

РОЗРОБКА РОДОВИЩ КОРИСНИХ КОПАЛИН

УДК 622.235:622.271

Скачков А. А., гірничий інженер (Директор департаменту технологій та планування виробництва ГДД ТОВ «МЕТІНВЕСТ ХОЛДИНГ», м. Кривий Ріг, **Жуков С. О., д.т.н., проф.** (ДВНЗ «Криворізький національний університет», м. Кривий Ріг, **Стріха В. А., к.т.н., доцент** (Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне)

ОСОБЛИВОСТІ ФОРМУВАННЯ СИЛОВИХ ПОЛІВ ЗА ВИБУХОВОГО РУЙНУВАННЯ ТРІЩИНУВАТИХ АНІЗОТРОПНИХ ГІРСЬКИХ ПОРІД

Проаналізовано процес зміни амплітуди та енергії при перетині пружною хвилею макротріщин в гірській породі. Визначено основні чинники впливу вибуху на напружений стан гірських порід за умов застосування розроблених авторських рішень щодо конструкцій свердловинних зарядів, формування породних оголень, створення додаткових відбиваючих хвилі екранних щілин, а також стійкості вертикальних укосів уступів. Розглянуто руйнування порід зі зміною порядку підривання зарядів у рядах свердловин в напрямі від другого або третього – до першого.

Ключові слова: гірська порода, вибух, пружна хвиля, напруження, анізотропія.

Проблема та її зв'язок з практичними завданнями. Аналіз зв'язності гірничих підприємств, наукових досліджень та практики буровибухових робіт (БВР) в кар'єрах, а також багаторічних власних спостережень, свідчить про те, що породний масив найбільш нерівномірно руйнується в зоні, прилеглий до укосу уступу, в результаті чого утворюється гірнична маса з найбільш неоднорідною кускуватістю. Нерівномірний напружено-деформований стан масиву в цій частині при взаємодії свердловинних зарядів, що підриваються в першому і другому від укосу рядах, є однією з головних причин неконтрольованого виходу перездрібненої породи та негабаритів. Тому **завдання** пошуку шляхів вирішення даних негативних наслідків вибуху є вельми **актуальним**, оскільки сприяє **вирішенню проблеми** підвищення ефективності БВР.

Аналіз останніх досліджень і публікацій щодо теорії вибухового руйнування кристалічних середовищ і практики БВР [1; 2] свідчить про те, що одним з **найменш досліджених теоретично і невіршених практично питань** є нерівномірне формування під дією вибуху напружено-деформованого стану крайової зони уступу, що можливо оптимізувати шляхом диференційованого енергонасичення породного масиву, удосконалення механізму взаємодії свердловинних зарядів ВР та технології БВР, зокрема способів створення реально працюючих додаткових відбиваючих пружні хвилі екрануючих щілин та конструкцій зарядів для цього [3; 4]. У зв'язку з чим **в дослідження закладалася ідея** застосування вертикальних укосів уступів, високою до 10 м, та поглиблення диференційованого енергонасичення масиву вибухом за рахунок спеціально розроблених різнотипних зарядів ВР [рис. 1], для вирішення чого **задачі досліджень** формулювалися згідно з нею, а саме: заряди першого ряду свердловин (основні заряди рихлення) ініціюються тільки після проходження скрізь них прямої та відбитої укосом уступу хвилі вибуху зарядів другого ряду (заряди попереднього знеміцнення породи й утворення відбиваючої щілини), створюючи завдяки цьому умови для симетричної дії основних зарядів між двома відбиваючими поверхнями – вертикального укосу уступу з одного, та відбиваючої щілини – з іншого.

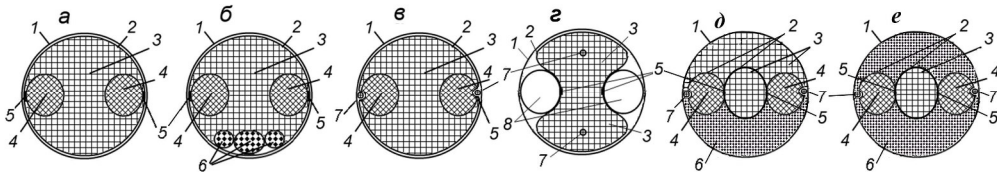


Рис. 1. Поперечний переріз комбінованих свердловинних зарядів:

- 1 – свердловина; 2 – полімерний рукав; 3 – низькобризантний заряд;
- 4 – лінійні високобризантні заряди; 5 – місця пропайки рукава; 6 – інертні демпфери; 7 – ДШ; 8 – повітряні утворювачі кумулятивних жолобів

Викладення матеріалу досліджень. Експериментальні вибухи з реєстрацією реальних деформацій та напружень в породному масиві навколо зарядів ВР виявили дещо нижчі показники, порівняно з ідеалізованими розрахунковими. Дослідивши напружений стан та структуру масиву, ми встановили головну причину даного розходження – вплив системних макротріщин, які розділяють масив на окремі блоки. А виконавши компаративний (порівняльний) аналіз значень названих відхилень зі значеннями розкриття тріщин, розробили спрощений метод компенсації його в розрахунках шляхом введення відповідного коефіцієнта $K_{ст}$, який відрізняється від запропонованого

раніше $k_{ст}$ [5] тим, що враховує не тільки рівень заповнення тріщин мінеральним дріб'язком, але й кінетику вибуху та інерційний фактор проходження пружною хвилею через макроріщину. Фізичний сенс даного коефіцієнта полягає в «сходинковому» зрізанні амплітуди пружної хвилі при її поширенні через блоки або шари породи (рис. 2) у поєднанні з пластичними деформаціями приповерхневих зон макротріщин, зумовленими рухом породних мас при розгляді поведінки гірського масиву, що руйнується, як сукупності пружних стержнів.

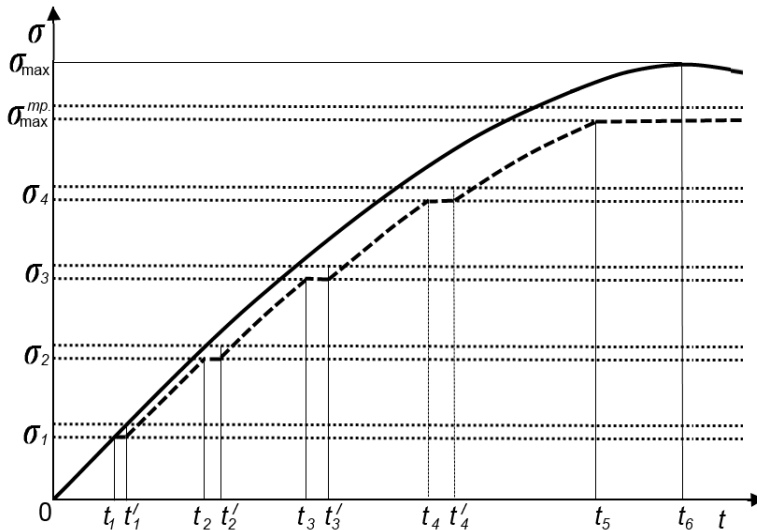


Рис. 2. Модифікація графіка розвитку напружень (деформацій) у фронті пружної хвилі під впливом системної тріщинуватості породного масиву

З урахуванням зазначених факторів ми пропонуємо визначати даний коефіцієнт в межах зон інтенсивних вибухових навантажень як

$$K_{mp} = \sqrt{f \cdot \rho_{mp}} \left(1 - \frac{r_{\phi.x.} \cdot g_{mp}}{A} \right)^{(1-\rho_{mp})},$$

де f – міцність породи; $\rho_{тр}$ – рівень заповненості тріщини породним дріб'язком, визначається відношенням об'єму заповнювача V_3 до об'єму тріщини $V_{тр}$ ($\rho_{тр} = V_3 / V_{тр}$); $r_{\phi.x.}$ – відстань від заряду до фронту хвилі; $g_{тр}$ – показник питомої тріщинуватості масиву, визначається відношенням середньої ширини системних тріщин, нормальних напрямку руху хвиль ($g_{тр} = l_3 / l_{тр}$), до відстані між ними.

Розрахункові значення $K_{тр}$ для різних порід і структурних характеристик їх масивів наведено в таблиці.

Уведення даного коефіцієнта значно покращує сходинку ре-

зультатів теоретичних розрахунків та експериментальних реєстрацій щодо визначення взаємодії енергії вибуху з породним масивом.

Аналіз процесів виконувався стосовно кар'єру «Північний» ГЗК «Укрмеханобр», де впроваджувалася реалізація диференційованого енергонасичення порід в умовах сухих свердловин найпростішою ВР – Грануліт КМ, для якої виміряні значення щільності заряджання і швидкості детонації складають відповідно 1020 кг/м^3 і 3850 м/с , а розрахункова теплота вибуху – 980 ккал/кг . Розрахункове для цих умов значення політропи (n) становить 1,8, що є в межах, характерних для порошкоподібних ВР ($1,5 \div 2,0$) [6].

Таблиця
Значення усередненого коефіцієнта K_{TP} для різних гірських порід

| Гірська порода | Середня ширина тріщин, м | Середня відстань між тріщинами, м | | | |
|---|--------------------------|-----------------------------------|------|------|-------|
| | | 0,5 | 1 | 1,5 | 2 |
| | | Значення K_{TP} | | | |
| Кварцити гідроген-матит-мартитові $A_0 = 2,5 \cdot 10^{-2} \text{ м}$, $\nu = 0,5$ | 0,001 | 0,91 | 0,93 | 0,95 | 0,97 |
| | 0,005 | 0,77 | 0,81 | 0,83 | 0,85 |
| | 0,01 | 0,53 | 0,55 | 0,58 | 0,59 |
| | 0,02 | 0,01 | 0,35 | 0,46 | 0,50 |
| Сланці серицит-хлоритові $A_0 = 2,3 \cdot 10^{-2} \text{ м}$, $\nu = 0,5$ | 0,001 | 0,63 | 0,70 | 0,72 | 0,75 |
| | 0,005 | 0,53 | 0,55 | 0,63 | 0,66 |
| | 0,01 | 0,44 | 0,47 | 0,49 | 0,51 |
| | 0,02 | 0,23 | 0,26 | 0,27 | 0,27 |
| Сланці кварц-філітові $A_0 = 2,1 \cdot 10^{-2} \text{ м}$, $\nu = 0,5$ | 0,001 | 0,75 | 0,77 | 0,79 | 0,80 |
| | 0,005 | 0,55 | 0,57 | 0,69 | 0,75 |
| | 0,01 | 0,46 | 0,57 | 0,69 | 0,72 |
| | 0,02 | 0,31 | 0,34 | 0,36 | 0,39 |
| Сланці тальк-карбонатні $A_0 = 2,1 \cdot 10^{-2} \text{ м}$, $\nu = 0,5$ | 0,001 | 0,60 | 0,65 | 0,67 | 0,67 |
| | 0,005 | 0,51 | 0,55 | 0,60 | 0,62 |
| | 0,01 | 0,42 | 0,44 | 0,46 | 0,471 |
| | 0,02 | 0,17 | 0,17 | 0,19 | 0,20 |

Масову швидкість у площині Чепмена – Жуге (ω , м/с) обчислено за формулою $\omega = v/(n+1) = 3850/(1,8+1) = 1375 \text{ м/с}$, а тиск детонаційної хвилі на площині $P_2 = v \cdot \omega \cdot \Delta / g = (3850 \cdot 1020) / 9,81 = 5,504 \cdot 10^8 \text{ Па}$. Відомо, що цей тиск – удвічі більший стаціонарного тиску у свердловині $P_{CB} = 5,504 \cdot 10^8 / 2 = 2,752 \cdot 10^8 \text{ Па}$; оскільки довжина заряду – 4 м, а його діаметр – 0,25 м, то площа, що сприймає означений тиск, становить – $3,61 \text{ м}^2$. Загальна площа хвилі з циліндричної частини і двох півкуль від торців заряду на момент виходу її на межу воронки дроблення

складає: $267,42 \text{ м}^2$, що у 74 рази більше початкової ($3,61 \text{ м}^2$). З урахуванням витрат енергії на руйнування порід, наприклад 20%, отримаємо тиск близько 3,0 МПа. В той же час, при підході хвилі до площини покрівлі уступу, тиск в ній складе близько 0,5 МПа, а біля площини укосу уступу – ще менше.

Описане підтверджує, що для уступів, висотою до 11 м, зменшення маси зарядів в парних рядах, розподілення зарядів у групі на окремі серії і початок ініціювання в кожній серії саме зі зменшених за масою зарядів, змушує ці зменшені заряди віддавати більше енергії на утворення відбиваючої щілини, розвиток знеміцнюючих породу мікротріщин, формування відбитих хвиль від вертикальних поверхонь, долання інерції масиву, що разом узятє полегшує роботу з подрібнення порід основним зарядам у непарних рядах, зменшує загальні витрати ВР, а відтак – збільшує ККД зарядів ВР.

Обґрунтування раціональної орієнтації мережі вибухових свердловин відносно системної тріщинуватості породного масиву здійснюється з урахуванням наведених трансформацій пружних хвиль у породному масиві.

Наведена вище методика може бути застосованою в породах, які мають практично ізотропні властивості, що за реальних умов зустрічається у виняткових випадках, оскільки практично усі скельні гірські породи мають тою чи іншою мірою виражену анізотропію фізико-механічних властивостей. Крім того, при значних відмінностях фізичних характеристик породи в окремосях масиву і матеріалі, що заповнює макротріщини, на поширення хвиль в різних напрямках навколо свердловинного заряду істотно впливає анізотропія масиву, обумовлена його системною макротріщинуватістю. Внаслідок цього розміри та форма контурів зон руйнувань навколо зарядів повинні визначатися з урахуванням цих особливостей.

Найбільш наочно ілюструє розповсюдження хвилі випадок, коли вона поширюється в монолітній мономінеральній породі, особливо в кристалах $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$, де поздовжні хвилі мають найбільші фазові швидкості в напрямках, які збігаються з напрямками осей симетрії кристалів, і мінімальні – в напрямках, орієнтованих під кутом 45° до цих осей [7]. У полімінеральних гірських породах картина поширення хвиль значно ускладнюється, однак загальні закономірності зберігаються ті ж.

З наведених закономірностей слідує, що акустичну анізотропію

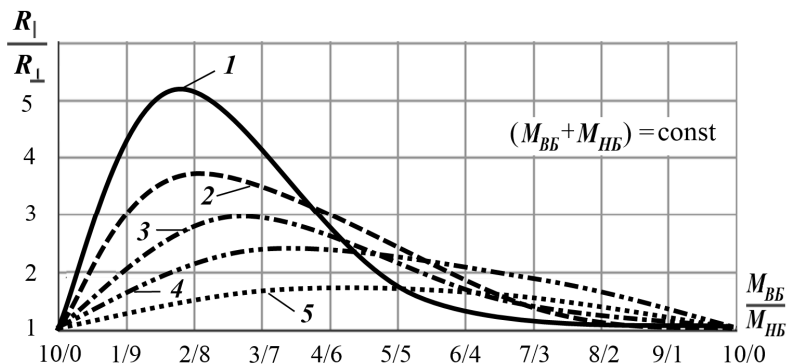
гірської породи певною мірою можна визначити за орієнтацією кристалічних осей породоутворюючих мінералів у її зразках. Але – не завжди. Найвагоміше значення щодо анізотропії масиву має макротріщинуватість масивів – системна. Виконані ж нами спостереження і виміри, а також їх статистична обробка показали, що остання далеко не завжди відповідає векторній анізотропії мінералів у породі.

Анізотропія пружних властивостей кристалічних середовищ найбільш суттєво позначається на характері поширення хвиль стиснення, що розповсюджуються від підірваного заряду ВР. Що стосується найбільш руйнівних – поздовжніх хвиль, то з кристалоакустики [7] відомо, що вони поширюються в кристалічних середовищах з різною швидкістю в напрямках, по-різному орієнтованих відносно осей кристалів, маючи найчастіше максимальні значення в напрямках, які збігаються з цими осями і мінімальні – в напрямках бісектрис між осями.

Для конкретного визначення конфігурації зон рівнонапруженого стану в тріщинуватих масивах, наприклад, ізоліній напружень або кругової векторної діаграми фронту пружної хвилі, необхідно проаналізувати зміну швидкості поширення хвиль в масиві щодо орієнтації кристалоутворюючих осей породи і тріщинуватості масиву, а також процеси заломлення і відбивання при проходженні хвилі через тріщини.

Таким чином очевидно, що, в найпростіших випадках, при розкритих тріщинах, максимальним вплив на масив порід від заряду ВР, розміщеного і підірваного в ньому, буде в напрямках, перпендикулярних до його тріщинуватості й уздовж шаруватості та поступово, при відхиленні від цих напрямів, буде знижуватися до мінімуму, який відповідає куту повного внутрішнього відбивання породи. Знаючи ці кути і закон поширення фронту хвилі, а також параметри заряду ВР, можна побудувати годографи поздовжніх і поперечних хвиль, а також ізолінії рівних значень різних параметрів розповсюдження інших хвиль.

У нашому випадку пропонується новий підхід, розроблений на базі експериментальних досліджень, спрямованих на оптимізацію дії розробленого комбінованого заряду ВР (див. рис. 1), за якого встановлюється залежність спрямованості дії такого заряду на породний масив від співвідношення величин різнобризантних компонентів у ньому при незмінній загальній масі (рис. 3).



Співвідношення кількості високобризантної ВР- M_{BB} та низькобризантної- M_{NB}

Рис. 3. Залежність спрямованості дії комбінованого заряду ВР на породний масив від співвідношення величин різнобризантних компонентів

При цьому співвідношення параметрів пружних хвиль паралельно та перпендикулярно орієнтації шаруватості або системної тріщинуватості породного масиву дуже тісно корелює з розглянутими вище закономірностями трансформації фронту хвилі при послідовному перетинанні нею таких регулярних порушень структури середовища.

Наведені вище дослідження дозволяють відносно просто і в той же час достатньо адекватно оцінити характер формування напруженого стану породного масиву при диференційованому його насиченні підриванням конструктивно різнотипних свердловинних зарядів, графічна візуалізація чого наглядно орієнтує гірничого інженера на необхідне орієнтування мережі свердловин відносно структури масиву в залежності від того, чи потрібно забезпечити максимально рівномірне дроблення породи (рис. 4, а), чи створити зони мінімальних порушень при видобутку природного каменю (рис. 4, б), чи формувати в масиві відбиваючі або екрануючі щілини (рис. 4, в).

Висновки. На підставі наведеного аналізу можна, в найпростіших випадках, досить впевнено рекомендувати орієнтацію сітки вибухових свердловин щодо тріщинуватості масиву і відповідним чином керувати процесом вибуху та його результатами. При цьому, при прямокутній сітці свердловин за рівних інших параметрів, максимально рівномірне дроблення породи буде досягатися при діагональному орієнтуванні її відносно тріщин – і навпаки.

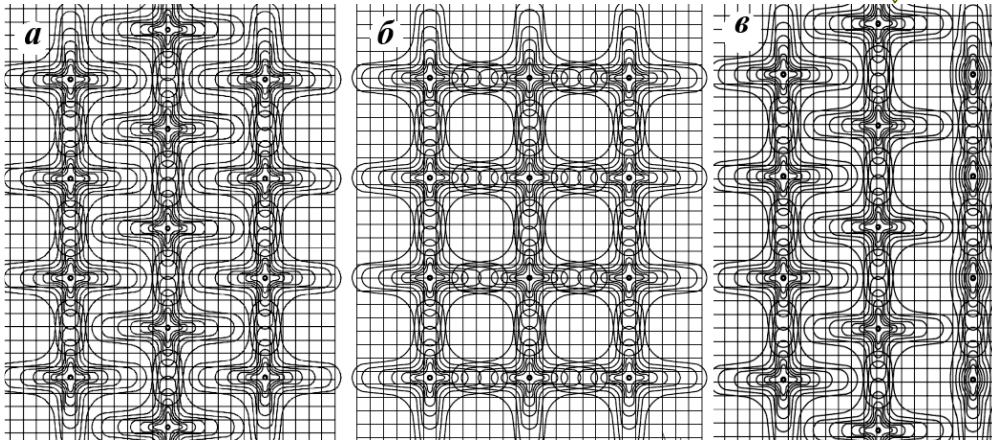


Рис. 4. Диференційоване енергонасичення породного масиву при квадратній та «шаховій» мережі свердловин

Точні обчислення контурів – надзвичайно складні навіть для ідеалізованих моделей, а в застосуванні щодо реальних мінеральних середовищ, тим більше полімінеральних, які мають складну структуру, як, наприклад, тріщинуваті гнейси або порушені кварцитові сланці, – взагалі неможливі. У зв'язку з цим і пропонується даний метод наближених обчислень, точність якого для інженерних розрахунків є цілком достатньою.

1. Анистратов Ю. И. Технологические процессы открытых горных работ / Ю. И. Анистратов, К. Ю. Анистратов. – М. : Горное дело, 2008. – 448 с.
2. Бизов В. Ф. Вибухові роботи / В. Ф. Бизов, П. Й. Федоренко. – Кривий Ріг : Мінерал, 2001. – 230 с.
3. Бротанек И. Контурное взрывание в горном деле и строительстве / Бротанек И., Вода Й. – М. : Недра, 1983. – 144 с.
4. Совершенствование технологии буровзрывных работ на предельно контуре карьеров / Фокин В. А., Тарасов Г. Е., Тогунов М. Б., Данилкин А. А., Шитов Ю. А. – Апатиты : Изд-во Кольского научного центра РАН, 2008. – 224 с.
5. Жуков С. А. Теоретические аспекты попутной добычи природного камня : монографія / Жуков С. А. – Кривой Рог : Минерал, 1999. – 187 с.
6. Скачков А. А., Сергієнко С. Є., Шапурін О. В., Сидоренко В. Д. Спосіб виконання буровибухових робіт. Пат. України UAN[№] 103516, С2 МПК (2013.10), F42 Д 3/04, за заявкою U 201110513, поданою 30.08.2011 р. Дата видачі 25.10.2013 р. Бюл. № 20.
7. Физическая энциклопедия. В 5-ти томах / главный редактор А. М. Прохоров.– М. : Советская энциклопедия, 1988.

Рецензент: д.т.н., професор Перегудов В. В. (Директор ДП «ДПі «Кривбас-проект»)

Skachkov A. A., Mining Engineer (Director of Technology and Production Planning Department of «Metinvest Holding Ltd»), **Zhukov S. A., Doctor of Engineering, Professor** (Kryvyi Rih National University), **Strikha V. A., Candidate of Engineering (Ph.D.), Associate Professor** (National University of Water and Environmental Engineering, Rivne)

PECULIARITIES OF FORCE FIELDS FORMATION IN EXPLOSIVE DESTRUCTION OF CRACKED ANISOTROPIC MOUNTAIN ROCKS

The main purpose of the presented research is to improve the technology of rock destruction by explosion. For this purpose, new methods for creating a differentiated stressed state of a rock massif as well as for constructing borehole charges of explosives have been developed. The process of amplitude and energy variation during the intersection of an elastic wave of macrocracks in a rock is analyzed. The main factors influencing the explosion on the stress state of rocks in the conditions of application of the developed author's solutions for the design of borehole charges, the formation of rock outcrops, the creation of additional reflecting waves of screen gaps, and the stability of vertical slopes of ledges are determined. The fracture of rocks with a change in the order of detonation of charges in the series of wells in the direction from the second or third – to the first is considered. Explosive destruction of the rock massif with the use of vertical slopes of the quarry ledges, with the making of shielding slots, which are created by advanced explosion of special directional charges, as well as the reverse sequence of blasting of the borehole series, provides a reduction in the specific consumption of explosives by 15-17% and substantially increases the uniformity of rock crushing.

Further development and manufacturing application of the research results will provide a significant reduction in the cost price of iron ore products by increasing the efficiency of drilling and blasting operations in the open pit.

***Keywords:* rock, explosion, elastic wave, tension, anisotropy.**

Скачков А. А., горный инженер (Директор департамента технологий и планирования производства ООО «МЕТИНВЕСТ ХОЛДИНГ»),
Жуков С. А., д.т.н., профессор (ГВУЗ «Криворожский национальный университет», г. Кривой Рог), **Стриха В. А., к.т.н., доцент** (Национальный университет водного хозяйства и природопользования, г. Ровно)

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ СИЛОВЫХ ПОЛЕЙ ПРИ ВЗРЫВНОМ РАЗРУШЕНИИ ТРЕЩИНОВАТЫХ АНИЗОТРОПНЫХ ГОРНЫХ ПОРОД

Проанализирован процесс изменения амплитуды и энергии при пересечении упругой волной макротрещин в горной породе. Определены основные факторы влияния взрыва на напряженное состояние горных пород в условиях применения разработанных авторских решений по конструкции скважинных зарядов, формированию породных обнажений, созданию дополнительных отражающих волны экранных щелей, а также устойчивости вертикальных откосов уступов. Рассмотрены разрушения пород с изменением порядка подрывания зарядов в рядах скважин в направлении от второго или третьего – к первому.

Ключевые слова: горная порода, взрыв, упругая волна, напряжение, анизотропия.
