильній частині масиву уступу, на ділянці з протяжними зонами підвищеної тріщинуватості формують подовжені заряди у вигляді квадратної та трикутної призм. Профіль свердловинних зарядів виготовляють із щільного поліетилену. Зарядку свердловин проводять у такій послідовності, як і для зарядів зі змінним поперечним перерізом.

Ініціювання зарядів велося з використанням неелектричної системи НСІ "Імпульс", а внутрішні свердловинні уповільнення здійснювалися за допомогою спеціальних пристроїв – уповільнювачів. Пристрої з'єднувалися з головним патроном-бойовиком, що підриває, за допомогою хвильоводів неелектричної системи НСІ "Імпульс". Заряди на уступі блоку гірських порід були комутовані у групи, які з'єднані за діагональною схемою з використанням зустрічного ініціювання.

Після масового вибуху на ділянці уступу кар'єру було проведено фотозйомку фрагментів відбитої гірничої маси з фіксуванням кусків гірської породи з різних ділянок уступу (рис. 3).

В дослідженні набір зображень кусків породи виконано за допомогою мобільного телефону – Vivo X21.



Рис. 3. Зображення розвалу відбитої вибухом гірничої маси на різних ділянках уступу кар'єру

Для обробки зображень кусків породи була використана інтелектуальна система ідентифікації та аналізу ефективності вибухових робіт на уступі кар'єру з використанням моделі U-CARFnet [45]. Ця система заснована на покращеному алгоритмі Otsu та покращеному генетичному алгоритмі пофрагментації гірничої маси. Підготовлені зображення розвалу гірничої маси від вибухових робіт на уступі сегментуються з використанням маркерної сегментації генетичного алгоритму та запропонованого алгоритму з використанням методів U-CARFnet [46] та WipFrag [47]. Сегментизовані фрагменти розвалу гірничої маси оброблялися за допомогою комп'ютерної програми.

На рис. 4 наведено гістограму гранулометричного складу дрібнодисперсної фракції продуктів вибухового руйнування гранітних моделей зарядами різної форми перерізу.

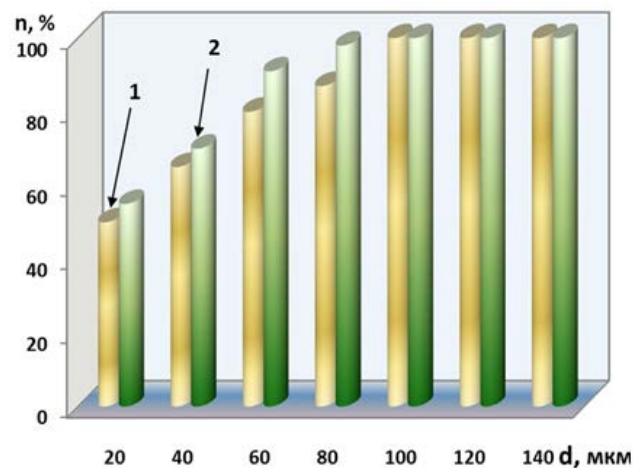


Рис. 4. Гістограма гранулометричного складу дрібнодисперсної фракції зруйнованих гранітних моделей (Звірівське родовище гранітів Черкаська область) зарядами вибухової речовини: 1 – заряд вибухової речовини з квадратної формою поперечного перерізу; 2 – заряд вибухової речовини з трикутною формою поперечного перерізу

Аналіз отриманих результатів (рис. 4) показує, що вихід найдрібніших фракцій в інтервалі від 0 до 100 мкм під впливом різних умов дина-

мічного навантаження та на контакті «вибухова речовина – гірська порода» змінюється за логарифмічною залежністю. В результаті обробки експериментальних даних було підтверджено велика збіжність закону Розіна-Раммлера при теоретичному розрахунку середнього діаметра куску, яка не перевищила 10-12%.

Також емпіричним шляхом було отримано формулу для розрахунку середнього діаметра куску відбитої гірничої маси, а саме:

$$\langle x \rangle = A \left(\frac{V_0}{Q} \right)^{4/5} Q^{1/6}. \quad (12)$$

де A – числовий параметр ($A = 7$ – для порід середньої міцності $f = 8-10$; $A = 10$ – для міцних сильно тріщинуватих порід міцністю $f = 10-14$; $A = 13$ – для надміцних слабо тріщинуватих порід міцністю $f = 12-16$); Q – маса заряду вибухової речовини в одній свердловині, кг.

Формула (12) враховує об'єм відбитої гірничої маси, тип і масу вибухової речовини в одній

свердловині, питомі втрати вибухової речовини і коефіцієнт міцності порід.

Питомі витрати вибухової речовини визначаються за формулою

$$q = QV_0^{-1}.$$

У табл. 2 представлені результати розрахунку середнього діаметра куску гірничої маси після проведення експериментальних вибухів на уступі кар'єру, де фрагменти розвалу порід пройшли сегментацію методами генетичного алгоритму U-CARFnet [45] та WipFrag [47].

На рис. 5 наведені результати обробки сегментованих фрагментів розвалу гірничої маси оброблені за допомогою комп'ютерної програми.

Аналіз отриманих результатів (рис. 5) показує, що застосування змінених параметрів буропідричних робіт з використанням комбінованих конструкцій зарядів зі змінним поперечним перерізом призводить зменшення до 15% середнього діаметра куску відбитої гірської маси, а також до зниження на 10 ÷ 15% витрат про-

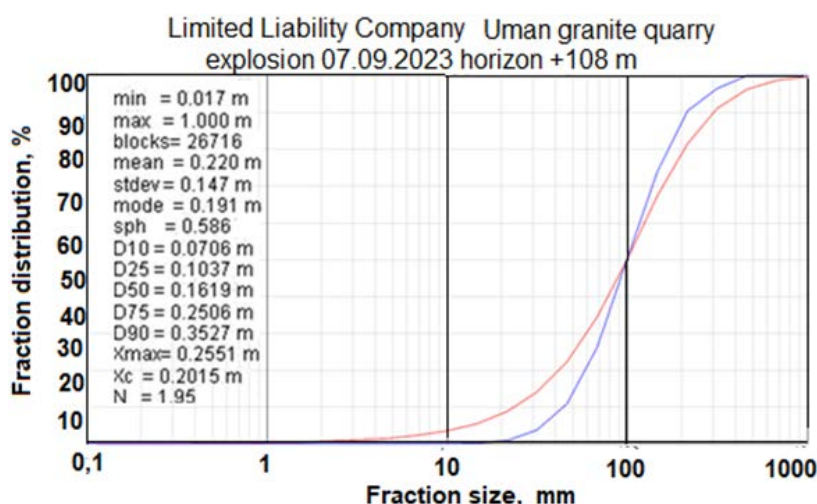


Рис. 5. Характер розподілу гранулометричного складу відбитої гірничої маси на уступі кар'єру

Таблиця 2

Розрахунки середнього діаметра куску гірничої маси

Дослідна діляниця				Контрольна діляниця			
Класи крупності, mm	Середній розмір куска по класу, d_i , mm	Вихід фракцій, W_i , mm	$d_i W_i$	Класи круності, mm	Середній розмір куска по класу, d_i , mm	Вихід фракцій, W_i , mm	$d_i W_i$
0 ÷ 200	100	40	4000	0 ÷ 200	100	25.7	2570
201 ÷ 400	300	30	9000	201 ÷ 400	300	23.5	7050
401 ÷ 600	500	15,3	7650	401 ÷ 600	500	22.6	11300
> 600	700	5,7	3900	> 600	700	26.2	15820
Сумарне значення		24640		Сумарне значення		36740	
$d_{cp} = \Sigma d_i W_i / 100 = 246.4$ mm				$d_{cp} = \Sigma d_i W_i / 100 = 367.4$ mm			

мислових ВР. При цьому вихід кондиційного куска із середнім діаметром $201 \div 600$ мм збільшується на 10%.

У результаті промислових випробувань запропонованої технології ведення вибухових робіт на кар'єрі ТОВ «Уманський гранітний кар'єр» вихід гірничої маси з 1 м свердловини становив $8,4 \text{ м}^3$, а обсяг бурових робіт – $2260,5 \text{ м}^3$.

Висновки. Проведені дослідження дозволяють сформулювати наступні висновки:

1. Експериментально встановлено, що при руйнуванні гранітних моделей зарядами різної форми перерізу вихід найдрібніших фракцій в інтервалі від 0 до 100 мкм під впливом різних умов динамічного навантаження та на контакті «вибухова речовина-гірська порода» змінюється за логарифмічною залежністю.

2. Оцінка ефективності буропідричних робіт і зниження часу обробки та сегментації зображень фрагментів зразків порід з подальшим коригуванням параметрів буропідричних робіт для конкретних умов кар'єру використано моделі U-CARFnet і U-Net.

3. Застосування змінених параметрів буропідричних робіт з використанням комбінованих конструкцій зарядів вибухової речовини різної форми зі змінним поперечним перерізом призводить до зменшення на 30% середнього діаметра

куска відбитої гірської маси та зниженню витрати вибухової речовини на $10 \div 15\%$. При цьому вихід кондиційного куска збільшується на 10%.

4. Підвищення ефективності дроблення гірничої маси досягається за рахунок коригування основних параметрів буропідричних робіт, застосування нових конструкцій комбінованих свердловинних зарядів з різною формою поперечного перерізу, обліку напрямку та інтенсивності систем тріщин різної морфології в блоці, що руйнується. Це дає можливість при постійній масі заряду вибухової речовини збільшити його довжину і рівномірно розподілити вибухову речовину по висоті уступу.

5. Впровадження запропонованої технології ведення вибухових робіт на кар'єрах при відбійці гірських масивів зі складною структурою дозволяє забезпечити ефективне та якісне дроблення гірських порід. При цьому економія вибухової речовини на одній свердловині становить до 30 kg, а матеріальні витрати на масовий вибух знижуються на понад 30000 грн. Це дозволяє знизити питому витрату вибухової речовини в середньому на 15%, зберегти проектну позначку підосви уступу та підвищити техніко-економічні показники роботи гірничо-видобувних підприємств.

Список літератури:

1. Wang R., Zhang W., Shao L. Research of ore particle size detection based on image processing. *Lecture Notes in Electrical Engineering*. 2018. № 460. P. 505–514. URL: https://doi.org/10.1007/978-981-10-6499-9_48. (дата звернення: 19.08.2025).
2. Lu Z. M., Zhu F. C., Gao X. Y., et al. In-situ particle segmentation approach based on average background modeling and graph-cut for the monitoring of L-glutamic acid crystallization. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems* (July 2017). 2018. №178. P. 11–23. URL: <https://doi.org/10.1016/j.chemolab.2018.04.009>. (дата звернення: 19.08.2025).
3. Dong K., Jiang D. Automated estimation of ore size distributions based on machine vision. *Lecture Notes in Electrical Engineering*. 2014. №238 LNEE. P. 1125–1131. URL: https://doi.org/10.1007/978-1-4614-4981-2_122. (дата звернення: 19.08.2025).
4. Chalfoun J., Majurski M., Dima A., et al. Fogbank: A single cell segmentation across multiple cell lines and image modalities. *BMC Bioinformatics*. 2014. №15(1). P. 1–12. URL: <https://doi.org/10.1186/1471-2108-15-1>. (дата звернення: 19.08.2025).
5. Navab N., Hornegger J., Wells W. M., Frangi A. F. Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention–MICCAI 2015. *Part III. Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*: 18th International Conference Munich, Germany. (Munich, October 5–9, 2015 proceedings). Munich, 2015. №9351(Cvd). P. 12–20. URL: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-24574-4>. (дата звернення: 19.08.2025).
6. Raza S. E. A., Cheung L., Epstein D., et al. MIMO-Net: A multi-input multi-output convolutional neural network for cell segmentation in fluorescence microscopy images. *On Biomedical Imaging – 2017: Proceedings International Symposium. Znanstvena misel journal*. 2025. №98(64). P. 337–340. URL: <https://doi.org/10.1109/ISBI.2017.7950532>. (дата звернення: 19.08.2025).
7. Oktay O., Schlemper J., Folgoc L. Le, et al. Attention U-Net: Learning Where to Look for the Pancreas. *Middle*. 2018. URL: <http://arxiv.org/abs/1804.03999> (дата звернення: 19.08.2025).
8. Sevastopolsky A., Drapak S., Kiselev K., et al. Stack-U-Net: Refinement Network for Image Segmentation on the Example of Optic Disc and Cup. 2018. URL: <http://arxiv.org/abs/1804.03998> (дата звернення: 19.08.2025).

9. Zhan Y., Zhang G. An improved OTSU algorithm using histogram accumulation moment for ore segmentation. *Symmetry*. 2019. №11(3). URL: <https://doi.org/10.3390/sym11030431>. (дата звернення:19.08.2025).
10. Xiao D., Liu X., Le B. T., et al. An ore image segmentation method based on rdu-net model. *Sensors (Switzerland)*. 2020. №20 (17). P.1–16. URL: [pmid:32887432](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/32887432/). (дата звернення:19.08.2025).
11. Шевченко О.І. Розробка наукових основ процесу віброударного зневоднення техногенної сировини різного гранулометричного складу: автореф. дис.... докт. техн. наук: спец. 05.15.09 «Геотехнічна та гірнична механіка»; Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України. Дніпро, 2021. 43 с.
12. Lapshin E.S., Shevchenko A.I. Ways of improvement of vibrational segregation and dehydration of mineral raw materials. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 2013. No 3. P. 45–51. URL: <http://nvngu.in.ua/index.php/en/archive/on-the-issues/784-2013/contentsno-3-2013/solid-state-physics-mineral-processing/2190-ways-of-improvement-of-vibrational-segregation-anddehydration-of-mineral-raw-materials>. (дата звернення:19.08.2025).
13. Lapshyn Y., Shevchenko O. Prospects for using screens with double vibration-impact excitation for size separation and dewatering of wet mineral raw materials that are difficult to classify. *Essays of Mining Science and Practice: materially VI International Conference (RMGET 2024) 2025 IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 1348 012074. URL: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1348/1/012074>, available at: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/1348/1/012074/pdf>. (дата звернення:19.08.2025).
14. Duan J., Liu X., Wu X., Mao C. Detection and segmentation of iron ore green pellets in images using lightweight U-net deep learning network. *Neural Computing and Applications*. 2020. № 32(10). P. 5775–5790. URL: <https://doi.org/10.1007/s00521-019-04045-8>. (дата звернення:19.08.2025).
15. Olivier L. E., Maritz M. G., Craig I. K. Estimating ore particle size distribution using a deep convolutional neural network. *IFAC Papers On Line*. 2020. № 53(2). P.12038–12043. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2020.12.740>. (дата звернення:11.08.2025).
16. Mustafa N., Zhao J., Liu Z., et al. Iron ORE Region Segmentation Using High-Resolution Remote Sensing Images Based on Res-U-Net. *International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*. 2020. P. 2563–2566. URL: <https://doi.org/10.1109/IGARSS39084.2020.9324218>. (дата звернення:11.08.2025).
17. Liu X., Zhang Y., Jing H., et al. Ore image segmentation method using U-Net and Res_Unet convolutional networks. *RSC Advances*. 2020. № 10(16). P. 9396–9406. URL: [pmid:35497237](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/35497237/). (дата звернення:11.08.2025).
18. Yang H., Huang C., Wang L., Luo X. An Improved Encoder-Decoder Network for Ore Image Segmentation. *IEEE Sensors Journal*. 2021. № 21(10). P. 11469–11475. URL: <https://doi.org/10.1109/JSEN.2020.3016458>. (дата звернення:11.08.2025).
19. Liu Y., Zhang Z., Liu X., et al. Efficient image segmentation based on deep learning for mineral image classification. *Advanced Powder Technology*. 2021. № 32(10). P. 3885–3903. URL: <https://doi.org/10.1016/j.appt.2021.08.038>. (дата звернення:11.08.2025).
20. Filippo M. P., da Fonseca Martins Gomes, O., da Costa, et al. Deep learning semantic segmentation of opaque and non-opaque minerals from epoxy resin in reflected light microscopy images. *Minerals Engineering*. 2021. № 170(June). URL: <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2021.107007>. (дата звернення:11.08.2025).
21. Yang Z., Ding H., Guo L., Lian M. Superpixel Image Segmentation-Based Particle Size Distribution Analysis of Fragmented Rock. *The Multidisciplinary Open Access Journal*. 2021. № 9. P. 59048–59058. URL: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3072998>. (дата звернення:11.08.2025).
22. Koh E. J. Y., Amini E., McLachlan G. J., Beaton N. Utilising convolutional neural networks to perform fast automated modal mineralogy analysis for thin-section optical microscopy. *Minerals Engineering*. 2021. № 173 (September), 107230. URL: <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2021.107230>. (дата звернення:11.08.2025).
23. Lei M. et al. A novel tunnel-lining crack recognition system based on digital image technology. *Tunnell. Undergr. Space Technol.* 2021. № 108. P. 103724. URL: <https://doi.org/10.1016/j.tust.2020.103724>. (дата звернення:11.08.2025).
24. Wang P., Wang S., Jierula A. Automatic identification and location of tunnel lining cracks. *Advances in Civil Engineering*. 2021. P. 1–9. URL: <https://doi.org/10.1155/2021/8846442>. (дата звернення:11.08.2025).
25. Yan X., Zhou G., Zhao X. Method for rapid detection and treatment of cracks in tunnel lining based on deep learning. *On Health Monitoring of Structural and Biological Systems: Proc. IX International Conference Electr Network*. 2020. Vol. 11381. P. 331–339. URL: <https://doi.org/10.1117/12.2558472>. (дата звернення:11.08.2025).
26. Huang H.-W., Li Q.-T., Zhang D.-M. Deep learning based image recognition for crack and leakage defects of metro shield tunnel. *Tunnel. Undergr. Space Technol.* 2018. № 77. P. 166–176. URL: <https://doi.org/10.1016/j.tust.2018.04.002>. (дата звернення:11.08.2025).
27. Huang Y., Liu F., Wang J., et al. A photogrammetric system for tunnel underbreak and overbreak detection. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. 2022. №23. P. 22217–22226. URL: <https://doi.org/10.1109/tits.2022.3157588>. (дата звернення:11.08.2025).

28. Kemeny J. M. et al. Analysis of rock fragmentation using digital image processing. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 1993. № 119 (7). P. 1144–1160. URL: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9410\(1993\)119:7\(1144\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1993)119:7(1144)). (дата звернення: 11.08.2025).
29. Singh B. K. et al. Application of digital image analysis for monitoring the behavior of factors that control the rock fragmentation in opencast bench blasting: A case study conducted over four open cast coal mines of the Talcher Coalfields, India. *Znanstvena misel journal*. 2025. №98 (65). *Journal of Sustainable Mining*. 2019. № 18 (4). P. 247–256. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jsm.2019.08.003>. (дата звернення: 11.08.2025).
30. Yaghoobi H. et al. Determining the fragmented rock size distribution using textural feature extraction of images. *Powder Technol.* 2019. №342. P.630–641. URL: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2018.10.006>. (дата звернення: 11.08.2025).
31. Hamzeloo E., Massinaei M., Mehrshad N. Estimation of particle size distribution on an industrial conveyor belt using image analysis and neural networks. *Powder Technol.* 2014. №261. P. 185–190. URL: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2014.04.038>. (дата звернення: 11.08.2025).
32. Li X. Y., Huang C. A novel method for image segmentation based on improved OTSU and improved genetic algorithm. *Hands-On Renewable Energy Experiments – Res Lab*. 2012. №31(12). P. 57–61. URL: (дата звернення: 11.08.2025).
33. Purswani P. et al. Evaluation of image segmentation techniques for image-based rock property estimation. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2020. № 195. P.107890. URL: <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2020.107890>. (дата звернення: 11.08.2025).
34. Guo Q. et al. A method of blasted rock image segmentation based on improved watershed algorithm. *Scientific Reports*. 2022. №12 (1). P. 7143. URL: <https://doi.org/10.1038/s41598-022-11351-0>. (дата звернення: 11.08.2025).
35. Bedair A. Digital Image Analysis of Rock Fragmentation from Blasting (McGill University, 1996). *Scientific Reports*. 2024. №14. P. 4783. URL: <https://doi.org/10.1038/s41598-024-55369-y>. (дата звернення: 11.08.2025).
36. Allen T. Powder Sampling and Particle Size Determination. Language: *English Paperback*. 2003. URL: ISBN: 9780444545558. (дата звернення: 11.08.2025).
37. Вибухова суміш: пат. 88299, Україна: МПК6 С 06В 31/12. №u2013 11525; заявл. 30.09.13; опубл. 11.03.14. Бюл. №5. 8 с.
38. Вибуховий прилад конденсаторний: пат. 98546, Україна: МПК6 F42D1/05. №a201012302, заявл. 18.10.10. опубл. 25.05.12. Бюл. №10. 15 с.
39. Ефремов Э.И., Петренко В.Д., Рева Н.П., Кратковский И.Л. Механика взрывного разрушения пород различной структуры. К.: Наук. думка, 1984. 192 с.
40. Спосіб формування свердловинного заряду кумулятивної дії для вибухового руйнування гірських порід: пат. 86138, Україна: МПК6 E21C37/00, F42D3/04. № а 200708501; заявл. 24.07. 2007; опубл. 25.03. 2009. Бюл. №6. 15с.
41. Спосіб вибухового руйнування локально-тріщинуватих анізотропних гірських порід: пат. 105730, Україна: МПК6 E21C37/00 № а 201307372; заявл. 11.06. 2013; опубл. 10.06. 2014. Бюл. №11. 12 с.
42. Спосіб вибухового руйнування міцних анізотропних гірських порід складної будови на блоці: пат. 96511, Україна: МПК6 E21C37/00. № u201409009 заявл. 11.08. 2014; опубл. 10.02.15. Бюл. №3. 10 с.
43. Спосіб вибухового руйнування міцних гірських порід складної будови: пат. 137563, Україна: МПК 7 E21C 37/00. № u201904120 заявл. 08.04. 2019; опубл. 25.10. 2019. Бюл. №20. 13с.
44. Novikov L.A., Konoval V.M., Ishchenko K.S., Kinasz R.I., Malieiev Ye.V. Quality control of preparation of rock mass explosion in granite open pit. *Geo-Technical mechanics*. 2023. №. 166. P. 109–117. URL: <https://doi.org/10.15407/geotm2023.166.109>. (дата звернення: 11.08.2025).
45. Peng He, Yifan Xu3, Feng Jiang, et al. A rapid evaluation method of blasting effect based on optimized image segmentation algorithm and application in engineering. *Scientific Reports*. 2024. №14. P. 4783. URL: <https://doi.org/10.1038/s41598-024-55369-y>. (дата звернення: 11.08.2025).
46. Jin X., Liang J., Fan X., et al. A Study on Image Segmentation of Quarry Blast Fragments Based on U-CARFnet. *PLoS ONE*. 2023. № 18(9): e0291115. URL: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0291115>. (дата звернення: 11.08.2025).
47. Mertz N.H., Palangio T.K., Franklin J.A. WipFrag Image-based granulometry system. *Measurement of blast Fragmentation*. (June). 2019. P. 91– 99. URL: <https://doi.org/10.1201/9780203747919-15>. (дата звернення: 11.08.2025).

Ishchenko K.S., Novikov L.A., Konoval V.M., Ponomarenko I. O., Mazur O.M., Demchenko O.V.
ANALYTICAL AND EXPERIMENTAL APPROACHES TO ASSESSING THE EFFECTS
OF AN EXPLOSION IN A CRYSTALLINE MOUNTAIN ROCKS MASSIF

The work considers analytical and experimental studies of the influence of explosive charge designs of different cross-sectional shapes upon the action of an explosion in an array of crystalline rocks of complex structure in terms of the diameter of the average piece. Experimental studies were conducted in laboratory and field conditions of quarries to establish the nature of the destruction of granite samples by the explosion of charges of different cross-sectional shapes, the development of a mathematical model of calculation to substantiate the yield of crushing fractions by the diameter of the average piece according to the Rosin-Rammler law. It was established that during the explosive destruction of granite models, the uniformity of crushing is ensured by the use of charges of different cross-sectional shapes, namely: variable cross-section along the charge column and in the form of a square prism. Studies were conducted in the industrial conditions of the quarry of LLC "Uman Granite Quarry" to assess the distribution of the grain size distribution of the destroyed rock mass after a mass explosion using charges of various cross-sectional shapes by segmenting images of rock sample fragments using the U-CARFnet and U-Net models. A comparative evaluation of the proposed model with traditional image segmentation methods was carried out, and a formula for calculating the diameter of the average piece was empirically derived, which takes into account all the factors under which the rock is destroyed, which confirms the high convergence of the Rosin-Rammler law. The quality of the rock blown by the explosion on the quarry ledge was assessed by the diameter of the average piece using the U-CARFnet and WipFrag methods, which were processed using a computer program. The use of corrected parameters of drilling and blasting operations using combined designs of explosive charges of various cross-sectional shapes made it possible to reduce the diameter of the average piece of the blown rock mass and reduce the consumption of explosives. At the same time, the yield of the conditioned piece increased, which ensured uniform crushing of the broken rock mass.

Key words: solid medium, charge cavity, explosive, explosive destruction, stress wave.

Дата надходження статті: 01.09.2025

Дата прийняття статті: 22.09.2025

Опубліковано: 16.12.2025