ОПИС ФОРМИ, РОЗПОВСЮДЖЕННЯ ТА ПОГЛИНАННЯ ВИБУХОВОГО ІМПУЛЬСУ В ГІРСЬКОМУ МАСИВІ

А. І. Крючков, А. І. Бахтин

НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

просп. Перемоги, 37, м. Київ, 03056, Україна. E-mail: at_bahtin@i.ua

У ході аналітичних та експериментальних досліджень розроблено математичні вирази для опису розвитку напруження в часі при пластичних та пружних деформаціях за єдиною аналітичною залежністю. Встановлено закономірність зміни імпульсу хвилі деформації в часі та закономірність зміни імпульсу з відстанню від джерела вибуху, які дозволяють оцінити поглинання енергії пружних хвиль деформації масивом гірських порід при проведенні масових вибухів на кар'єрах.

Ключові слова: напруження гірського масиву, пластична деформація, пружна деформація, імпульс хвилі деформації, вибуховий заряд.

ОПИСАНИЕ ФОРМЫ, РАСПРОСТРАНЕНИЯ И ПОГЛОЩЕНИЯ ВЗРЫВНОГО ИМПУЛЬСА В ГОРНОМ МАССИВЕ

А. И. Крючков, А. И. Бахтин

НТУУ «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»

просп. Победы, 37, г. Киев, 03056, Украина. E-mail: at_bahtin@i.ua

В ходе аналитических и экспериментальных исследований разработаны математические выражения для описания развития напряжения во времени при пластических и упругих деформациях за единственной аналитической зависимостью. Установлена закономерность изменения импульса волны деформации во времени и закономерность изменения импульса с расстоянием от источника взрыва, которые позволяют оценить поглощение энергии упругих волн деформации массивом горных пород при проведении массовых взрывов на карьерах.

Ключевые слова: напряжение горного массива, пластическая деформация, упругая деформация, импульс волны деформации, взрывной заряд.

АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ. Актуальним питанням є встановлення сейсмоакустичних, пружно-деформаційних та міцнісних властивостей гірських порід через вивчення особливостей проходження пружних хвиль.

За даними чисельних наукових досліджень відомо, що основним руйнуючим фактором є вибухова хвиля, яка в гірському масиві переходить у хвилю деформації [1–5].

В більшості випадків аналітичний опис імпульсу напруження в гірському масиві зводиться до кусково-лінійної апроксимації. Здебільшого для оцінки напруження в масиві гірських порід окремо визначається напруження при пружній та пластичній деформаціях. Окрім того, ділянки наростання і спадання напру-

ження розглядаються, як лінійні залежності, що суперечить дійсності і призводить до похибок.

Вибух заряду вибухової речовини (ВР) моделює певний невеликий землетрус, епіцентр якого знаходиться в місці закладання заряду. Під дією вибухового імпульсу в породі виникає ударна хвиля, напруження в якій зі збільшенням відстані від центра заряду різко знижується. На невеликій відстані від заряду формуються зони пластичних та пружних деформацій.

Динаміка деформування відрізняється врахуванням інерційних сил, що у всіх випадках призводить до суттєвої залежності деформацій і напружень в часі.

Метою дослідження є розробка аналітичного виразу для опису наростання і затухання імпульсу хвилі деформації в часі єдиною залежністю та встановлення закономірності зміни імпульсу з відстанню від джерела вибуху.

МАТЕРІАЛ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ. Провівши аналіз наукових і експериментальних даних [6, 7], нами запропонований математичний вираз для опису імпульсу напруження:

$$\sigma(t) = \sigma_1(t) + \sigma_2(t), \quad (1)$$

де $\sigma_1(t)$ – розвиток імпульсу напруження в часі при пружній деформації, МПа; $\sigma_2(t)$ – розвиток імпульсу напруження в часі при пластичній деформації, МПа; $\sigma_1(t)$ та $\sigma_2(t)$ розраховуються за формулами:

$$\sigma_1(t) = \sigma_{m1} \cdot \exp\left(\frac{t_{m1}-t}{t_{01}}\right) \cdot \exp\left[-\exp\left(\frac{t_{m1}-t}{t_{01}}\right)\right], \quad (2)$$

$$\sigma_2(t) = \sigma_{m2} \cdot \left[1 - \exp\left(\frac{t_{m2}-t}{t_{02}}\right)\right]. \quad (3)$$

де σ_{m1} , σ_{m2} – максимальні напруження для пружних та пластичних деформацій відповідно при часі t_{m1} та t_{m2} , МПа; t_{01} та t_{02} – сталі часу наростання, мкс.

Для експериментального підтвердження виразу (1) проведені розрахунки, що підтверджують математичний опис напруження на різних відстанях від джерела вибуху. Для розрахунків використані експериментальні дані [6] для зони пружних коливань і масою заряду ВР 226 та 400 г.

Обробка експериментальних даних [6, 7, 8] дозволила встановити параметри які характеризують цю породу (табл. 1).

На рис. 1 та 2 представлені результати розрахунку по експериментальних даних залежності напруження від часу для зарядів масою $Q_{ВР}=226$ г та $Q_{ВР}=400$ г на відстані 70R та 75R відповідно.

Аналогічні розрахунки проведені для інших відстаней від джерела вибуху.

**ТЕОРЕТИЧНІ Й ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ
ПРОЦЕСІВ РУЙНУВАННЯ ГІРСЬКИХ ПОРІД ВИБУХОМ**

Таблиця 1 – Розрахункові параметри

Відстань від джерела вибуху (R – радіус заряду ВР)	σ_{m1} , МПа	σ_{m2} , МПа	t_{m1} , мкс	t_{m2} , мкс	t_{01} , мкс	t_{02} , мкс
$Q_{BP} = 226$ г						
70·R	5,55	0,105	170	0	100	100
120·R	1,95	0,049	245	0	140	100
150·R	0,9	0,1	335	0	185	100
200·R	0,18	0,048	390	0	145	100
$Q_{BP} = 400$ г						
75·R	4,7	0,15	210	0	135	100
93,5·R	2,6	0,283	260	0	125	100
156·R	0,73	0,18	360	0	305	100
187·R	0,5	0,12	470	0	250	100

Рисунок 1 – Залежності напруження від часу для зарядів масою $Q_{BV}=226$ г на відстані 70R: 1 – розвиток імпульсу напруження в часі при пластичній деформації, розрахований за рівнянням (3); 2 – розвиток імпульсу напруження в часі при пружній деформації, розрахований за рівнянням (2); 3 – сумарний імпульс напруження гірського масиву в зоні пружних коливань, розрахований за рівнянням (1); 4 – експериментальні дані [6]

Рисунок 2 – Залежності напруження від часу для зарядів масою $Q_{BB}=400$ г на відстані 75R: 1 – розвиток імпульсу напруження в часі при пластичній деформації, розрахований за рівнянням (3); 2 – розвиток імпульсу напруження в часі при пружній деформації, розрахований за рівнянням (2); 3 – сумарний імпульс напруження гірського масиву в зоні пружних коливань, розрахований за рівнянням (1); 4 – експериментальні дані [6]

Таким чином напруження хвилі деформації в масиві від масового вибуху адекватно описується аналітичним виразом, який дозволяє встановити значення параметрів імпульсу на будь-якій відстані від джерела. При збільшенні маси заряду ВР значно зростає напруження пластичних деформаціях. Це пояснюється тим, що відбувається значне поглинання пружної енергії в коливальних і хвильових процесах.

Враховуючи те, що в подальшому буде використовуватися енергія яка переноситься хвилею деформації, розглянемо аналітичну залежність зміни імпульсу хвилі деформації в часі, яку розроблено за даними експериментальних замірів [6], розрахункових параметрів (табл.1) та аналітичної залежності зміни напруження в часі (1):

$$P(t) = \int_0^t \left\{ \sigma_{m1} \cdot \exp\left(\frac{t_{m1}-t}{t_{01}}\right) \cdot \exp\left[-\exp\left(\frac{t_{m1}-t}{t_{01}}\right)\right] + \sigma_{m2} \cdot \left[1 - \exp\left(\frac{t_{m2}-t}{t_{02}}\right)\right] \right\} dt. \quad (4)$$

На рис. 3 представлені результати розрахунку залежності зміни імпульсу хвилі деформації в часі при підриванні зарядів масою $Q_{BP}=226$ г та $Q_{BP}=400$ г на відстані 70R та 75R відповідно.

Рисунок 3 – Зміна імпульсу хвилі деформації в часі:
1 – при підриванні зарядів масою $Q_{BP}=226$ г на відстані $70R$;
2 – при підриванні зарядів масою $Q_{BP}=400$ г на відстані $75R$

Аналогічні розрахунки проведені для інших відстаней від джерела вибуху. Максимальні значення імпульсу хвилі деформації для різних відстаней від джерела вибуху представлені в табл. 2.

Таблиця 2 – Максимальне значення імпульсу хвилі деформації
для відстані r від джерела вибуху

Маса ВР $Q_{BP}=226$ г				
r (R – радіус заряду ВР)	70R	120R	150R	200R
P_m , МПа·с	661,6	308,6	197,4	63,74
Маса ВР $Q_{BP}=400$ г				
r (R – радіус заряду ВР)	75R	93,5R	156R	187R
P_m , МПа·с	745,1	559,4	386,3	249,2

Проведений аналіз отриманих закономірностей зміни імпульсу хвилі деформації в залежності від відстані до джерела вибуху показав, що така залежність може бути представлена у наступному вигляді (рис. 4):

$$P(r) = P_{m0} \cdot \exp(-\alpha \cdot r), \quad (5)$$

де P_{m0} – значення імпульсу хвилі деформації біля епіцентру вибуху, МПа·с;
 α – коефіцієнт затухання, $1/m$; r – відстань до джерела вибуху, м.

Емпіричний аналіз отриманих вище результатів показав, що для представлених умов вибуху $P_{m0} = 1700$ МПа·с та 1600 МПа·с; $\alpha = 0,014$ та 0,0105 відповідно для маси зарядів ВР $Q_{ВР}=226$ г та $Q_{ВР}=400$ г (рис. 4).

Рисунок 4 – Зміна імпульсу хвилі деформації в залежності від відстані до джерела вибуху (R – радіус заряду ВР):

1, 2 – зміна імпульсу хвилі деформації в залежності від відстані до джерела вибуху при масі заряду ВР $Q_{ВР}=226$ г та $Q_{ВР}=400$ г відповідно, розрахована за рівнянням (5); 3, 4 – значення імпульсу хвилі деформації в залежності від відстані до джерела вибуху при масі заряду ВР $Q_{ВР}=226$ г та $Q_{ВР}=400$ г відповідно, розраховані за рівнянням (4)

Як видно з рис. 4 при збільшенні маси заряду ВР збільшується імпульс хвилі деформації. Це пояснюється тим, що збільшується частота коливання та швидкість зміщення часток в масиві і зростає частка незворотних, пластичних деформацій. Зі збільшенням відстані від джерела вибуху величина імпульсу знижується за експоненціальною залежністю. Інтенсивність зниження імпульсу хвилі деформації залежить від коефіцієнта затухання пружних хвиль α , який є показником втрати енергії хвиль в гірських породах внаслідок фізичних процесів описаних вище. Величина α залежить від пористості та тріщинуватості породи, мінерального складу її скелету, температури та вологості, геометрії пор та рідин, що їх заповнюють.

Для перевірки адекватності представлених аналітичних залежностей необхідно перевести коефіцієнт затухання α з безрозмірної величини у фактичну (1/м) та співставити з експериментальними даними (рис. 5) [10]. Таким чином коефіцієнт поглинання для зарядів $Q_{ВР}=226$ г та $Q_{ВР}=400$ г становить $\alpha = 0,28$ 1/м та 0,21 1/м відповідно.

Рисунок 5 – Залежність коефіцієнту затухання від частоти для гірських порід різної літологічної будови [10]

Враховуючи те, що коефіцієнт затухання α потрапляє в необхідний інтервал частот ($f = 100$ Гц – 10 кГц, рис. 5), залежності 4 та 5 є адекватними і можуть бути застосовані для аналогічних розрахунків переносу імпульсу та енергії хвилею деформації гірського масиву.

ВИСНОВКИ. 1. Розроблені математичні вирази для опису розвитку напруження в часі при пластичних та пружних деформаціях описуються єдиною аналітичною залежністю. При збільшенні маси заряду ВР пластична складова імпульсу напруження зростає. При збільшенні відстані від джерела вибуху збільшується час наростання і спадання імпульсу напруження.

2. Встановлені закономірності зміни імпульсу хвилі деформації в часі та закономірність зміни імпульсу з відстанню від джерела вибуху дозволяють оцінити поглинання енергії хвиль деформації масивом гірських порід при проведенні масових вибухів на кар'єрах. Зі збільшенням маси заряду ВР приблизно в 2 рази максимальна величина імпульсу хвилі деформації зростає в $1,15 \div 4$ рази на відстані від $70R$ до $200R$.

3. Зі збільшенням відстані від джерела вибуху величина імпульсу знижується за експоненціальною залежністю. Інтенсивність зниження імпульсу хвилі деформації залежить від коефіцієнта затухання пружних хвиль α , який є показником поглинання енергії хвиль в гірських породах внаслідок відповідних фізичних процесів. Величина α залежить від пористості та тріщинуватості породи, мінерального складу її скелету, температури та вологості, геометрії пор та рідин, що їх заповнюють.

4. При збільшенні маси заряду з 226 г до 400 г, коефіцієнт затухання α знижується на 25 %. Це пояснюється тим, що при більшій величині заряду частотний спектр коливань зміщується в бік більших частот, які затухають більш інтенсивно ніж інші хвилі.

ЛІТЕРАТУРА

1. Ефремов Э. И., Петренко В. Д., Пастухов А. И. Прогнозирование дробления горных массивов взрывом. К.: Наукова думка, 1990. 118 с.
2. Друкованый М. Ф. Методы управления взрывом на карьерах. М.: Недра, 1973. 416 с.
3. Бруякин А. В., Воробьев В. Д. Буровзрывные работы в строительстве: краткий справочник. К.: Будівельник, 1993. 117 с.
4. Фролов О. О., Косенко Т. В., Ващук В. З. Дослідження розподілу енергетичних потоків вибухів при руйнуванні модельного середовища. *Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут»*. Серія «Гірництво». 2016. № 30. С. 23–29.
5. Жуков С. А., Тищенко С. В. Математические модели физических процессов взрывных геотехнологий. Кривой Рог: Минерал, 2008. 148 с.
6. Мосинец В. Н. Энергетические и корреляционные связи процесса разрушения пород взрывом. Фрунзе: АН Киргизской ССР, 1963. 233 с.
7. Родионов В. Н., Сизов И. А., Цветнов В. М. Основы геомеханики. М: Недра, 1986. 300 с.
8. Крючков А. І., Бахтин А. І. Аналітичний опис імпульсу напруження в гірському масиві і його експериментальне підтвердження при підрильних роботах на кар'єрах. *Енергетика. Екологія. Людина: матеріали VII міжнар. наук.-практ. конф.* Київ. (м. Київ 15-17 травня 2015 р.), 2015. С. 34–36.
9. Фролов О. О., Крючков А. І., Косенко Т. В. Керування енергетичними потоками при вибуховому руйнуванні гірських порід на кар'єрах. К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, Вид-во «Політехніка», 2019. 196 с.
10. Берзон И. С., Ратникова Л. И., Рац-Хизгия М. И. Сейсмические обменные отраженные волны. М: Недра, 1966. 226 с.

DESCRIPTION OF THE FORM, DISSEMINATION AND DAMPING OF THE EXPLOSIVE IMPULSE IN THE ROCKS MASSIF

A. Kriuchkov, A. Bakhtyn

NTUU "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

prosp. Peremohy, 37, Kyiv, 03056, Ukraine. E-mail: at_bahtin@i.ua

Purpose. The purpose of the study is to develop an analytical expression for describing the growth and attenuation of the impulse of the wave of deformation in time, which will be described by a single dependence, as well as the establishment of the law of change in impulse with distance from the source of the explosion. **Methodology.** The analytical and experimental studies of the development of time stress have been carried out to describe the impulse of an explosive wave in time at a different distance from the source of the explosion. An empirical analysis of the obtained results

was carried out and a comparison of these data with experimental data was performed to prove the adequacy of the proposed mathematical models. **Findings.** The regularities of the momentum variation of the wave of deformation in time and the pattern of momentum change with the distance from the source of the explosion are established, which allow to estimate damping of energy of waves of deformation in massif of rocks during carrying out explosions in quarries. With an increase in the charge mass of an explosive about 2 times, the maximum impulse of the wave of deformation increases in $1,15 \div 4$ times at a distance of $70R$ to $200R$. With an increase in the distance from the source of the explosion, the value of the impulse decreases with exponential dependence. The intensity of the decrease of the impulse of the deformation wave depends on the coefficient of attenuation of the elastic waves α , which is an indicator of damping of energy in rocks due to the corresponding physical processes. The value of α depends on the porosity and presence of cracks in the rock, its mineral composition, temperature and humidity, the geometry of the pores and fluids that fill them. With an increase in the mass of the explosive charge from 226 to 400 g, the attenuation coefficient α decreases by 25%. This is due to the fact that with a larger mass of charge of an explosive, the frequency spectrum of oscillations is shifted towards higher frequencies. **Originality.** In most cases, the analytical description of the impulse of tension in the rocks massif was reduced to linear approximation. In this study, mathematical expressions have been developed to describe the development of an impulse of an explosive wave in time during plastic and elastic deformations, which are described by a single analytical dependence. **Practical value.** The practical significance of the results obtained is the ability to establish seismic-acoustic, elastic-deformation and strength properties of rocks through the study of the characteristics of the passage of elastic waves. **Conclusions.** The regularity of the impulse variation of the wave of deformation in time and the pattern of impulse change with the distance from the source of the explosion have been established. They allow to estimate energy damping of elastic waves of deformation by massif of rocks during explosions in quarries.

Key words: tension of the rock massif, plastic deformation, elastic deformation, impulse deformation wave, explosive charge.

REFERENCES

1. Efremov, E. I., Petrenko, V. D., Pastuhov, A. I. (1990), *Prognozirovanie drobleniya gorniyh massivov vzryivom* [Predicting the crushing of rock ranges by explosion], Naukova dumka, Kyiv, Ukraine.
2. Drukovanyiy, M. F. (1973), *Metodyi upravleniya vzryivom na karerakh* [Methods of managing the explosion in quarries], Nedra, Moscow, Russia.
3. Bruyakin, A. V., Vorobiov, V. D. (1993), *Burovzryivnye raboty v stroitelstve: kratkiy spravochnik* [Blasting in construction: a quick guide], Budivelnyk, Kyiv, Ukraine.
4. Frolov, A. A., Kosenko, T. V., Vashchuk, V. Z. (2016), «Study of the distribution of energy flows of explosions in the process of destruction of the model medium», *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu Ukrainy "Kyivskyi politekhnichnyi instytut". Seriya "Hirnytstvo"*, no. 30, pp. 23–29.

5. Zhukov, S. A., Tischenko, S. V. (2008), *Matematicheskie modeli fizicheskikh processov vzryvnykh geotekhnologiy* [Mathematical models of physical processes of explosive geotechnologies], Mineral, Kryvyi Rih, Ukraine.
6. Mosinec, V. N. (1963), *Energeticheskie i korrelyacionnye svyazi processa razrusheniya porod vzryvom* [Energy and correlation of the process of destruction of rocks by an explosion], AN Kirgizskoy SSR, Frunze, USSR.
7. Rodionov, V. N., Sizov, I. A., Cvetnov, V. M. (1986), *Osnovy geomehaniki* [Basics of Geomechanics], Nedra, Moscow, Russia.
8. Kriuchkov, A. I., Bakhtyn, A. I. (2015), «An analytical description of the impulse of tension in the rock massif and its experimental confirmation in the blasting of quarries» *Enerhetyka. Ekolohiia. Liudyna Materialy mizhn. Conf.* [materials International conf.], Kyiv, May 15-17, 2015, pp. 34–36.
9. Frolov, O. O., Kriuchkov, A. I., Kosenko, T. V. (2019), *Keruvannia enerhetichnykh potokamy pry vybukhovomu ruynuvanni hirs'kykh porid na karierakh* [Management of energy flows in the exploding destruction of rocks in quarries], Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute «Politekhnik», Kyiv, Ukraine.
10. Berzon, I. S., Ratnikova, L. I., Rac-Hizgiya, M. I. (1966), *Seysmicheskie obmennye otrazhennye volny* [Seismic, exchange, reflected waves], Nedra, Moscow, Russia.

Стаття надійшла 27.05.2019.