

О.О. Фролов, д.т.н., доц.  
 О.М. Терентьев, д.т.н., проф.  
 Національний технічний університет України "КПІ"  
 В.В. Котенко, к.т.н., доц.  
 Житомирський державний технологічний університет

## ВПЛИВ МЕЖІ ПОДІЛУ РІЗНОМІЦНІСНИХ МАСИВІВ ГІРСЬКИХ ПОРІД НА РОЗПОДІЛ НАПРУЖЕНЬ ПРИ ВИБУХУ СВЕРДЛОВИННОГО ЗАРЯДУ

Доведено вплив межі поділу в різноміцнісних скельних гірських породах на розподіл напружень при руйнуванні їх вибухом свердловинних зарядів. Отримано чисельні значення зміни максимальних напружень при поширенні хвилі напружень в напрямку від більш міцної породи, що має меншу акустичну жорсткість, до менш міцної та в напрямку поширення хвилі напружень від менш міцної до більш міцної породи.

**Ключові слова:** різноміцнісний масив, вибух, ударна хвиля, напруження, межа поділу, заряд вибухової речовини.

**Вступ.** Скельні гірські породи характеризуються доволі складною шаруватою структурою. В багатьох випадках властивості контактуючих шарів настільки неоднакові, що їх необхідно розглядати як різні середовища [1].

Дослідженнями встановлено, що наявність площин контактів різноміцнісних гірських порід призводить до перерозподілу енергії хвиль напружень при вибуху, що негативно впливає на якість дроблення гірських порід в приконтактних зонах.

**Постановка задачі досліджень.** При виконанні великомасштабних масових вибухів можливі випадки, коли підривні роботи проводяться в різноміцнісних суцільних середовищах. При підході ударної хвилі до межі контакту різноміцнісних порід відбувається її відбиття і заломлення, тобто замість однієї падаючої хвилі необхідно розглядати дві – відбиту і прохідну в іншу породу [2]. Характер двох останніх ударних хвиль визначається наступними умовами:

- 1) якщо падаюча вибухова хвиля є ударною, то прохідна хвиля незалежно від властивостей другої ділянки гірського масиву, також буде ударною;
- 2) відбита хвиля є ударною, якщо на шляху падаючої хвилі перший вид гірської породи більш міцний, ніж другий;
- 3) відбита хвиля буде хвилею розрідження, якщо по напрямку руху падаючої хвилі перша порода більш міцна, ніж друга.

**Викладення матеріалу досліджень.** Розглянемо послідовно особливості відбиття хвилі від межі поділу двох видів гірських порід. Припустимо, що після вибуху свердловинного заряду ВР в гірському масиві утворюється ударна хвиля з наступними параметрами: тиск  $p_1$ , швидкість часток  $u_1$ , питомий об'єм масиву  $V_1$ , швидкість хвилі  $D_1$ . Якщо друге середовище більш міцне порівняно з першим, в якому поширюється хвиля, то після досягнення падаючою хвилею межі поділу в першому середовищі буде поширюватися відбита ударна хвиля з параметрами  $p_2$ ,  $u_2$ ,  $D_2$ ,  $V_2$ , а у другому – прохідна ударна хвиля з параметрами  $p_3$ ,  $u_3$ ,  $D_3$ ,  $V_3$ . На фронті двох хвиль виконуються співвідношення [3]:

$$u_2 = u_1 - \sqrt{(p_2 - p_1)(V_1 - V_2)}; \quad D_2 = u_1 - V_1 \sqrt{(p_2 - p_1)/(V_1 - V_2)}, \quad (1)$$

$$u_3 = \sqrt{(p_3 - p_30)(V_30 - V_3)} - u_30; \quad D_3 = V_30 \sqrt{(p_3 - p_30)/(V_30 - V_3)}, \quad (2)$$

де  $p_1$ ,  $u_1$ ,  $V_1$  – тиск, швидкість та питомий об'єм в падаючій хвилі відповідно;  $p_30$ ,  $u_30$ ,  $V_30$  – тиск, швидкість і питомий об'єм другого середовища перед фронтом прохідної ударної хвилі.

На межі поділу середовищ для тиску  $p$  і швидкості  $u$  повинна виконуватися умова неперервності:

$$u_3 = u_2 \text{ та } p_3 = p_2. \quad (3)$$

З урахуванням співвідношень (1)–(3) отримаємо:

$$\sqrt{(p_2 - p_30)(V_30 - V_3)} - u_30 = u_1 - \sqrt{(p_2 - p_1)(V_1 - V_2)}. \quad (4)$$

Якщо друге середовище перед фронтом прохідної ударної хвилі нерухоме ( $u_30 = 0$ ), то (4) буде мати вигляд;

$$p_2 - p_30 = \frac{\left[ u_1 - \sqrt{(p_2 - p_1)(V_1 - V_2)} \right]^2}{V_30 - V_3}. \quad (5)$$

При відомих рівняннях стану першого і другого середовищ [4] можна обчислити з (5) тиск  $p_2$  на межі поділу середовищ в момент відбиття хвилі. Рівняння (5) має два корені. Однак істинне рішення буде при

меншому корені, що відповідає випадку  $u_2 > 0$ , оскільки більший корінь (випадок  $u_2 < 0$ ) є недійсним. Розв'язується рівняння (5) методом простої ітерації.

Розрахунки виконано для наступних двох варіантів різноміцнісних масивів: 1) гранітоїд – кварц безрудний; 2) гранітоїд – сланець кварц-біотитовий. На рисунку 1 представлено результати розрахунків залежності коефіцієнта відбиття  $k_{\text{відб}} = p_2/p_1$  від відносного тиску  $p_1/p_0$  (де  $p_0$  – атмосферний тиск) у падаючій хвилі. Аналіз залежностей показує, що незалежно від варіанту спочатку  $k_{\text{відб}}$  зі збільшенням  $p_1/p_0$  зростає до максимального значення, а потім безперервно зменшується та при  $p_1/p_0 \rightarrow \infty$  коефіцієнт  $k_{\text{відб}} \rightarrow 1$ .

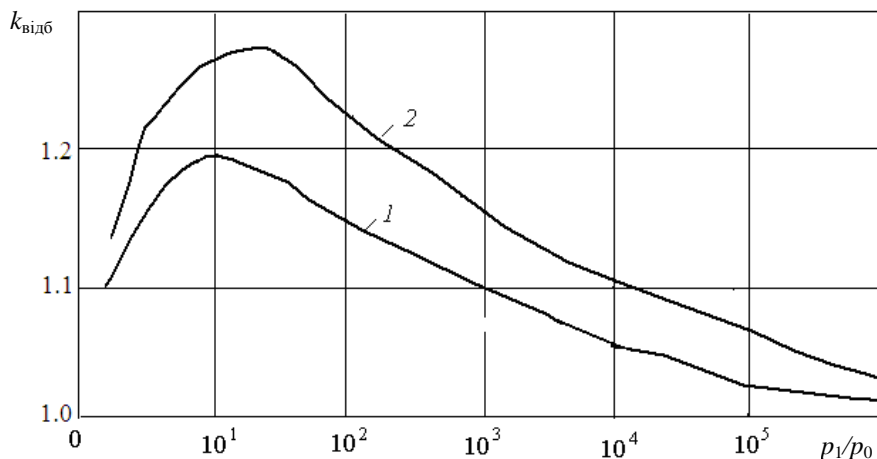


Рис. 1. Залежності коефіцієнта  $k_{\text{відб}}$  від відносного тиску  $p_1/p_0$  в падаючій хвилі для різноміцнісного масиву: 1) гранітоїд – кварц безрудний; 2) гранітоїд – сланець кварц-біотитовий

Якщо друге середовище менш міцне (має меншу акустичну жорсткість), порівняно з першим, в якому поширюється ударна хвиля, то в результаті відбиття хвилі від межі поділу у першому середовищі буде поширюватися відбита хвиля розрідження з параметрами  $p_2$ ,  $u_2$ ,  $V_2$ , а у другому – прохідна ударна хвиля з параметрами  $p_3$ ,  $D_3$ ,  $u_3$ ,  $V_3$ . Швидкість  $u_2$  у хвилі розрідження записується у вигляді:

$$u_2 = u_1 - \int_{p_1}^{p_2} c(p) \frac{dp}{\rho}, \quad (6)$$

де  $c(p)$  – швидкість звуку у першому середовищі при щільності  $\rho(p)$ .

На фронті прохідної ударної хвилі виконуються співвідношення:

$$u_3 = \sqrt{(p_3 - p_{30})(V_{30} - V_3)} - u_{30}; \quad D_3 = V_{30} \sqrt{(p_3 - p_{30}) / (V_{30} - V_3)} - u_{30}, \quad (7)$$

де  $p_{30}$ ,  $u_{30}$ ,  $V_{30}$  – тиск, швидкість та питомий об'єм у другому середовищі перед фронтом ударної хвилі.

На межі поділу середовищ швидкість  $u$  та тиск  $p$  неперервні, тобто  $u_2 = u_3$ ;  $p_2 = p_3$ . З урахуванням умов неперервності отримаємо:

$$\sqrt{(p_2 - p_{30})(V_{30} - V_3(p_2))} - u_{30} = u_1 - \int_{p_1}^{p_2} c(p) \frac{dp}{\rho}. \quad (8)$$

Для випадку, коли друге середовище перед фронтом ударної хвилі нерухоме ( $u_{30} = 0$ ), отримаємо:

$$p_2 - p_{30} = \frac{\left[ u_1 - \int_{p_1}^{p_2} c(p) \frac{dp}{\rho} \right]^2}{V_{30} - V_3(p_2)}. \quad (9)$$

З рівнянь стану першого та другого середовищ і рівняння (9) визначаємо тиск  $p_2$ . При розв'язанні (9) методом простих ітерацій обирається менший корінь, при якому у хвилі розрідження відбувається зростання швидкості ( $u_2 > u_1$ ); другий більший корінь відкидається. Виконано розрахунок для різноміцнісного масиву «кварц магнетитовий–сланець кварц-біотитовий». На рисунку 2 представлена залежність коефіцієнта відбиття  $k_{\text{відб}}$  від відносного тиску  $p_1/p_0$  в падаючій хвилі.

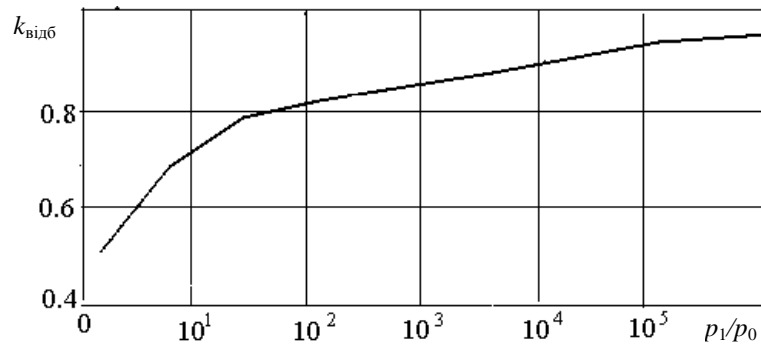


Рис. 2. Залежності  $k_{\text{відб}}$  від відносного тиску  $p_1/p_0$  в падаючій хвилі для різноміцнісного масиву «кварц магнетитовий–сланець кварц-біотитовий»

Аналіз залежності показує, що для неї характерним є швидке початкове зростання. Потім інтенсивність зростання падає та в межах  $p_1/p_0 \rightarrow \infty$  крива прямує до значення  $k_{\text{відб}} \rightarrow 1$ .

Параметри напруженого стану масиву розраховувались на базі системи рівнянь, розглянутих в [4], з додатковими початковими умовами, які враховують фізико-механічні властивості порід. Розглянуто вибухи свердловинних зарядів ВР радіусом  $r_3 = 0,1$  м та довжиною 15 м. За ВР прийнято грамоніт 79/21, анемікс 70 та полімікс ГР-1/8, характеристики яких наведено в [3]. Межі порід знаходились на відстані 1, 2, 3, 4, 5 та 6 м від осі заряду, тобто при  $\bar{r} = r/r_3 = 10 \dots 60$ . Розглянуто однорідні масиви (кварц магнетитовий, сланець кварц-біотитовий та гранітоїд) та три варіанти різноміцнісних масивів, які є характерними для кар'єру ВАТ «Полтавський ГЗК»: 1 – кварц магнетитовий – сланець кварц-біотитовий; 2 – гранітоїд – сланець кварц-біотитовий; 3 – гранітоїд – кварц безрудний.

У таблицях 1–3 наведено результати впливу межі поділу порід різної міцності на величини максимальних напружень  $\sigma_{rr}$  в гірському масиві при вибухах різних ВР, а у таблиці 4 – зміна максимальних напружень, що виникають в однорідних масивах, з відстанню для різних типів ВР. Аналіз даних таблиці 4 показує, що при поширенні хвиль в однорідному масиві більші значення  $\sigma_{rr}$  досягаються в більш міцних породах з вищою акустичною жорсткістю (кварц магнетитовий) незалежно від відстаней від джерела вибуху.

Якщо у різноміцнісному масиві перша порода більш міцна (кварц магнетитовий), а друга менш міцна (сланець кварц-біотитовий) (табл. 1–3), то незалежно від того, де знаходиться межа поділу, в масиві досягаються значно менші значення максимальних напружень  $\sigma_{rr}$ , ніж в тих самих однорідних породах, зокрема у кварці магнетитовому. Зі збільшенням відстані від джерела вибуху з 10 до 50  $\bar{r}$  напруження зменшуються: для анеміксу 70 – на 10,0...20,0 %, для грамоніту – на 8,0...20,1 %, для поліміксу ГР 1/8 – на 14,2...29,9 %. Крім того, необхідно зазначити, що значення максимальних напружень в такому масиві навіть менші, ніж в однорідному з меншою акустичною жорсткістю.

Таблиця 1

Значення максимальних напружень в гірському масиві при розміщенні межі поділу порід на відносних відстанях при вибуху анеміксу 70

Склад гірського масиву	Максимальні напруження $\sigma_{rr}$ , Па, при розміщенні межі поділу порід на відносній відстані					
	10 $\bar{r}$	20 $\bar{r}$	30 $\bar{r}$	40 $\bar{r}$	50 $\bar{r}$	60 $\bar{r}$
Кварц магнетитовий – сланець кварц-біотитовий	$1,83 \cdot 10^9$	$3,31 \cdot 10^8$	$8,43 \cdot 10^7$	$1,68 \cdot 10^7$	$4,95 \cdot 10^6$	$1,49 \cdot 10^6$
Гранітоїд – сланець кварц-біотитовий	$2,01 \cdot 10^9$	$3,36 \cdot 10^8$	$9,95 \cdot 10^7$	$2,16 \cdot 10^7$	$6,71 \cdot 10^6$	$1,87 \cdot 10^6$
Гранітоїд – кварцит безрудний	$1,82 \cdot 10^9$	$2,98 \cdot 10^8$	$9,35 \cdot 10^7$	$2,03 \cdot 10^7$	$6,34 \cdot 10^6$	$1,83 \cdot 10^6$

Таблиця 2

Значення максимальних напружень в гірському масиві при розміщенні межі поділу порід на відносних відстанях при вибуху грамоніту 79/21

Склад гірського масиву	Максимальні напруження $\sigma_{rr}$ , Па, при розміщенні межі поділу порід на відносній відстані					
	$10 \bar{r}$	$20 \bar{r}$	$30 \bar{r}$	$40 \bar{r}$	$50 \bar{r}$	$60 \bar{r}$
Кварц магнетитовий – сланець кварц-біотитовий	$0,93 \cdot 10^9$	$2,02 \cdot 10^8$	$6,37 \cdot 10^7$	$1,54 \cdot 10^7$	$4,11 \cdot 10^6$	$1,44 \cdot 10^6$
Гранітоїд – сланець кварц-біотитовий	$1,05 \cdot 10^9$	$2,49 \cdot 10^8$	$6,4 \cdot 10^7$	$1,94 \cdot 10^7$	$6,43 \cdot 10^6$	$1,84 \cdot 10^6$
Гранітоїд – кварц безрудний	$1,01 \cdot 10^9$	$2,38 \cdot 10^8$	$6,16 \cdot 10^7$	$1,83 \cdot 10^7$	$5,92 \cdot 10^6$	$1,81 \cdot 10^6$

Таблиця 3

Значення максимальних напружень в гірському масиві при розміщенні межі поділу порід на відносних відстанях при вибуху поліміксу ГР 1/8

Склад гірського масиву	Максимальні напруження $\sigma_{rr}$ , Па, при розміщенні межі поділу порід на відносній відстані					
	$10 \bar{r}$	$20 \bar{r}$	$30 \bar{r}$	$40 \bar{r}$	$50 \bar{r}$	$60 \bar{r}$
Кварц магнетитовий – сланець кварц-біотитовий	$7,9 \cdot 10^8$	$1,89 \cdot 10^8$	$5,58 \cdot 10^7$	$1,43 \cdot 10^7$	$3,53 \cdot 10^6$	$1,42 \cdot 10^6$
Гранітоїд – сланець кварц-біотитовий	$1,01 \cdot 10^9$	$2,43 \cdot 10^8$	$6,03 \cdot 10^7$	$1,82 \cdot 10^7$	$6,35 \cdot 10^6$	$1,82 \cdot 10^6$
Гранітоїд – кварц безрудний	$9,56 \cdot 10^8$	$2,31 \cdot 10^8$	$5,74 \cdot 10^7$	$1,72 \cdot 10^7$	$5,81 \cdot 10^6$	$1,79 \cdot 10^6$

Таблиця 4

Значення максимальних напружень в однорідному гірському масиві на відносних відстанях при вибухах різних типів ВР

Склад гірського масиву	Максимальні напруження $\sigma_{rr}$ , Па, на відносній відстані					
	$10 \bar{r}$	$20 \bar{r}$	$30 \bar{r}$	$40 \bar{r}$	$50 \bar{r}$	$60 \bar{r}$
Анемікс 70						
Кварц магнетитовий	$2,03 \cdot 10^9$	$3,85 \cdot 10^8$	$1,01 \cdot 10^8$	$2,05 \cdot 10^7$	$6,22 \cdot 10^6$	$1,92 \cdot 10^6$
Гранітоїд	$1,82 \cdot 10^9$	$2,98 \cdot 10^8$	$8,5 \cdot 10^7$	$1,8 \cdot 10^7$	$5,34 \cdot 10^6$	$1,81 \cdot 10^6$
Грамоніт 79/21						
Кварц магнетитовий	$1,01 \cdot 10^9$	$2,32 \cdot 10^8$	$7,5 \cdot 10^7$	$1,88 \cdot 10^7$	$5,14 \cdot 10^6$	$1,9 \cdot 10^6$
Гранітоїд	$9,62 \cdot 10^8$	$2,18 \cdot 10^8$	$5,5 \cdot 10^7$	$1,62 \cdot 10^7$	$5,06 \cdot 10^6$	$1,78 \cdot 10^6$
Полімікс ГР 1/8						
Кварц магнетитовий	$9,3 \cdot 10^8$	$2,19 \cdot 10^8$	$6,81 \cdot 10^7$	$1,73 \cdot 10^7$	$5,04 \cdot 10^6$	$1,88 \cdot 10^6$
Гранітоїд	$9,11 \cdot 10^8$	$2,13 \cdot 10^8$	$5,15 \cdot 10^7$	$1,52 \cdot 10^7$	$5,00 \cdot 10^6$	$1,76 \cdot 10^6$

Якщо перша порода менш міцна (гранітоїд), то при відбитті хвилі від більш міцних порід відбувається збільшення  $\sigma_{rr}$ , причому чим більша акустична жорсткість другої породи, тим більше зростання напружень у першій породі, порівняно з однорідним середовищем. Зі збільшенням відстані від вибуху з 10 до  $50 \bar{r}$  напруження збільшуються для сланця кварц-біотитового на 10,0...25,6 % при застосуванні анеміксу 70, на 9,1...27,1 % – для грамоніту 79/21, на 10,9...27,0 % – поліміксу ГР 1/8. Якщо гірський масив складається з гранітоїду та кварцу безрудного, то при збільшенні відстані від джерела вибуху з 10 до  $50 \bar{r}$  напруження збільшуються: для анеміксу 70 на 0...18,8 %, для грамоніту – на 5,0...17,0 %, для поліміксу ГР 1/8 – на 4,9...12,2 %.

**Висновки.** В результаті проведених досліджень встановлено:

1. Найявність в гірському масиві порід різної міцності безпосередньо впливає на розподіл напружень при руйнуванні його вибухом свердловинних зарядів.

2. При поширенні хвилі напружень в напрямку від більш міцної (магнетитовий кварцит) до менш міцної (сланець кварц-біотитовий) породи в масиві досягаються менші значення максимальних напружень  $\sigma_{rr}$ , ніж в однорідних середовищах з цих же порід, незалежно від того, де знаходиться межа поділу порід. Зі збільшення відстані до межі поділу середовищ від джерела вибуху з 10 до  $50 \bar{r}$  напруження  $\sigma_{rr}$  зменшуються на 8,0...30,0 % відповідно в залежності від типу застосовуваної ВР.

3. Якщо в напрямку поширення хвилі напружень перша порода менш міцна (гранітоїд), тобто має меншу акустичну жорсткість, то при відбитті хвилі від більш міцних порід (сланець кварц-біотитовий, кварц безрудний) відбувається збільшення максимальних напружень  $\sigma_{rr}$ . Зі збільшенням відстані до межі

поділу від джерела вибуху з 10 до  $50\bar{r}$  напруження  $\sigma_{rr}$  збільшуються в порівнянні з напруженнями в однорідних середовищах на 9,0...28,0 % для сланця кварц-біотитового та до 19,0 % для кварцю безрудного залежно від ВР.

**Список використаної літератури:**

1. Федоренко П.И. Буровзрывные работы : учебник / П.И. Федоренко. – М. : Недра, 1991. – 272 с.
2. Ремез Н.С. Численное моделирование динамического поведения многокомпонентной вязкопластической среды под действием взрыва цилиндрического заряда конечной длины / Н.С. Ремез // Нелинейные краевые задачи математической физики и их приложения : сб. научн. тр. НАН Украины. Ин-т математики. – К., 1998. – С. 177–179.
3. 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.
4. 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.

ТЕРЕНТЬЄВ Олег Маркович – доктор технічних наук, професор кафедри електромеханічного обладнання енергоємних виробництв Національного технічного університету України "КПІ".

Наукові інтереси:

- гірництво.

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

Наукові інтереси:

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

Стаття надійшла до редакції 14.05.2014

**Фролов О.О., Терентьев О.М., Котенко В.В.** Вплив межі поділу різноміцнісних масивів гірських порід на розподіл напружень при вибуху свердловинного заряду

**Фролов А.А., Терентьев О.М., Котенко В.В.** Влияние границы раздела разнопрочностных массивов горных пород на энергетические характеристики взрыва

**Frolov A.A., Terentiev O.M., Kotenko V.V.** Influence of the interface rocks with different strengths on the energy characteristics of explosion

УДК 622.235

**Влияние границы раздела разнопрочностных массивов горных пород на энергетические характеристики взрыва / А.А. Фролов, О.М. Терентьев, В.В. Котенко**

Доказано влияние границы раздела в разнопрочностных скальных горных породах на распределение напряжений при разрушении их взрывом скважинных зарядов. Получены численные значения изменения максимальных напряжений при распространении волны напряжений в направлении от более прочной к менее прочной породы и в направлении распространения волны напряжений от менее прочной, что имеет меньшую акустическую жесткость, к более прочной.

Ключевые слова: разнопрочностный массив, взрыв, ударная волна, напряжение, граница раздела, заряд взрывчатого вещества.

УДК 622.235

**Influence of the interface rocks with different strengths on the energy characteristics of explosion / A.A. Frolov, O.M. Terentiev, V.V. Kotenko**

Shown to affect the interface in hard rocks of varying strength on the stress distribution in the destruction of their blast hole charges. The numerical values of maximum stress changes in the propagation of stress waves in the direction of a more durable and less resistant rocks in the direction of propagation of the stress wave from the less strong, that has a lower acoustic impedance, to more durable.

Keywords: rocks of varying strength, explosion, shock wave, voltage interface, an explosive charge.