

© М.І. Бельтек¹, А.Л. Ган^{1,2}, О.В. Ган^{1,2}, О.О. Фролов¹

¹Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна

²Інститут гідромеханіки НАН України, Київ, Україна

ВПЛИВ СТУПЕНЯ ТРІЩИНУВАТОСТІ СКЕЛЬНОГО ГІРСЬКОГО МАСИВУ НА ЕФЕКТИВНІСТЬ ЙОГО ВИБУХОВОГО РУЙНУВАННЯ

© M. Beltek¹, A. Han^{1,2}, O. Han^{1,2}, O. Frolov¹

¹National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine

²Institute of Hydromechanics of NASU, Kyiv, Ukraine

INFLUENCE OF ROCK MASS FRACTURE DEGREE ON THE EFFICIENCY OF ITS EXPLOSIVE DESTRUCTION

Мета. Мета досліджень полягає у встановленні закономірності впливу ступеня тріщинуватості скельного масиву на ефективність його руйнування вибухом свердловинного заряду, а саме на значення максимального радіуса зони вибухового дроблення, шляхом моделювання процесу руйнування гірських порід в ANSYS AUTODYN.

Методика дослідження. Застосована комплексна методика досліджень, яка полягає у науковому аналізі вже існуючих результатів досліджень з питань руйнування тріщинуватих гірських масивів, комп'ютерному моделюванні процесу вибухового руйнування скельних порід в ANSYS AUTODYN, графічному та аналітичному встановленні залежностей впливу модуля тріщинуватості масиву на максимальний радіус зони вибухового руйнування.

Результати дослідження. За результатами моделювання в ANSYS AUTODYN вибуху свердловинного заряду Анемікс 70 в гранітах Пинязевицького родовища отримані епюри руйнувань гірського масиву з різним значенням коефіцієнту зниження міцності. Побудована графічна залежність максимального радіуса зони руйнування від коефіцієнту зниження міцності, яку можна описати з високим рівнем достовірності поліномом 3-ого ступеня.

Встановлено, що максимальний радіус зони руйнування ідеально міцного масиву в 2,15 раза менше радіусу руйнування, що отримано при вибуху в максимально ослабленому масиві.

Розраховані чисельні значення максимальних радіусів зон руйнування у гранітному масиві при різних значеннях модуля тріщинуватості та отримана відповідна графічна залежність, яка найбільш точно апроксимується поліномом 4-го порядку. Встановлено, що для монолітного масиву максимальне значення радіусу в даних умовах становить 1,82 м, а для сильнотріщинуватого – 3,0 м, тобто зростає у 1,65 раза. При подальшому збільшенні модуля тріщинуватості інтенсивність руйнувань зростає більш суттєво.

Наукова новизна. Отримано графічну та аналітичну залежності максимального радіуса зони руйнування при вибуху циліндричного заряду від модулю тріщинуватості гірського масиву для певних гірничо-технологічних умов.

Практичне значення. Представлені дослідження рекомендовано використовувати при проєктуванні буропідричних робіт в тріщинуватих скельних гірських масивах для підвищення ступеня достовірності результатів вибуху.

Ключові слова: гірський масив, вибух, комп'ютерне моделювання, ANSYS AUTODYN, модуль тріщинуватості, циліндричний заряд, еюра руйнувань, радіус зони руйнування.

Вступ. Скельні гірські масиви, що підлягають розробці, в переважній більшості представлені тріщинуватими породами. Цілком природно, що при вибуховому руйнівному навантаженні вони розвалюються за вже наявними тріщинами і лише обмежений об'єм масиву, який безпосередньо прилягає до заряду, піддається руйнуванню на шматки, що є меншими за природні окремісті. Тому загальна ефективність вибуху залежить як від характеристик вибухової речовини (ВР) [1] і природних фізико-механічних властивостей порід міцності, так і від ступеня порушеності гірського масиву тріщинами [2–4]. У зв'язку з цим, до промислового руйнування тріщинуватих скельних масивів вибухом циліндричних зарядів завжди була прикута значна увага науковців, дослідників і виробничників, а виявлення закономірностей зміни параметрів зон дроблення для різних гірничо-геологічних умов становила важливу наукову та інженерно-технічну задачу, вирішення яких дозволяє підвищити ефективність руйнування гірського масиву.

Руйнування тріщинуватих гірських масивів вважається набагато складнішою науковою задачею у порівнянні з руйнуванням суцільного середовища, яка на цей час остаточно ще не вирішена. Незважаючи на значну кількість наукових досліджень і досягнутих результатів у цій області знань, на сьогодні неможливо достовірно передбачити результат руйнування тріщинуватого масиву вибухом [5]. Він буде носити, в певному розумінні, ймовірнісний характер, тому що неможливо точно виявити параметри тріщинуватості і встановити їх вплив.

Вченими запропоновано декілька методик розрахунку параметрів буропідричних робіт для руйнування тріщинуватих гірських масивів. Однак вони не отримали широкого поширення при практичному застосуванні, оскільки не враховували усіх факторів впливу параметрів тріщинуватості на дію вибуху в такому середовищі. Тому на сьогодні, при проектуванні буропідричних робіт, тріщинуватість враховують опосередковано, шляхом введення в певні розрахункові формули коефіцієнта тріщинуватості або аналогічного показника.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У своїх працях вчені В.М. Мосинець та А.В. Абрамов зазначали, що основним параметром, який характеризує фізичні властивості гірських порід, є швидкість поширення поздовжніх хвиль напружень в масиві. Вони вважали, що ця характеристика середовища зберігає свою інформативність і в тріщинуватих масивах, як складової в акустичному імпедансі. Проведені ними дослідження показали, що швидкість поширення поздовжньої хвилі напружень в зоні порушених тріщинуватих порід залежить від середнього лінійного розміру окремісті гірського масиву d_e :

$$C_p = 500(1 + 3d_e). \quad (1)$$

В [6], враховуючи висновки досліджень вищезазначених вчених, були представлені розрахунки об'єм зон вибухового руйнування порід для різних значень швидкостей поширення хвиль напружень в магнетитовому кварці. Було встановлено, що зі збільшенням швидкості поширення поздовжніх хвиль напружень в тріщинуватих породах збільшується об'єм їхнього руйнування V . Доведено, що зі збільшенням швидкості хвиль c_l з 1000 м/с до 6000 м/с об'єм руйнувань гірського масиву збільшується у 2,2...2,4 раза залежно від типу

застосовуваної вибухової речовини. Залежність $V = f(c_l)$ можна описати поліномом 2-го порядку:

$$V = a + b \cdot c_l - d \cdot c_l^2, \quad (2)$$

де a , b , d – емпіричні коефіцієнти поліноміальної залежності, які залежать від типу ВР [6].

Також в публікації [7] зазначається, що при проведенні експериментальних вибухів з реєстрацією деформацій та напружень у тріщинуватому масиві, отримано нижчі показники порівняно з ідеалізованими значеннями. Авторами було встановлено основну причину цього розходження, а саме – вплив тріщин, які розділяють масив на окремі частини. Виконавши порівняльний аналіз значень зазначених відхилень з параметрами тріщин, науковці запропонували ввести в розрахунки коефіцієнта $K_{тр}$, який враховує не тільки рівень заповнення природних тріщин мінеральним дріб'язком, але й кінетику вибуху та інерційний фактор проходження пружною хвилею через макротріщину:

$$K_{тр} = \sqrt{f \cdot \rho_{тр}} \left(1 - \frac{r_{фх} \cdot g_{тр}}{A} \right)^{(1-\rho_{тр})}, \quad (3)$$

де f – міцність породи; $\rho_{тр}$ – ступінь заповненості тріщини породним дріб'язком; $r_{фх}$ – відстань від заряду до фронту хвилі; $g_{тр}$ – показник питомої тріщинуватості масиву.

Уведення даного коефіцієнта значно покращило збіжність результатів теоретичних розрахунків та експериментальних реєстрацій щодо визначення взаємодії енергії вибуху з тріщинуватим скельним масивом.

Залежність величини радіуса зони регульованого дроблення гірського масиву від параметрів тріщинуватості свого часу відмічалась і дослідженнях Б.Н. Кутузова. В наукових працях він зазначав, що при підриванні на кар'єрах відстань між свердловинами повинна вибратися відповідно до радіусу зони дроблення, який рекомендовано визначати за формулою:

$$R_{др} = 0,2 D \rho_{ВР} c_p \frac{d_3}{\sigma_p (1-\nu)} \sqrt{\frac{d_k \xi}{\delta} + \frac{d_e}{2}}, \quad (4)$$

де D – швидкість детонації ВР; $\rho_{ВР}$ і d_3 – щільність і діаметр заряду ВР; ν – коефіцієнт Пуассона; c_p – швидкість поздовжньої хвилі; σ_p – розтягуючі напруження, що виникають в скельному масиві; d_k – діаметр шматків, на які дробиться гірський масив; ξ – безрозмірна площа контактів між окремостями; δ – максимальне розкриття тріщин; d_e – розмір природної окремої частини.

В [8] запропоновано тріщинуватість скельного масиву оцінювати за допомогою параметрів, які вводяться в формулу для визначення коефіцієнта інтенсивності напружень через напівдовжину тріщини. Якщо припустити, що в гірському масиві вже містяться рівномірно розподілені тріщини з певною середньою відстанню між ними S , то значення критичного напруження руйнування буде визначатися за формулою

$$\sigma_{кр} = \frac{K_c \cdot S}{Y} \sqrt{\frac{N}{\pi}}, \quad (5)$$

де K_c – критичне порогове значення коефіцієнту інтенсивності напружень; S – середня відстань між тріщинами; Y – безрозмірний множник, який в механіці руйнування має назву « K -тарировка»; N – кількість тріщин в одиниці об'єму масиву.

Авторами роботи [5] встановлено, що в тріщинуватих масивах гранично можливий радіус зони дроблення збільшується обернено пропорційно коефіцієнту структурного ослаблення, який, в свою чергу, визначається зі співвідношення гранично можливого радіусу зони тріщиноутворення у монолітному масиві до середньої відстані між тріщинами. Остаточо, науковці рекомендують визначати радіус зони дроблення у тріщинуватому гірському масиві, наступним чином:

$$R_p = 1,4 R_{\pi} \sqrt{\frac{P_{BP} r_{CB} \left(0,97 + 0,182 \sqrt{\frac{R_{\pi} P_{BP} r_{CB}}{l_T^2 \tau}} \right)}{R_{\pi} \tau}}, \quad (6)$$

де R_{π} – радіус зони інтенсивного дроблення у монолітному масиві, м; P_{BP} – середній тиск продуктів детонації ВР у зарядній камері, Па; r_{CB} – радіус циліндричного заряду ВР, м; τ – межа міцності руйнування гірської породи на зсув, Па; l_T – середня відстань між тріщинами, м.

В науковій статті [9] зазначено, що геологічні структури, такі як тріщини, контакти і розломи в масиві гірських порід, значно впливають на видобуток корисних копалин відкритим способом. Тому дуже важливо зрозуміти динаміку поведінки таких масивів під час вибухових навантажень. Це може надати як теоретичні, так і практичні рекомендації щодо покращення дроблення гірських порід при вибухових роботах. За допомогою ANSYS вчені проаналізували розподіл поля напружень в тріщинуватому гірському масиві та встановили, що, зі згасанням енергії детонаційної хвилі після проходження тріщини, напруження від вибуху мають тенденцію до зменшення.

Науковці в [10] зазначають, що значна кількість тріщин дуже впливає на ефективність вибухових робіт. Використовуючи програми чисельного моделювання ANSYS/LS-DYNA та PFC 2D, ними була побудована модель поведінки гірської породи з безліччю суцільних тріщин від спільної дії хвилі напружень та детонації ВР. Результати показали, що тривалість дії хвилі напружень скорочується, а енергія детонаційного газу частково поглинається тріщиною. Відповідно, це призводить до нерівномірного розподілу напружень і впливає на ефект вибуху.

Отже, аналіз наукових досліджень з проблем руйнування тріщинуватих гірських масивів показує різноманітність підходів щодо врахування показників тріщинуватості у розрахунках параметрів вибухових робіт або характеристик, які впливають на результати вибуху. Це пов'язано, як вже було зазначено, з існуванням значної кількості факторів, які потрібно враховувати.

Формулювання мети дослідження. На підставі виконаного аналізу наукових досліджень у сфері руйнування тріщинуватих гірських порід сформульовано мету досліджень даної статті, яка полягає у встановленні закономірності впливу ступеня тріщинуватості скельного масиву на ефективність його вибухового руйнування, а саме на максимальний радіус зони вибухового дроблення, шляхом моделювання процесу руйнування гірських порід у програмному середовищі ANSYS AUTODYN для певних гірничо-технологічних умов.

Виклад основного матеріалу. Існуючі сучасні пакети прикладних програм надають можливість для комп'ютерного моделювання процесу руйнування скельних гірських порід вибухом подовженого заряду ВР. Це дозволяє виявити закономірності і оцінити характер руйнування залежно від властивостей гірського масиву та характеристик застосовуваних ВР. Одним з таких програмних продуктів є ANSYS AUTODYN, використання якого дозволяє достовірно передбачати поведінку об'єкту дослідження на всіх етапах дії вибуху [11]. Також, як підтверджує накопичений досвід застосування цього продукту, він найповніше відображає фізику досліджуваного процесу [12].

Однак проблема полягає в тому, що достовірно змодельовати процес вибухового руйнування тріщинуватого гірському масиву надзвичайно складно, оскільки практично неможливо виявити просторове розташування усіх тріщин та їх параметри в реальному масиві. Можна виявити вплив окремої або декількох тріщин на ефективність вибухового дроблення порід, але ж без повних знань про структурні особливості гірського масиву достовірних результатів руйнування ми не отримаємо.

У зв'язку з цим, врахування впливу ступеню тріщинуватості скельного масиву на параметри зони руйнування при вибуховій дії свердловинного заряду ВР, зокрема на максимальний радіус дроблення, пропонується здійснити через показники зниження міцності скельного гірського масиву, які, як зазначають науковці, безпосередньо пов'язані з тріщинуватістю.

Для оцінки ступеня зниження міцності реального гірського масиву у порівнянні зі значеннями результатів лабораторних випробувань породних зразків в Україні використовують коефіцієнт структурного ослаблення масиву (КСО) [13, 14]. В результаті аналізу факторів, які впливають на зниження загальної міцності гірського масиву, встановлено, що тріщинуватість є визначальним фактором при визначенні КСО.

Узагальнення вітчизняних та закордонних наукових досліджень щодо питань зниження міцності природного масиву в порівнянні з міцністю окремого зразка породи виконано в [15]. Автори роботи зазначають, що значення коефіцієнта структурного ослаблення (вітчизняні дослідження) та показників якості породи (закордонні дослідження) залежать безпосередньо від модуля тріщинуватості скельного гірського масиву. Результати узагальнення різних методів оцінки зниження міцності масиву представлено графічно. Встановлено, що характер зміни графічних залежностей КСО і показників RQD та RMR залежно від модуля тріщинуватості K_T є однаковим, а узагальнюючу криву апроксимації можна описати поліномом 3-го ступеню:

$$K_{\text{сп}} = 1 - 0,2021K_T + 0,0203K_T^2 - 0,0007K_T^3. \quad (7)$$

Замість вищезазначених КСО і показників якості породи, запропоновано ввести узагальнений коефіцієнт зниження міцності гірського масиву $K_{\text{сп}}$.

Таким чином, при введенні в ANSYS AUTODYN вихідних характеристик гірської породи, ми маємо можливість через коефіцієнт зниження міцності $K_{\text{сп}}$ задавати фактичну міцність досліджуваного гірського масиву, а чисельні значення $K_{\text{сп}}$ визначати модулем тріщинуватості.

В якості предмета досліджень обрано гірський масив Пинязевицького родовища гранітів, який руйнується вибуховою речовиною Анемікс 70. Діаметр свердловинного заряду становить 200 мм, загальна довжина модельованої свердловини дорівнює 3,0 м, а довжина заряду – 2,0 м, Відповідно, довжина забивки з піску склала 1,0 м.

Основними характеристиками Анеміксу 70 згідно в ТУ У 24.6-31385850-001-2002 є [16]:

- Щільність заряджання – 1220 кг/м³;
- Швидкість детонації – 5000 м/с;
- Температура газів вибуху – 2163 °С;
- Теплота вибуху – 3117 кДж/кг;
- Об'єм газів вибуху – 1004 л/кг.

Фізико-механічні характеристики граніту Пинязевицького кар'єру в лабораторному зразку наступні:

- об'ємна вага породи – 2600 т/м³;
- швидкість поширення повздовжніх хвиль напружень – 2920 м/с;
- модуль пружності – $1,7 \cdot 10^{10}$ Па;
- модуль пружності – $1,7 \cdot 10^7$ кПа;
- критичне значення напруження руйнування на стиснення – $1,6 \cdot 10^8$ Па;
- критичне значення напруження руйнування на розтягнення – $1,6 \cdot 10^7$ Па;
- критичне значення напруження руйнування на стиснення – $3,04 \cdot 10^7$ Па;
- коефіцієнт Пуасона – 0,19.

В першу чергу, моделювання дії вибуху свердловинного заряду ВР Анеміксу 70 виконано для ідеального гранітного гірського масиву, тобто, коли чисельне значення коефіцієнту зниження міцності $K_{\text{сп}}$ становить 1,0 [17]. Надалі, моделювання здійснено для масивів гірських порід нижчими за міцністю, тобто зі значеннями $K_{\text{сп}}=0,9$ і менше: від ідеального граніту до максимально структурно ослабленого гірського масиву.

На рис. 1 наведені епюри руйнувань гранітних масивів різної міцності відповідно до значень коефіцієнтів зниження міцності $K_{\text{сп}}$.

Аналіз епюр руйнувань, які наведені на рис. 1, показує суттєве (збільшення розмірів зони руйнування максимально структурно ослабленого гірського масиву (рис. 1, в) у порівнянні з зоною руйнування гранітів лабораторного зразка (рис. 1, а). Зокрема, максимальне значення радіусу зони руйнування ідеального гірського масиву ($K_{\text{сп}} = 1,0$) в 2,15 раза менше, ніж значення найслабшого масиву ($K_{\text{сп}} = 0,1$) (табл. 1).

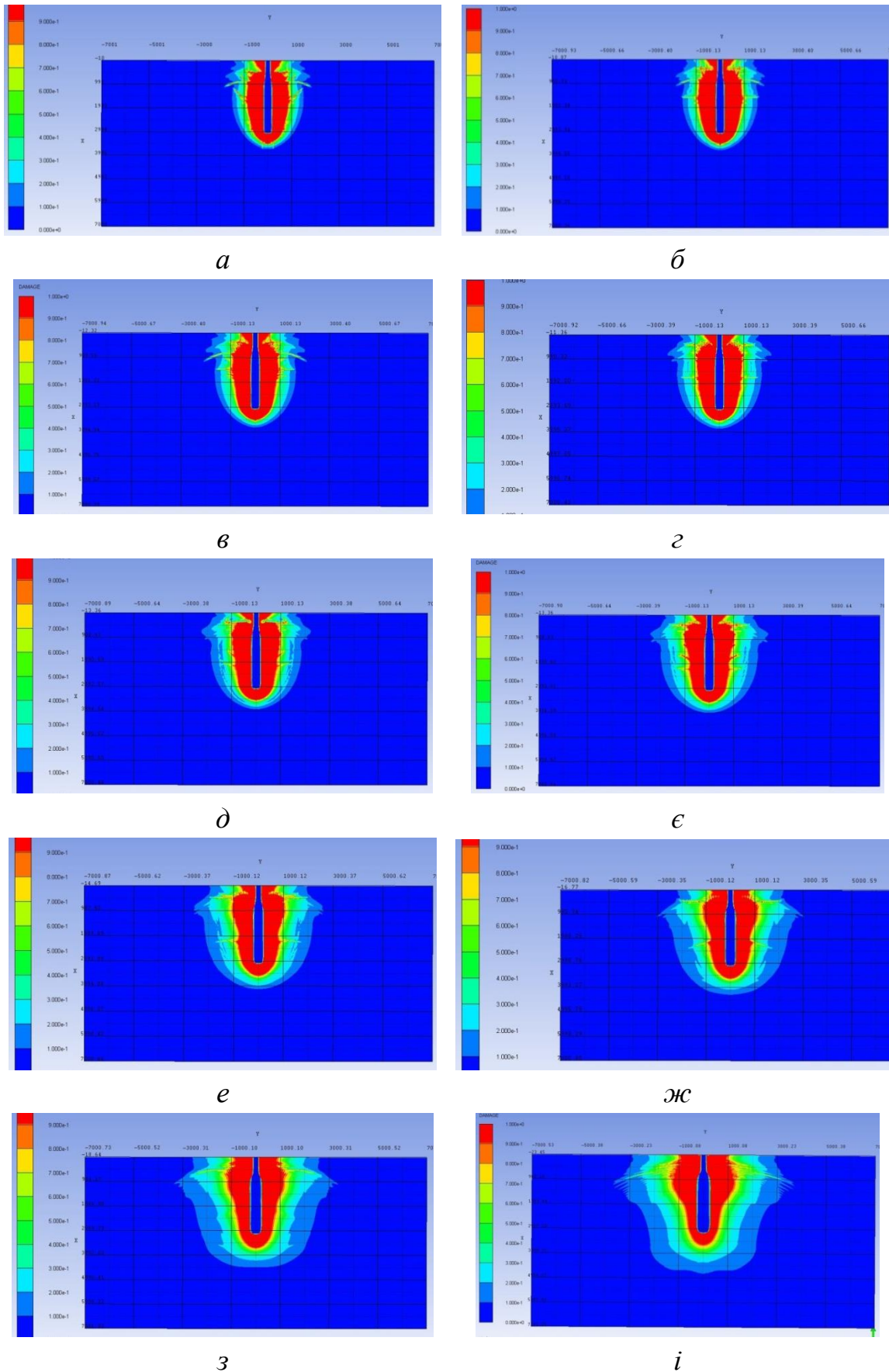


Рис. 1. Епюри руйнувань гірського масиву при різних значеннях коефіцієнту зниження міцності $K_{сп}$: $a - 1,0$; $б - 0,9$; $в - 0,8$; $г - 0,7$; $д - 0,6$; $е - 0,5$; $е - 0,4$; $ж - 0,3$; $з - 0,2$; $и - 0,1$

Таблиця 1

Максимальні значення радіусів зон руйнування гірського масиву $R_{\max}$ залежно від коефіцієнта зниження міцності $K_{\text{сп}}$

$K_{\text{сп}}$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
$R_{\max}$, м	3,91	3,44	3,03	2,70	2,45	2,27	2,12	2,0	1,90	1,82

Відповідно до наведених табличних значень, побудовано графік залежності максимального значення радіуса зони руйнування $R_{\max}$ від коефіцієнту зниження міцності $K_{\text{сп}}$ гірського масиву Пинязевицького родовища гранітів (рис. 2).

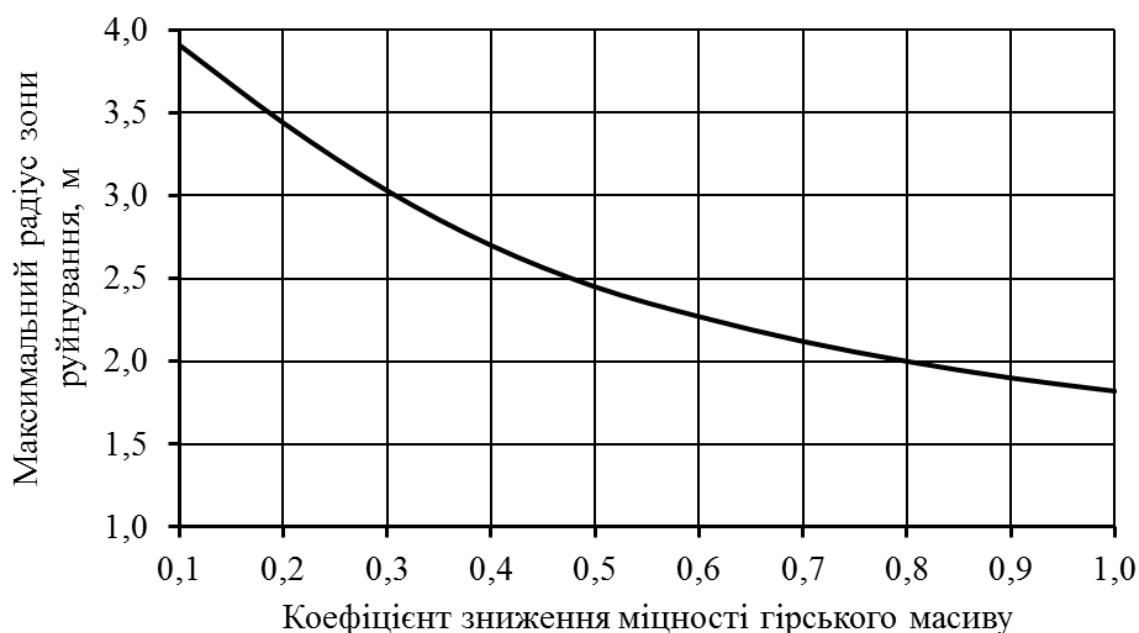


Рис. 2. Значення максимального радіуса зони руйнування $R_{\max}$ від коефіцієнту зниження міцності $K_{\text{сп}}$ гірського масиву

Представлена на рис. 2 залежність апроксимується з високим рівнем достовірності ($R^2 = 0,9999$) поліномом 3-ого ступеня:

$$R_{\max} = -1,9483K_{\text{сп}}^3 + 5,7488K_{\text{сп}}^2 - 6,492K_{\text{сп}} + 4,5107. \quad (8)$$

Як було зазначено вище, коефіцієнт зниження міцності $K_{\text{сп}}$ узагальнив в собі дослідження вітчизняних та закордонних вчених щодо впливу тріщинуватості на загальну міцність гірського масиву, а визначення його рекомендовано виконувати за формулою (7), виходячи зі значення модуля тріщинуватості $K_{\text{т}}$. Отже, якщо у (8) замість $K_{\text{сп}}$ підставити формулу (7), то отримаємо залежність максимального значення радіуса зони руйнування $R_{\max}$ від модуля тріщинуватості. В табл. 2 представлені розрахункові значення цієї залежності, на підставі якої побудована графічна залежність (рис. 3).

Таблиця 2

Значення максимальних радіусів руйнування гірського масиву
при різному модулі тріщинуватості

K_T	0	1	2	3	4	5	6	7
$R_{\max}, \text{м}^3$	1,82	1,98	2,15	2,34	2,52	2,68	2,81	2,89
K_T	8	9	10	11	12	13	14	15
$R_{\max}, \text{м}^3$	2,94	2,97	3,00	3,02	3,07	3,16	3,30	3,55

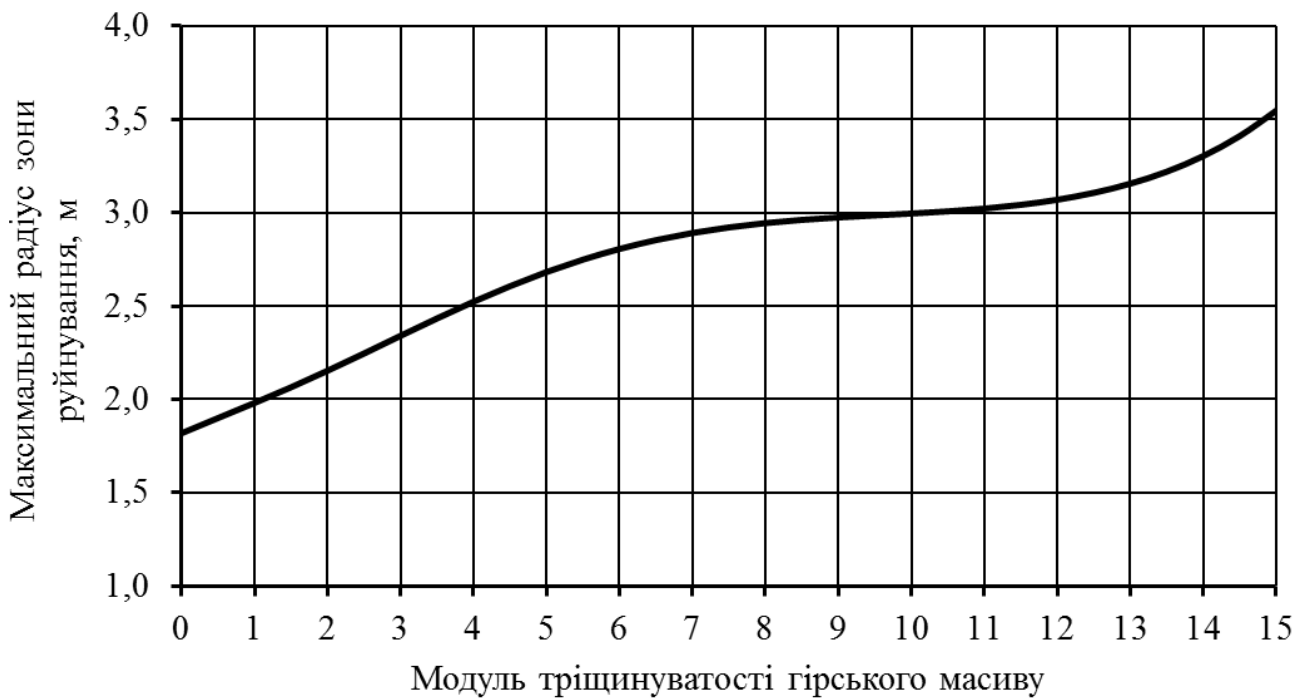


Рис. 3. Графічна залежність максимального радіуса зони руйнування $R_{\max}$ від значень модуля тріщинуватості K_T для умов Пинязевицького родовища гранітів

Аналіз даних табл. 2 та рис. 3 свідчить про те, що для монолітного гірського масиву, при вищенаведених технологічних умовах, максимальне значення радіуса зони руйнування становить 1,82 м, а при модулі тріщинуватості $K_T=10$ (тобто 10 тріщин на 1 м довжини масиву) – $R_{\max}=3,0$ м, тобто зростає у 1,65 раза. При подальшому збільшенні тріщинуватості інтенсивність руйнувань зростає більш суттєво. Графічна залежність рис. 3 найбільш достовірно ($R^2 = 0,9998$) описується аналітичною залежністю

$$R_{\max} = 0,0002 K_T^4 - 0,0043 K_T^3 + 0,0234 K_T^2 + 0,1406 K_T + 1,8182. \quad (9)$$

Висновки. За результатами наукового аналізу попередніх досліджень з питань руйнування тріщинуватих скельних масивів підтверджена різнобічність підходів щодо врахування тріщинуватості у процесі вибухового розпушення гірських порід. Найбільш доцільним, на сьогоднішньому етапі розвитку технологій, може бути комп'ютерне моделювання процесу руйнування тріщинуватого масиву в ANSYS AUTODYN, яке показує відносно достовірні результати.

Автори даної публікації пропонують враховувати вплив ступеню тріщинуватості масиву на результати вибуху, зокрема на максимальний радіус руйнування $R_{\max}$, через узагальнений коефіцієнт зниження міцності гірського масиву $K_{\text{сп}}$, який безпосередньо пов'язаний з модулем тріщинуватості.

При моделюванні в ANSYS AUTODYN вибуху свердловинного заряду Анемікс 70 в гранітах Пинязевицького родовища отримані епюри руйнувань гірського масиву з різним значенням коефіцієнту зниження міцності $K_{\text{сп}}$. Відповідно до представлених даних побудована графічна залежність радіусу зони руйнування $R_{\max}$ від коефіцієнту зниження міцності $K_{\text{сп}}$, яку можна описати з високим рівнем достовірності поліномом 3-ого ступеня (формула 8).

Встановлено, що максимальний радіус зони руйнування ідеального гірського масиву ($K_{\text{сп}} = 1,0$) в 2,15 раза менше за радіус руйнування найслабшого масиву ($K_{\text{сп}} = 0,1$).

Використовуючи аналітичний вираз з визначення коефіцієнту зниження міцності гірського масиву $K_{\text{сп}}$ залежно від модуля тріщинуватості $K_{\text{т}}$, отримані розрахункові дані максимальних радіусів зон руйнування скельного масиву Пинязевицького родовища гранітів $R_{\max}$ при різних значеннях $K_{\text{т}}$, за якими побудована відповідна графічна залежність, що апроксимується найбільш точно поліномом 4-го порядку (формула 9). Отримано, що для монолітного гірського масиву максимальне значення радіусу зони руйнування становить 1,82 м, а для сильнотріщинуватого ($K_{\text{т}} = 10$) – $R_{\max} = 3,0$ м, тобто зростає у 1,65 раза. При подальшому збільшенні модуля тріщинуватості інтенсивність руйнувань зростає більш суттєво.

Представлені результати надають можливість продовжити дослідження у сфері вивчення особливостей та закономірностей руйнування тріщинуватих гірських масивів вибухом циліндричних зарядів для підвищення ефективності буропідричних робіт при видобуванні корисних копалин та будівництві підземних споруд.

Перелік посилань

1. Бойко, В.В., Ган А.Л. & Ган О.В. (2022). *Спеціальні вибухові технології в геоінженерії: монографія*. КПП ім. Ігоря Сікорського. <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/49097>
2. Фролов, О.О. & Моденко, В.Т. (2017). Сучасний стан досліджень механізму руйнування тріщинуватих скельних гірських масивів вибухом. *Матеріали II Міжнародної науково-технічної інтернет-конференції «Інноваційний розвиток гірничодобувної галузі»*, ДВНЗ «КНУ», 17–18. <https://www.knu.edu.ua/storage/files/2/Наука/Конференції/розвиток%202017/tezu.pdf>
3. Novikov, L., Konoval, V., Ishchenko, K., Kinasz, R. & Malieiev, Y. (2023). Quality control of preparation of rock mass explosion in granite open pit. *Geo-Technical Mechanics*, 166, 109–117. <https://doi.org/10.15407/geotm2023.166.109>
4. Chen, Y., Chang, Z., Chao, X. & Zhao, J. (2017). Blasting methods for heterogeneous rocks in hillside open-pit mines with high and steep slopes. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 213, 1–5. <http://doi.org/10.1088/1757-899X/213/1/012006>
5. Фролов, О.О. & Бельтек, М.І. (2020). Визначення радіуса зони вибухового розпушення тріщинуватого скельного гірського масиву при підриванні свердловинного заряду. *Технічна інженерія*, 2(86), 179–184. [http://doi.org/10.26642/ten-2020-2\(86\)-179-184](http://doi.org/10.26642/ten-2020-2(86)-179-184)
6. Моденко, В.Т. (2018). *Удосконалення вибухового руйнування природно порушених масивів гірських порід на кар'єрах* [Маг. Дисертація, 184 Гірництво]. КПП ім. Ігоря Сікорського.

7. Скачков, А.А., Жуков, С.О. & Стріха, В.А (2017). Особливості формування силових полів за вибухового руйнування тріщинуватих анізотропних гірських порід. *Вісник Національного університету водного господарства та природокористування*, 3(79), 32–41. <http://ep3.nuwm.edu.ua/id/eprint/9993>
8. Фролов, О.О. (2010). Використання коефіцієнту інтенсивності напружень для оцінки тріщинуватості гірського масиву при руйнуванні його вибухом свердловинних зарядів. *Вісник Донецького гірничого інституту: Зб. наук. праць*, 2, 247–252. <http://eztuir.ztu.edu.ua/123456789/47>
9. Zhang, P., Bai, R., Sun, X. & Wang, T. (2023). Investigation of Rock Joint and Fracture Influence on Delayed Blasting Performance. *Applied Sciences*, 13(18), 10275. <https://doi.org/10.3390/app131810275>
10. Jia, ZZ., Li, HJ., Li, W., Yan, J. & Wang, XH. (2024). Study on blasting fragmentation mechanism of burnt rock in open-pit coal mine. *Sci Rep* 14, 5034. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-55802-2>
11. *ANSYS Autodyn User's Manual* (2013). Release 15.0. Southpointe, Canonsburg. 502. https://ansyshelp.ansys.com/public/account/secured?returnurl=/Views/Secured/corp/v242/en/wb_adyn/wb_adyn.html
12. Faserova, D. (2006). *Numerical Analyses of Buried Mine Explosions with Emphasis on Effect of Soil Properties on Loading* [PhD Thesis]. Cranfield University. <http://hdl.handle.net/1826/1209>
13. Шашенко, О. (2001). *Механіка гірських порід: навч. посібник*. Національна гірнича академія України.
14. Бельтек, М., & Фролов, О. (2021). Аналіз методик визначення коефіцієнту структурного ослаблення гірського масиву. *Тези VIII Всеукраїнської науково-практичної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених «Перспективи розвитку гірничої справи та раціонального використання природних ресурсів»*, Житомирська політехніка, 8–11.
15. Beltek, M., & Frolov, O. (2023). Determination of the influence of the degree of fracturing of the rock mass on the index of reduction of its strength. *Збірник наукових праць НГУ*, (74), 7–19. <https://doi.org/10.33271/crpnmu/74.007>
16. *Емульсійні вибухові речовини Анемікс. (ТУ У 24.6-31385850-001-2002)*. (2005). ДП «Стандартметрологія».
17. Бельтек, М.І., Ган, О.В. & Фролов, О.О. (2024). Моделювання процесу вибухового руйнування гірських масивів різної міцності в ANSYS AUTODYN. *Збірник наукових праць НГУ*, (78), 18–29. <https://doi.org/10.33271/crpnmu/78.018>

ABSTRACT

Purpose. The purpose of the research is to establish the regularity of the influence of the degree of fracturing of the rock massif on the efficiency of its destruction by explosion of a borehole charge, namely, on the value of the maximum radius of the explosive crushing zone, by modeling the process of rock destruction in ANSYS AUTODYN.

The methods. The complex research methodology was applied, which consists in the scientific analysis of existing research results on the fracture of fractured rock massifs, computer modeling of the process of explosive rock fracture in ANSYS AUTODYN, graphical and analytical establishment of dependencies of the influence of the fracture modulus of the massif on the maximum radius of the explosive fracture zone.

Findings. According to the results of modeling in ANSYS AUTODYN the explosion of borehole charge Anemix 70 in granites of Pinyazevitsky deposit, the epiphyses of rock mass destruction with different value of strength reduction factor were obtained. The graphical dependence of the maximum radius of the fracture zone on the strength reduction factor, which can be described with a high level of reliability by a polynomial of the 3rd degree, has been constructed.

It is established that the maximum radius of the fracture zone of an ideally strong massif is 2,15 times less than the radius of fracture obtained by explosion in a maximally weakened massif.

Numerical values of maximum radii of fracture zones in granite massif at different indices of fracture modulus have been calculated and the corresponding graphical dependence, which is most accurately approximated by a polynomial of the 4th order, has been obtained. It is established that for monolithic massif the maximum value of radius in these conditions is 1,82 m, and for strongly fractured massif – 3,0 m, i.e. it increases in 1,65 times. With further increase of fracture modulus the intensity of fractures increases more significantly.

The originality. Graphical and analytical dependences of the maximum radius of the fracture zone at explosion of a cylindrical charge on the fracture modulus of the rock massif for certain mining and technological conditions have been obtained.

Practical implementation. It is recommended to use the presented researches at designing of drilling and blasting operations in fractured rocky rock massifs for increase of degree of reliability of results of explosion.

Keywords: *rock massif, explosion, computer modeling, ANSYS AUTODYN, fracture modulus, cylindrical charge, fracture epuple, radius of fracture zone.*