

О.О. Фролов, д.т.н, проф., **Т.В. Косенко**, ст. викл., **В.З. Ващук**, аспірант (НТУУ «КПІ»)

ДОСЛІДЖЕННЯ РОЗПОДІЛУ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПОТОКІВ ВИБУХІВ ПРИ РУЙНУВАННІ МОДЕЛЬНОГО СЕРЕДОВИЩА

A.A. Frolov, **T.V. Kosenko**, **V.Z. Vashchuk** (National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute»)

STUDY OF THE DISTRIBUTION OF ENERGY FLOWS OF EXPLOSIONS IN THE PROCESS OF DESTRUCTION OF THE MODEL MEDIUM

Обґрунтовано правомірність використання моделювання за допомогою методу еквівалентних матеріалів для вивчення закономірностей розподілу енергетичних потоків вибуху в суцільних твердих середовищах. Отримані розрахункові графічні залежності зміни щільності потоку енергії вибуху у часі при підриванні шпурових зарядів в моделі з сургучу та максимальні значення щільності потоку енергії при знаходженні точок спостереження на межі заряду з середовищем та на межі модельного блоку. Встановлено, що характер зміни щільності енергетичного потоку є аналогічним до характеру зміни напруження на стиснення у часі.

Ключові слова: вибух; середовище; енергетичний потік; напруження; моделювання; шпуровий заряд.

Обосновано правомерность использования моделирования при помощи метода эквивалентных материалов для изучения закономерностей распределения энергетических потоков взрыва в сплошных твердых средах. Получены расчетные графические зависимости изменения плотности потока энергии взрыва во времени при взрывании шпуровых зарядов в модели из сургуча и максимальные значения плотности потока энергии при нахождении точек наблюдения на границе заряда со средой и на границе модельного блока. Установлено, что характер изменения плотности энергетического потока является аналогичным характеру изменения напряжения на сжатие во времени.

Ключевые слова: взрыв; среда; энергетический поток; напряжение; моделирование; шпуровой заряд.

To study the patterns of distribution of energy flows of explosion in solid media it was proved the legitimacy of the use of simulation by the method of equivalent materials. The resulting design graphs of relation of explosion energy flux density over time at borehole blasting charges in the wax model and maximum energy flow while in observation points on the border between charge and medium and on the edge of the block model. It was established that the nature of the change in density of the energy flow is similar to the character of changes of compression and stress at the time.

Keywords: blast; medium; energy flow; compression; modelling; borehole blasting charge.

Вступ. При поширенні хвилі в просторі від будь-якого джерела відбувається також і поширення енергії, оскільки частинки середовища, які беруть участь в коливальному русі, отримують енергію від хвилі [1]. Згідно [2]

енергетичним потоком вважається певна кількість енергії, що переноситься через елементарну площину за одиницю часу. При розгляді дії вибуху в середовищі доведено, що енергетичний потік вибуху є прямо пропорційним напруженню σ , що виникає в скельному гірському масиві при проходженні хвилі напружень, та швидкості зміщення часток середовища v , в якому поширюється дана хвиля [3]:

$$U = \int_S \sigma v dS = \sigma v \int_S dS. \quad (1)$$

Оскільки швидкості зміщення часток середовища для скельних масивів мають невисокі значення, які набагато менші за швидкості поширення хвиль напружень, то формування енергетичних потоків вибухів при руйнуванні гірських порід будуть визначатися насамперед напруженнями, що утворюються в масиві при підриванні свердловинних зарядів вибухових речовин (ВР).

Енергетичний потік в різних точках поверхні S може мати різну інтенсивність, яка характеризується щільністю потоку енергії, тобто потоку енергії U через одиничну поверхню площадки, яка перпендикулярна до напрямку переносу енергії [3]:

$$j = \frac{dU}{dS}. \quad (2)$$

Для описання дії енергетичного потоку в твердих середовищах зазвичай використовують щільність потоку енергії.

Одним із методів вивчення дії енергії вибуху в середовищі є моделювання. За результатами теоретичного моделювання можна лише отримати передбачувані результати, які не завжди або не в повній мірі відображають реальну картину руйнування середовища енергетичними потоками вибуху. Тому для підтвердження теоретичних результатів необхідно проводити експериментальні дослідження на моделях.

Метою роботи є вивчення закономірностей розподілу енергетичних потоків вибуху при руйнуванні модельних середовищ.

Результати досліджень. При вивченні закономірностей поширення енергетичних потоків та їхньої дії на середовище доцільно застосовувати моделювання за допомогою методу еквівалентних матеріалів [4]. Для отримання достовірних даних достатньо і необхідно застосувати: геометричний критерій подібності; рівність міцнісних та пружних властивостей середовищ; критерій Коші.

Для моделювання дії вибуху свердловинного заряду ВР в лабораторних умовах в роботі [5] рекомендовано використовувати моделі з сургучу, оскільки такий матеріал має, при швидкому динамічному навантаженні (відповідає навантаженню при вибуху), певну крихкість, яка притаманна скельним

породам. Це дозволяє кількісно та якісно оцінювати дію вибуху на оточуюче середовище та визначати параметри зони руйнування.

Згідно геометричного критерію подібності всі лінійні величини, що характеризують представлений вибух, віднесені до відповідних радіусів зарядів, повинні бути однакові для моделі і для природи. В умовах виробництва використовуються наступні параметри: радіус заряду $R_c = 125$ мм; довжина свердловини $L_c = 1500$ мм; довжина заряду $l_{зар} = 1000$ мм; довжина забійки $l_{заб} = 500$ мм. В цьому разі геометричні співвідношення дорівнюють:

$$\frac{L_c}{R_c} = \frac{1500}{125} = 12; \quad \frac{l_{зар}}{R_c} = \frac{1000}{125} = 8; \quad \frac{l_{заб}}{R_c} = \frac{500}{125} = 4 \quad (3)$$

З урахуванням співвідношень геометричного критерію (5) та у випадку вибору радіусу шпуру в моделі $R_c = 2,5$ мм всі інші параметри заряду будуть дорівнювати: довжина шпуру $L_{ш} = 30$ мм; довжина заряду $l_{зар} = 20$ мм; довжина забійки $l_{заб} = 10$ мм. В якості ВР був застосований ГЕН.

При оцінці за критерієм міцності моделююче середовище повинне мати однакові з натурними умовами коефіцієнт Пуассона, відносні граничні деформації об'єму та зсуву. Характеристики міцності моделі можуть бути різними, але їх відношення до модуля пружності повинні бути такими, як і для гірської породи.

Фізико-механічні властивості сургучу наступні: 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 $\nu = 0,28$.

Для магнетитового кварциту, що використовується при вивченні дії вибуху в середовищі, характерні наступні фізичні властивості: щільність породи $\rho = 3100$ кг/м³; критичне напруження руйнування на розтягнення $\sigma_p = 1,8 \cdot 10^7$ Па; критичне напруження руйнування на стиснення $\sigma_c = 1,9 \cdot 10^8$ Па; модуль пружності $E = 8,3 \cdot 10^{10}$ Па; коефіцієнт Пуассона $\nu = 0,26$.

Відношення характеристик міцності до модуля пружності:

– для сургучу:

$$\frac{\sigma_c}{E} = \frac{1,6 \cdot 10^6}{0,95 \cdot 10^{10}} = 0,17 \cdot 10^{-2}; \quad \frac{\sigma_p}{E} = \frac{0,75 \cdot 10^6}{0,95 \cdot 10^{10}} = 0,08 \cdot 10^{-3} \quad (4)$$

– для магнетитових кварцитів:

$$\frac{\sigma_c}{E} = \frac{1,9 \cdot 10^8}{8,3 \cdot 10^{10}} = 0,23 \cdot 10^{-2}; \quad \frac{\sigma_p}{E} = \frac{1,8 \cdot 10^7}{8,3 \cdot 10^{10}} = 0,22 \cdot 10^{-3} \quad (5)$$

Результати аналізу (4) та (5), а також коефіцієнтів Пуассона для магнетитових кварцитів та сургучу (відповідно, 0,26 та 0,28) показують, що критерії по міцності для натурних умов та для моделі мають один порядок, а для межі міцності на стиснення і коефіцієнту Пуассона майже збігаються. Тому

можна стверджувати, що міцнісний критерій моделювання дії вибуху на навколишнє середовище виконується.

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

$$Ca = \frac{\rho_n v_n^2}{K_n} = \frac{\rho_m v_m^2}{K_m}, \quad (6)$$

де ρ_n, ρ_m – щільності середовища в натурі і в моделі, відповідно; v_n, v_m – швидкості поширення повздовжніх хвиль напружень в натурі і в моделі; K_n, K_m – модулі всебічного стиснення для натурі і для моделі.

Згідно (6) число Коші для магнетитових кварцитів дорівнює $Ca=5,15$, для сургучу – $Ca=6,85$, тобто за значеннями вони близькі між собою і критерій Коші в цілому виконується.

Дотримання вищезазначених критеріїв подібності дозволяє стверджувати, що за допомогою моделювання методом еквівалентних матеріалів можна з високою достовірністю описати дію енергетичних потоків вибухів на гірський масив та процес його руйнування при вибуху подовжених зарядів ВР. Для оцінки дії енергетичного потоку вибуху одиночного заряду ВР була використана модель з сургучу розмірами $230 \times 230 \times 60$ мм. Результати досліджень в лабораторних умовах по визначенню розмірів зони руйнування при вибуху окремого заряду ВР наведено в табл. 1.

Таблиця 1

Розміри зон руйнування та значення щільності потоків енергії в моделях

№ вибуху	Діаметр заряду, мм	Радіус зони руйнування, мм	Середній радіус зони руйнування, мм	Максимальне значення щільності потоку енергії, ГВт/м ² , на межі	
				заряду з блоком	моделі ($46 \bar{r}$)
1	5,0	54	54	623	0,0204
2		55			
3		53			
4		53			
5		54			

Обробка результатів вимірювань показала, що всі величини, які характеризують достовірність показників, не мають значних відхилень від середніх значень розмірів зон руйнування і тому є надійними [6].

На рис. 1-3 наведені зміни щільності потоку енергії j у часі t , які розраховані за формулою (1) з використанням математичної моделі, наведеної в [7] та алгоритму розрахунку, представленого в [6], у відповідності до параметрів шпурового заряду ТЕНу.

На рис. 1 наведена зміна щільності потоку енергії j у часі t на межі шпурового заряду ТЕНу з моделюючим середовищем.

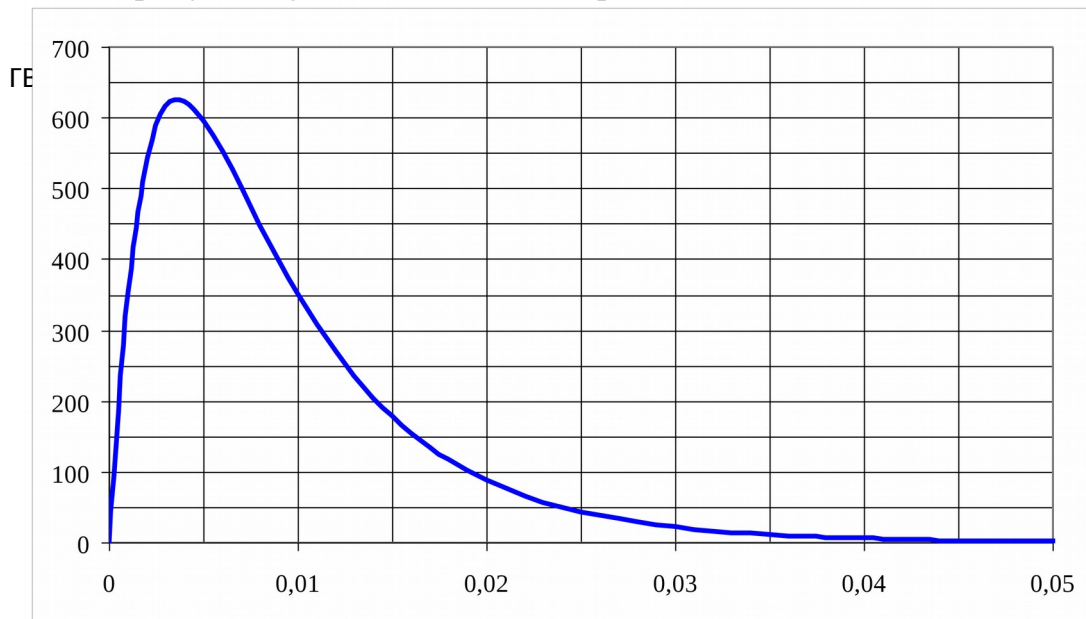


Рис. 1. Залежність зміни щільності потоку енергії j від часу t на межі шпурового заряду ТЕНу з моделюючим середовищем

Аналіз рис. 1 показує, характер зміни щільності енергетичного потоку є аналогічним до характеру зміни епюри «напруження-час», що підтверджує факт формування енергетичного потоку вибуху хвильовим полем напружень [8]. Максимальне значення щільності потоку енергії становить 623 ГВт/м².

На рис. 2 та 3 наведені графічні залежності зміни щільності потоку енергії j від часу в моделюючому середовищі на відстані 25 та 46 \bar{r} ($\bar{r} = r / r_3$, де r_3 – радіус заряду) відповідно. Максимальні значення щільності потоку енергії становлять на відстані 25 \bar{r} 0,076 ГВт/м², на відстані 46 \bar{r} – 0,0204 ГВт/м². Характер їх зміни також є однаковий в порівнянні з епюрами «напруження-час» для таких же відстанях до точки спостереження.

Аналіз отриманих залежностей зміни щільності потоку енергії у часі показують, що моделювання дії вибуху циліндричного заряду в сургучу підтверджує основні закономірності поширення енергетичних потоків в пружному середовищі, та дозволяє достовірно оцінити основні параметри вибухового руйнування.

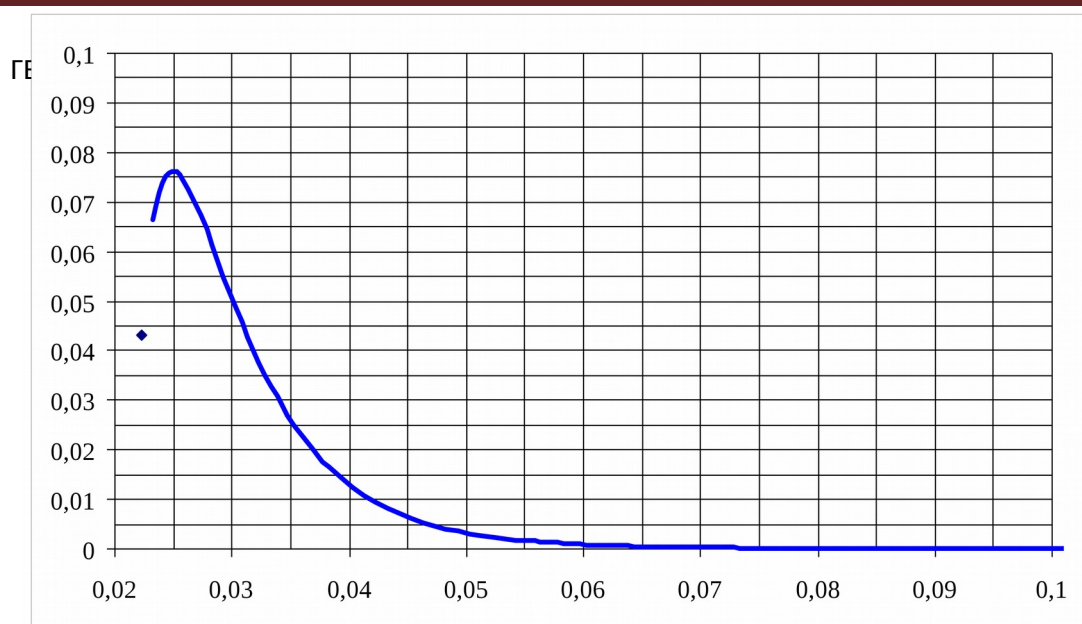


Рис. 2. Залежність зміни щільності потоку енергії j від часу t в моделюючому середовищі на відстані 25 радіусів шпурового заряду

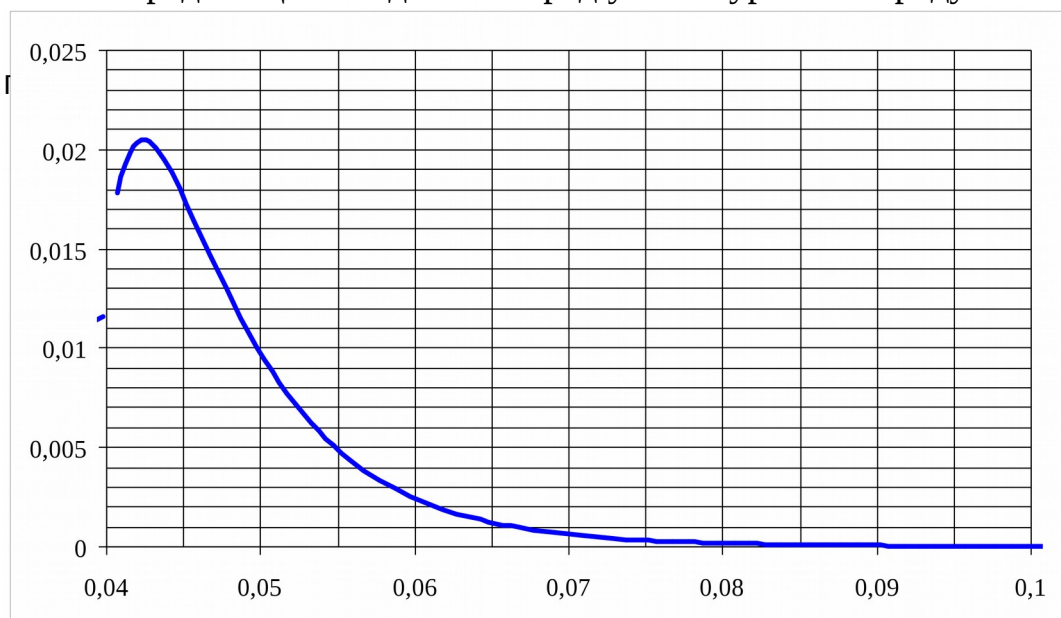


Рис. 3. Залежність зміни щільності потоку енергії j від часу t в моделюючому середовищі на відстані 46 радіусів шпурового заряду

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 енергетичного потоку вибуху одиночного циліндричного заряду на параметри зони руйнування.

2. Отримані графічні залежності зміни щільності потоку енергії вибуху у часі при підіриванні шпурових зарядів ТЕНу в моделі з сургучу та встановлено

ідентичність характеру їхньої зміни епюрам «напруження-час», що підтверджує факт формування енергетичного потоку вибуху та його параметрів хвильовим полем напружень.

3. При знаходженні точок спостереження на межі заряду з середовищем максимальні значення щільності потоку енергії становлять 623 ГВт/м^2 ; на відстані $25 \bar{r} - 0,076 \text{ ГВт/м}^2$; на відстані $46 \bar{r} - 0,0204 \text{ ГВт/м}^2$ відповідно. При цьому руйнуючі значення щільності потоку енергії в модельному середовищі з сургучу становлять $0,069 \text{ ГВт/м}^2$.

Список використаних джерел

1. Бухштаб, М. А. Поток излучения [Текст] // Физическая энциклопедия / Гл. ред. А. М. Прохоров. – М.: Большая Российская энциклопедия, 1994. – Т. 4. – 704 с.

2. Парфенов, А.Г. Колебания и волны: учебник для студентов вузов [Текст] / А.Г. Парфенов. – Томск, 2000. – <http://koi.tspu.ru/wales>.

3. Иродов, И. Е. Волновые процессы. Основные законы [Текст] / И.Е. Иродов. – М.: Лаборатория базовых знаний, 1999. – 256 с.

4. Боровиков, В. А. Моделирование действия взрыва при разрушении горных пород [Текст] / В. А. Боровиков, И. Ф. Ванягин. – М.: Недра, 1990. – 231 с.

5. Аксель, А. М. Направленный раскол крепких горных пород гидроимпульсными устройствами [Текст] / А. М. Аксель, Ю. Н. Бабин, Ю. Е. Звонков // Взрывное дело. – М., 1986. – №89/46. – С. 166-173.

6. Фролов, О. О. Керування енергетичними потоками при вибуховому руйнуванні різноміцнісних масивів гірських порід на кар'єрах [Текст]/ Дис. ... докт. техн. наук: 05.15.03. – К., 2014. – 369 с.

7. Фролов, О. О. Особливості розрахунку об'єму руйнування скельних порід під час вибуху свердловинного заряду з урахуванням хвиль напружень [Текст] / О. О. Фролов // «Вісник НТУУ «КПІ»: зб. наук. праць. – К.: ВПК «Політехніка», 2006. – Вип. 14. – С. 93 – 101. – (Серія «Гірництво»).

8. Фролов, О.О. Лабораторні дослідження впливу хвиль напружень під час вибуху на параметри руйнування моделі [Текст] / О.О. Фролов, В.В. Котенко // Вісник ЖДТУ / Технічні науки. – 2014. – №3(70). – С. 124-1128.

Стаття надійшла до редакції 20.04.2016 р.