

О.О. Фролов, д.т.н., доц.
Національний технічний університет України «КПІ»
В.В. Котенко, к.т.н., доц.
Житомирський державний технологічний університет

ЛАБОРАТОРНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ХВИЛЬ НАПРУЖЕНЬ ПІД ЧАС ВИБУХУ НА ПАРАМЕТРИ РУЙНУВАННЯ МОДЕЛІ

Обґрунтована правомірність використання моделювання за допомогою методу еквівалентних матеріалів для натурального об'єкта (залізистий кварцит) та моделі з сургучу з дотриманням основних критеріїв подібності (міцнісний критерій моделювання та критерій подібності Коші) для вивчення впливу дії вибуху циліндричного заряду на параметри зони руйнування. На основі серії проведених експериментів встановлено необхідну й достатню кількість вимірювань для визначення зони руйнування під час вибуху окремого заряду. Отримані теоретичні та експериментальні залежності зміни напруження в часі у процесі підривання шпурових зарядів у моделі з сургучу та встановлена взаємна ідентичність характеру їхньої зміни. Розраховані максимальні значення напружень у точках спостереження на межі заряду з середовищем і на відстанях рівних 25 та 46 радіуса шпурового заряду. Визначено, що максимальне значення тиску становить близько 9,8 МПа (74 500 мм рт. ст.) при часі 0,045 мс, а розрахункове максимальне значення напруження становить 8,8 МПа при часі 0,042 мс, тобто розбіжність результатів не перевищує 10 %. Характер зміни вимірюваної залежності є аналогічним до розрахункової залежності.

Ключові слова: моделювання; критерії подібності; циліндричний заряд; хвиля напружень; напруження; параметри руйнування.

Вступ. Постановка проблеми. Під час вивчення дії вибуху в скельних гірських породах зазвичай застосовується моделювання. Чисельне або теоретичне моделювання дозволяє отримати лише так звані «передбачувані» результати вибуху, які не завжди або не повною мірою відображають реальні результати руйнування. Тому для підтвердження теоретичних результатів необхідно проводити експериментальні лабораторні або полігонні дослідження [4].

Згідно з [1], вивчаючи закономірності поширення хвиль напружень та їх дії на середовище, доцільно застосовувати моделювання за допомогою методу еквівалентних матеріалів. Для отримання достовірних даних достатньо використати: геометричний критерій подібності; рівність міцнісних та пружних властивостей середовищ; критерій Коші.

Для моделювання дії вибуху свердловинного заряду ВР в лабораторних умовах обрано руйнування моделі з сургучу шпуровими зарядами ТЕНу, оскільки він володіє, за швидкого динамічного навантаження (відповідає навантаженню під час вибуху), крихкістю, яка притаманна скельним гірським породам [2]. Це дозволяє оцінювати дію вибуху на навколишнє середовище та визначати параметри зони руйнування, що є **метою** даних досліджень.

Викладення матеріалу досліджень. Відповідно до геометричного критерію подібності всі лінійні величини, що характеризують представлений вибух, належать до відповідних радіусів зарядів, мають бути однакові для моделі та для природи. У натурних умовах використовуються: радіус заряду $R_c = 125$ мм; довжина свердловини $L_c = 1500$ мм; довжина заряду $l_{зар} = 1000$ мм; довжина забійки $l_{заб} = 500$ мм. У цьому разі геометричні співвідношення дорівнюють:

$$L_c/R_c = 1500/125 = 12; l_{зар}/R_c = 1000/125 = 8; l_{заб}/R_c = 500/125 = 4. \quad (1)$$

З урахуванням геометричного критерію та у разі вибору радіусу шпуру в моделі $R_c = 2,5$ мм усі інші параметри заряду дорівнюватимуть: довжина шпуру $L_{ш} = 30$ мм; довжина заряду $l_{зар} = 20$ мм; довжина забійки $l_{заб} = 10$ мм. У цьому разі маса шпурового заряду ТЕНу становитиме 373 мг.

Під час застосування критерію міцності моделююче середовище повинне мати однакові з натурними умовами коефіцієнт Пуассона, відносні граничні деформації об'єму та зсуву. Характеристики міцності можуть бути різними, але їх відношення до модуля пружності мають бути такими, як і для середовища.

Для залістистого кварциту, що є об'єктом руйнування на кар'єрі, характерні наступні фізико-механічні властивості: щільність породи $\rho = 3100$ кг/м³; критичне значення напруження руйнування на розтягнення $\sigma_r = 1,8 \cdot 10^7$ Па; критичне значення напруження руйнування на стиснення $\sigma_c = 1,9 \cdot 10^8$ Па; модуль пружності $E = 8,3 \cdot 10^{10}$ Па; коефіцієнт Пуассона $\nu = 0,26$. Фізико-механічні властивості сургучу: щільність $\rho = 1440$ кг/м³; швидкість поширення повздовжньої хвилі $c_l = 2580$ м/с; модуль пружності $E = 0,95 \cdot 10^{10}$ Па; міцність на стиснення $\sigma_c = 16 \cdot 10^6$ Па; міцність на розтягнення $\sigma_p = 0,75 \cdot 10^6$ Па; коефіцієнт Пуассона $\nu = 0,28$.

Відношення характеристик міцності до модуля пружності:

– для магнетитових кварцитів:

$$\sigma_p/E = 1,9 \cdot 10^8 / 8,3 \cdot 10^{10} = 0,23 \cdot 10^{-2}; \quad \sigma_p/E = 1,8 \cdot 10^7 / 8,3 \cdot 10^{10} = 0,22 \cdot 10^{-3}; \quad (2)$$

– для сургучу:

$$\sigma_p/E = 16 \cdot 10^6 / 0,95 \cdot 10^{10} = 0,17 \cdot 10^{-2}; \quad \sigma_p/E = 0,75 \cdot 10^6 / 0,95 \cdot 10^{10} = 0,08 \cdot 10^{-3}. \quad (3)$$

Аналіз наведених співвідношень (2) та (3), а також коефіцієнтів Пуассона для гірської породи та сургучу (відповідно, 0,26 та 0,28) показує, що критерії міцності для натурних умов та для моделі мають один порядок, а для межі міцності на стиснення та коефіцієнта Пуассона майже збігаються. Тому можна стверджувати, що міцнісний критерій моделювання дії вибуху на навколишнє середовище виконується.

Критерій подібності Коші пов'язує пружні та міцнісні характеристики середовища з інерційними силами. Ці співвідношення (число Коші) для середовища та для моделі мають бути однакові, тобто:

$$Ca = \frac{\rho_n \cdot v_n^2}{K_n} = \frac{\rho_m \cdot v_m^2}{K_m}, \quad (4)$$

де ρ_n , ρ_m – щільності середовища в природі та в моделі, відповідно; v_n , v_m – швидкості поширення повздовжніх хвиль напружень у природі та в моделі; K_n , K_m – модулі всебічного стиснення для природи і для моделі, визначаються:

$$K = \frac{(1-2\nu)E}{3}. \quad (5)$$

Відповідно до формули (5) значення модуля всебічного стиснення для залізного кварциту становить $K_n = 1,33 \cdot 10^{10}$, для сургучу – $K_m = 0,14 \cdot 10^{10}$.

Число Коші:

$$\text{– для магнетитових кварцитів: } Ca = \frac{3100 \cdot 4700^2}{1,33 \cdot 10^{10}} = 5,15;$$

$$\text{– для сургучу: } Ca = \frac{1440 \cdot 2580^2}{0,14 \cdot 10^{10}} = 6,85.$$

Порівнюючи числа Коші для моделі та природи, бачимо, що за значеннями вони близькі між собою, тобто критерій Коші також виконується.

Таким чином, отримані співвідношення під час моделювання методом еквівалентних матеріалів для натурального об'єкта (залізистий кварцит) та моделі з сургучу дозволяють стверджувати, що обраний метод моделювання та застосовувані в ньому критерії подібності дозволяють з високою достовірністю описати дію хвиль напружень на гірській масив і на процес його руйнування.

Для встановлення необхідної і достатньої кількості вимірювань проведено серію експериментів у лабораторних умовах з визначення розмірів зони руйнування під час вибуху окремого заряду ВР [3]. Результати досліджень наведено в таблиці 1. З урахуванням розрахунків, виконаних у [4], при значенні надійності $\alpha = 0,9$ кількість вимірювань становитиме $n = 5$. Відповідно до [4] середня квадратична похибка окремого результату вимірювань – 2,12. Оскільки задана надійність результату $\alpha = 0,9$, то табличне значення коефіцієнта Стьюдента дорівнюватиме $t_a(n) = 2,13$. З урахуванням цього, значення похибки становитиме $\Delta a = 2,02$, а коефіцієнт варіації – $v_r = 0,018$.

Обробка результатів вимірювань показує, що всі величини, які характеризують достовірність показників, не мають значних відхилень від середніх значень розмірів зон руйнування і тому є надійними.

Таблиця 1

Розміри зон руйнування в моделях із різними діаметрами шпурів

№ вибуху	Діаметр заряду, мм	Діаметр зони тріщиноутворення, мм	Середній діаметр зони тріщиноутворення, мм	Діаметр зони руйнування, мм	Середній діаметр зони руйнування, мм
1	5,0	169	170	109	108
2	5,0	172		110	
3	5,0	170		106	
4	5,0	174		105	
5	5,0	167		108	

На рисунках 1–3 наведені епюри «напруження–час», які розраховані з використанням математичної моделі, наведеної в [5], відповідно до параметрів шпурового заряду ТЕНу.

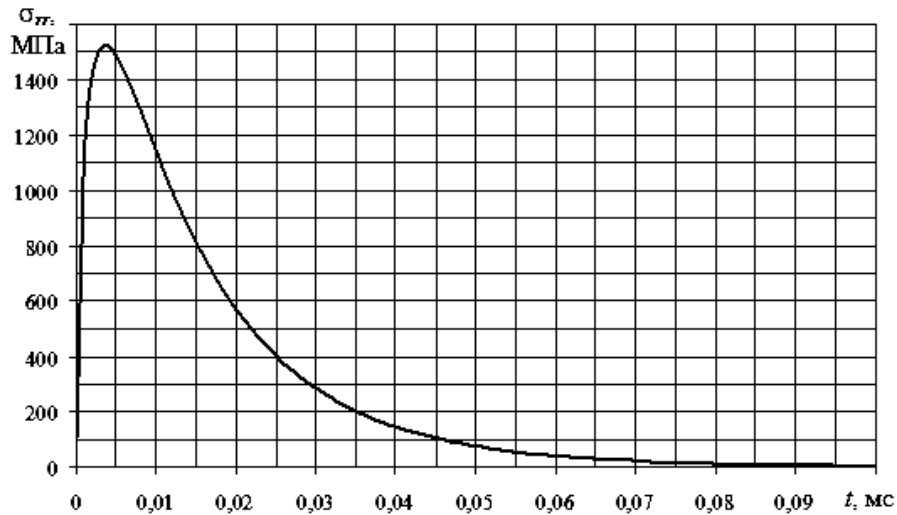


Рис. 1. Розрахункова еюра «напруження–час» біля стінки шпuru

Аналіз рисунка 1 показує, що максимальне значення напруження стиснення на стінці шпuru досягається при 0,003 мс і становить 1520 МПа, що перевищує межу міцності сургучу на стиснення в 95 разів. У подальшому напруження зменшується і після 0,09 мс практично стає рівним нулю.

Еюра на рисунку 2 показує, що на відстані $25 \bar{r}$ (6,25 см) від заряду максимальне значення напруження становить 17 МПа при часі 0,025 мс, що майже дорівнює межі міцності сургучу на стиснення (16 МПа). При цьому слід зазначити, що середній радіус зони руйнування від вибуху, який визначається межею міцності на стиснення, становить 5,4 см. Відсутність напружень у точці заміру спостерігається до 0,02 мс від моменту підірвання шпурового заряду.

На відстані від заряду $46 \bar{r}$ (11,5 см), що відповідає межі моделі сургучу, максимальне значення напруження становить 8,8 МПа при 0,042 мс (рис. 3). До моменту 0,038 мс напруження на межі блока відсутнє, оскільки хвиля ще не дійшла до точки спостереження. Після досягнення максимального значення динаміка зменшення напруження аналогічна попереднім еюрам.

З використанням програмного забезпечення «PowerGraph 3.3» та аналого-цифрового перетворювача Е-440 проведені заміри значень тиску на бічній поверхні моделі з сургучу. Датчик тиску PS 02-01 розміщується на відстані від шпuru – $46 \bar{r}$. У результаті підірвання шпурового заряду в модельному середовищі отримано залежність зміни тиску в часі (рис. 4).

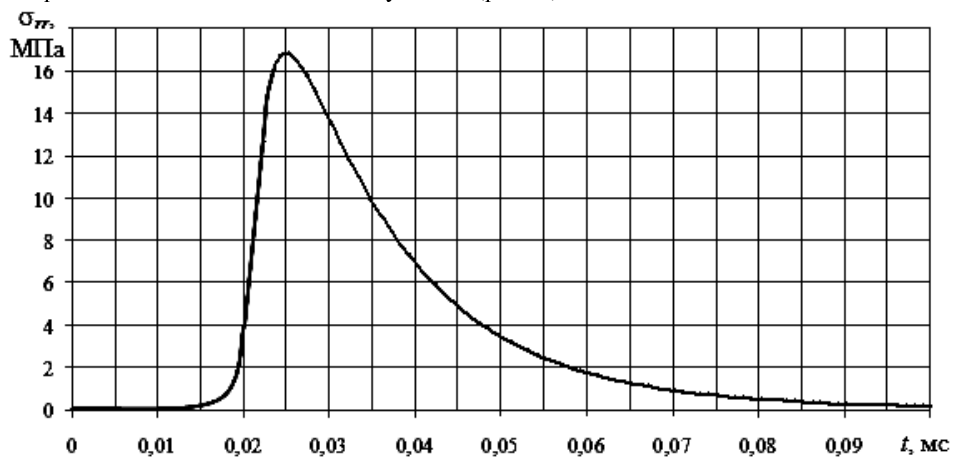


Рис. 2. Розрахункова еюра «напруження–час» на відстані 25 радіусів шпурового заряду

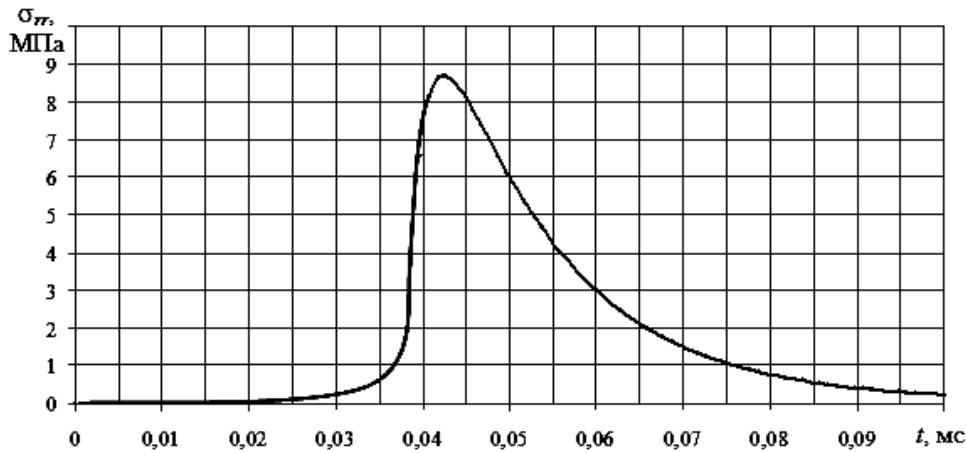


Рис. 3. Розрахункова еюра «напруження–час» на відстані 46 радіусів шпурового заряду

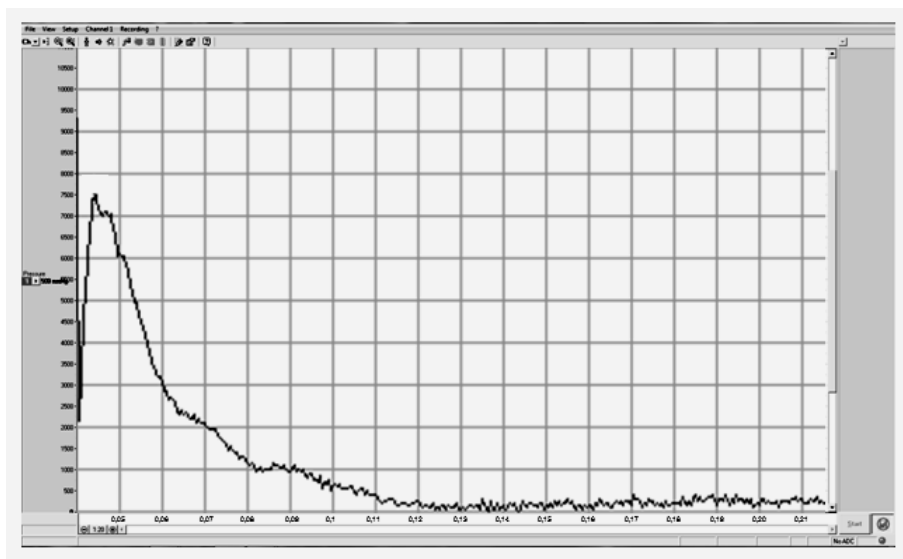


Рис. 4. Експериментальна залежність зміни тиску в часі за умови розташування датчика тиску на відстані 46 радіусів шпурового заряду

Аналіз залежності показує, що максимальне значення тиску становить близько 9,8 МПа (74 500 мм рт. ст.) при часі 0,045 мс. Слід зазначити, що розрахункове максимальне значення напруження становить 8,8 МПа при часі 0,042 мс, тобто розбіжність результатів не перевищує 10 %. Характер зміни вимірної залежності є аналогічним до розрахункової залежності.

Таким чином, розрахункові та експериментальні залежності зміни напруження в часі показують, що моделювання дії вибуху циліндричного заряду в сургучу підтверджує основні закономірності поширення хвиль напружень у скельному середовищі та дозволяє достовірно оцінити основні параметри руйнування.

Висновки:

1. Обґрунтована правомірність використання моделювання за допомогою методу еквівалентних матеріалів з дотриманням основних критеріїв подібності (геометричний критерій подібності, рівність міцнісних та пружних властивостей середовищ та критерій Коші) для вивчення впливу дії вибуху одиночного циліндричного заряду на параметри зони руйнування (середня квадратична похибка окремого результату вимірювань – 2,12; похибка – 2,02 мм; коефіцієнт варіації – 0,018).

2. Отримані теоретичні та експериментальні залежності епюр «напруження–час» у процесі підривання шпурових зарядів ТЕНу в моделі з сургучу та встановлено ідентичність характеру їхньої зміни.

3. При знаходженні точок спостереження на межі заряду з середовищем максимальні розрахункові значення напруження становлять 1520 МПа; на відстані $25\bar{r}$ – 17 МПа; на відстані $46\bar{r}$ – 8,8 МПа. Руйнуюче значення напруження становить 16 МПа.

4. Максимальне значення тиску в результаті підривання шпурового заряду в модельному середовищі становить близько 9,8 МПа (74 500 мм рт. ст.), тобто розбіжність із теоретичним результатом не перевищує 10 %.

Список використаної літератури:

1. *Боровиков В.А.* Моделирование действия взрыва при разрушении горных пород / *В.А. Боровиков, И.Ф. Ванягин.* – М. : Недра, 1990. – 231 с.
2. *Аксель А.М.* Направленный раскол крепких горных пород гидроимпульсными устройствами / *А.М. Аксель, Ю.Н. Бабин, Ю.Е. Звонков* // Взрывное дело. – М., 1986. – № 89/46. – С. 166–173.
3. Повышение эффективности действия взрыва в твердой среде / *В.М. Комир, В.М. Кузнецов, В.В. Воробьев и др.* – М. : Недра, 1988. – 209 с.
4. *Фролов О.О.* Керування енергетичними потоками при вибуховому руйнуванні різномісних масивів гірських порід на кар'єрах : дис. ... докт. техн. наук : 05.15.03 / *О.О. Фролов.* – К., 2014. – 369 с.
5. *Фролов О.О.* Особливості розрахунку об'єму руйнування скельних порід під час вибуху свердловинного заряду з урахуванням хвиль напружень / *О.О. Фролов* // Вісник НТУУ "КПІ" / Серія : Гірництво : зб. наук. праць. – 2006. – Вип. 14. – С. 93–101.

ФРОЛОВ Олександр Олександрович – доктор технічних наук, доцент кафедри геобудівництва та гірничих технологій Національного технічного університету України “КПІ”.

Наукові інтереси:

- вибухові роботи;
- гірництво.

Тел.: (044) 406–80–08.

КОТЕНКО Володимир Володимирович – кандидат технічних наук, доцент, декан гірничо-екологічного факультету, доцент кафедри маркшейдерії Житомирського державного технологічного університету.

Наукові інтереси:

- маркшейдерія;
- гірництво;
- технологія розробки покладів декоративного каменю.

Стаття надійшла до редакції 25.09.2014