

К.С. Іщенко, к.т.н., с.н.с.,
(ІТМ)С.А. Ус, к. ф-м. н., доц.,
М.М. Вдовиченко, бакалавр - системний аналітик
(НГУ)**ОПТИМІЗАЦІЯ ПАРАМЕТРІВ ВРУБА ДЛЯ ЕФЕКТИВНОГО
РУЙНУВАННЯ НАПРУЖЕНОГО СЕРЕДОВИЩА ВИБУХОМ**

Проведены экспериментальные исследования по обоснованию рациональных параметров вруба и конструкций шпуровых зарядов при моделировании взрывного разрушения напряженных сред. Предложена математическая модель для оптимизации рациональных параметров вруба.

**OPTIMIZATION THE PARAMETERS OF THE CUT HOLE FOR
EFFECTIVE BLASTED BREAKAGE THE STRESSED MEDIUM**

Experimental researches on the ground of rational parameters of the cut hole and constructions blast hole charges during the modeling the blasted breakage are conducted mediums of the stressed. A mathematical model is offered for optimization of rational parameters of the cut hole.

Вступ. При проведенні підготовчих виробок буро-вибуховим способом на глибоких горизонтах вугільних шахт Донбасу, рудників Криворіжжя, ДП «СхідГЗКа» та ЗЖРКА зменшилась ефективність руйнування гірських порід, а саме: знизився коефіцієнт використання шпурів (КВШ), зросла дальність викиду гірничої маси і руйнування постійного кріплення. Основні причини зниження приведених показників – зростання напруженого стану гірничого масиву пов'язані з поглибленням рівня ведення видобутку корисних копалин [1-2].

Аналіз стану проблеми. Підвищення ефективності проходки горизонтальних гірничих виробок може бути досягнуто рішенням цілого ряду задач, що включають як поліпшення організації праці, так і вдосконалення буро-вибухових робіт. При прийнятій організації праці та наявності застарілого бурового обладнання це можна здійснити шляхом більш повного використання енергії вибуху, що дозволяє збільшити посування вибою за цикл [3].

Слід зазначити, що при виборі геометрії розташування шпурових зарядів (врубових, оконтурюючих та компенсаційних виїмок) не враховуються такі особливості мікро- і макроструктури руйнуючих порід (слоїстість, лінійність мінеральних агрегатів, направленість мікро- і макротріщин, густина дефектів будови деяких мінеральних зерен, метасоматичні зміни породообразуючих мінералів, внутрішнє міжзернове напруження і т.п.), які суттєво впливають на характер вибухового руйнування анізотропних полімінеральних порід – гранітів, мігматитів, альбітитів. Таким чином, урахування особливостей внутрішньої будови порід даного класу при їх руйнуванні з використанням енергії вибуху дозволить не тільки збільшити КВШ, а і проводити так зване «гладке» підривання, яке на основі врахування структури порід успішно використовується в промислово розвинутих країнах при проходці тунелів [4].

Головним чинником з точки зору підвищення ефективності дії вибуху при руйнуванні твердого середовища є врубові шпурові заряди, призначення яких полягає в формуванні додаткової вільної порожнини на поверхні вибою, дозволяючи облегшити роботу зарядів додаткових та оконтурюючих шпурів. Тому, щоб збільшити ефективність вибухової відбійки порід в забої підготовчої виробки необхідно розробити та обґрунтувати схеми розташування шпурів, які можливо використовувати в способах формування врубової порожнини з урахуванням напружено-деформованого стану породного масиву [5].

Для дослідження впливу напруженого стану масиву і граничних умов на результат дію вибуху, необхідно знати параметри вибухового імпульсу, що діє на стінки зарядної порожнини, які дозволяють оцінити характер руйнування напруженого середовища. Отже, для обґрунтування параметрів буропідричних робіт при відбійці корисних копалин і руйнування порід на великих глибинах при проведенні виробок в умовах підвищеної напруженості гірського тиску, що призводить до завищення обсягів бурових робіт, витрати вибухових речовин (ВР) і засобів підривання (ЗП). Тому вивчення зазначених чинників є необхідною умовою для практичного вирішення питань розробки нових технологічних паспортів буровибухових робіт (БВР) в статично напружених породах, що забезпечують темпи проведення та якісне оконтурювання виробок, зниження втрат корисних копалини при його відбійки. У цих умовах значний інтерес становлять дослідження, спрямовані на виявлення основних закономірностей руйнування статично напружених середовищ, облік яких дозволить розробити раціональні геометричні параметри вруба при проведенні підготовчих виробок на великих глибинах у над міцних складно структурних напружених гірських породах магматичного походження, які важко підривати.

Реалізація цих положень може бути досягнена розробленим нами способом утворення врубової порожнини в міцних напружених породах [6]. Суть якого полягає в підриванні зарядів триярусного циліндричного врубу з уповільненням, починаючи із зарядів кумулятивної дії на компенсаційну порожнину. При цьому досягається підвищення ефективності вибуху зарядів вибухових речовин (ВР) у врубових шпурах по руйнуванню масиву гірських порід в зоні дії об'ємного теплового поля та перерозподілу статичних напружень по ходу проведення виробки, який дозволяє збільшення глибини і об'єму врубової виїмки, швидкості проходки виробки, якості дроблення порід, зниження питомої витрати ВР, засобів підривання (ЗП), обсягу бурових робіт, підвищення коефіцієнта корисної дії (ККД) вибуху і КВШ, продуктивності роботи вантажно-транспортних засобів.

Мета дослідження – обґрунтування раціональних параметрів вруба та конструкцій шпурових зарядів при руйнуванні напруженого середовища вибухом.

Матеріали і результати досліджень. Для рішення поставлених задач були проведені дослідження, спрямовані на виявлення основних

закономірностей руйнування напружених середовищ вибухом.

Експериментальні дослідження впливу конструкції зарядів у врубі з незарядженою компенсаційною порожниною і її діаметра при їх спільній взаємодії на руйнування напруженого середовища проводились на піщано-цементних моделях в полігонних умовах.

Відповідно до методики досліджень моделі виготовлялись у формі циліндрів діаметром 270 мм і висотою 200 мм (рис.1), а моделювання напруженого стану середовища створювалося шляхом заливання піщано-цементної суміші в сталеву форму, що має одну вільну поверхню з фіксуванням її спеціальною обтисковою обіймою. Товщина стінок форми перебувала в межах 2-3 мм. Піщано-цементна суміш готувалася в пропорції: кварцовий пісок + цемент марки 400 = 1:1 з додаванням 10% води.

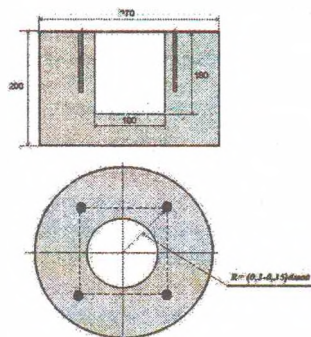
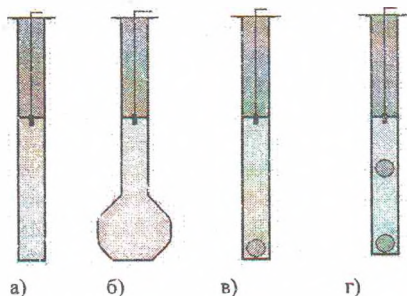


Рис. 1 – Схема циліндричної моделі з комплектом врубових шпурів навколо компенсаційної порожнини

В центрі моделі формувалася компенсаційна порожнина циліндричної форми діаметром від 40 до 100 мм і глибиною 180 мм. Навколо компенсаційної порожнини від центру по колу радіусом $R = (0,3-0,35)d_{mod}$, де: d_{mod} – діаметр циліндричної моделі, у вершинах вписаного квадрата на глибину 170 мм за допомогою вставок формувалися елементи вруба – чотири циліндричні порожнини діаметром 10 мм для розміщення в них зарядів вибухової речовини (рис. 1).

Для збільшення поверхні контакту ВР з руйнуючим середовищем, в процесі проведення досліджень в полігонних умовах заряди ВР розміщувалися в паперових циліндрах (патрони), в яких формувалися заряди суцільної конструкції, змінного за висотою перерізу та зі сферичною вставкою в торці свердловини і рівномірно розташованої по висоті заряду. Зовнішній діаметр патронів становив 0,95 діаметра зарядної порожнини, а внутрішній – 0,92, так щоб патрон щільно прилягав до стінок порожнини. Конструкції зарядів приведені на рис.2.



а) заряд постійного перерізу; б) заряд з котлових розширенням в торці свердловини;
в) заряд зі сферичною вставкою в торці свердловини; г) заряд з почерговими сферичними вставками

Рис.2 – Схема конструкцій зарядів вибухової речовини.

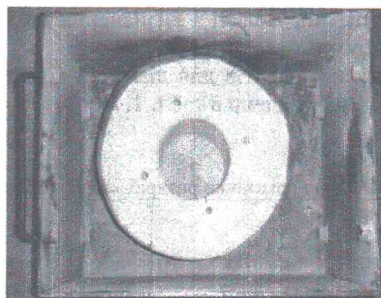
В підготовлених циліндричних порожнинах формувалися подовжені заряди, згідно з конструкцією (рис.2), вибуховою речовиною за своїми характеристиками наближеною до промислових вибухових речовин (наприклад, Грамоніт 79/21), що складається із суміші – ген (80%) і тверде ракетне паливо (20%) з наступними детонаційними характеристиками: швидкість детонації $D=4900$ м/с, розрахунковий тиск на стінки зарядної порожнини $P_n = 2,81$ ГПа, розрахункова теплота вибуху $Q = 4910$ кДж/кг, акустичний імпеданс $\rho_{вр}D = 0,46 \cdot 10^7$ кг/м²с, щільність вибухової речовини становила $\rho_{вр} = 935$ кг/м³ [7]. В якості набійки використовувався кварцовий пісок фракції 0,25 мм. Для підризу зарядів ВР формувалися бойовики з розміщенням в паперові гільзи діаметром 3-2 мм чистого тону масою 80 мг з ініціатором, виготовленим із ніхромового містка з навішуванням на нього крапельки азиду свинцю масою 10 мг. Загальна маса сумішевої вибухової речовини у зарядах всіх серій експериментів становила 4,0 г, питома витрата при цьому складала 0,3 кг/м³.

Так як руйнуюча дія вибуху сильно залежить від фізико-механічних властивостей середовища, то одночасно з виготовленням основних моделей виготовлялися зразки для визначення щільності ρ , швидкості подовжених хвиль C_p і міцності на одновісний тиск $\sigma_{ст}$ матеріалу моделей.

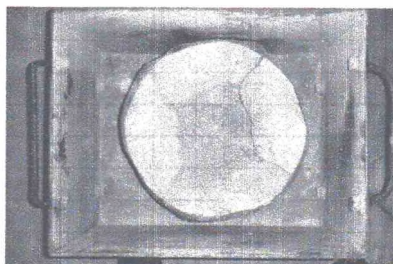
Згідно діючих Держстандартів [8-10] і використаного для випробувань обладнання, були визначені щільність матеріалу, швидкість подовженої хвилі і міцності на одновісний тиск, а також середні квадратичні відхилення та коефіцієнти варіації цих величин для піщано-цементних моделей.

При обробці результатів випробувань обчислювали середнє арифметичне значення густини, швидкості подовжених хвиль і міцності на тиск матеріалу моделей, які мають наступні значення: густина – 1920 кг/м³; швидкість подовжених хвиль – 3150 м/с і міцності на тиск – 24,6 МПа.

У процесі експериментів моделі розміщувалися в металевій вибуховій камері і дистанційно підривалися (рис.3). Внутрішні стінки вибухової камери щоб уникнути додаткового руйнування матеріалу моделей були закриті конвеєрною стрічкою.



а)



б)

а) до вибуху; б) після вибуху
Рис. 3 – Загальний вигляд циліндричної моделі, яка розташована у вибуховій камері

Після вибуху зруйнований матеріал моделі аналізувався по двом основним показникам: характер руйнування моделі в цілому і ступеню подрібнення відбитої від основної частки моделі зруйнованого середовища при взаємодії групи зарядів на компенсаційний простір.

Гранулометричний склад зруйнованої частки моделі оцінювався за методикою Барона А.Н. [11]. При обробці гранулометричного складу роздробленої частки моделі визначалась її загальна маса і відсотковий розподіл дрібних (до 35 мм), середніх (до 44 мм) та крупних фракцій, діаметр середнього шматка (d_{sr}), об'єм відбитої частини моделі (V) і площа новоутвореної поверхні (S_n).

Головна задача щодо обґрунтування раціональних параметрів вруба, які впливають на інтенсивність руйнування твердого середовища полягала в на-

ступному:

– вивчення впливу діаметра порожнини в центрі моделі на результати вибуху;

– визначення найсуттєвіших з приведених показників для оцінки характеру руйнування моделей;

– побудова математичної моделі і визначення на її основі оптимальних значень показників вибуху.

Результати 15-ти експериментів для діаметра компенсаційної порожнини (d_{pc}), яке дорівнює 100 мм наведено в табл. 1.

Таблиця 1 – Основні показники роздрібленої частки моделі вибухом

№ експерименту	d_{sr}	V	S_H
1	31,7	2,3	81,2
2	37,3	1,8	83,7
3	34,4	1,7	81,7
4	30,1	2,2	85,2
5	33,1	2,4	86,5
6	32,3	2,1	88,4
7	34,4	2,1	86,3
8	38,3	1,6	83,5
9	34,7	1,9	85,6
10	28,9	2,3	87,3
11	35,5	2,2	89,4
12	37,7	2,2	90,5
13	30,8	2,4	88,9
14	34,4	2,5	86,2
15	30,9	2,2	84,1

Метою поліпшення технологічного процесу руйнування твердого середовища є отримання максимальної кількості середніх фракцій, тому встановлено, що основними досліджуваними показниками вважається діаметр середнього шматка і відсоткове співвідношення кількості різних видів фракцій.

Результати дослідження залежності об'єму відбитої вибухом частини моделі і площі новоутвореної поверхні від діаметра середнього шматка показали, що суттєвої залежності не існує.

Аналіз залежності кількості різних видів фракцій від розміру діаметра порожнини проводився на основі даних, наведених у табл. 2. Експерименти проводилися при зміні діаметра від 40 до 100мм.

Таблиця 2 – Відсотковий розподіл кількості фракцій зруйнованих вибухом частки моделі

Діаметр компенсаційної порожнини в центрі моделі, мм	Кількість дрібних фракцій, $K_{міл}$, %	Кількість середніх фракцій, $K_{ср}$, %	Кількість крупних фракцій, $K_{кр}$, %	Діаметр середнього куска, мм
100	34,2	31,4	34,4	33,53
90	34	31,2	34,8	38,4
80	33,8	30,6	35,6	43,8
70	31	33,6	35,4	45,1
60	27,8	34,2	38	47
50	26,4	33,6	40	50,29
40	24,5	32,5	43	53,64

Побудування рівнянь регресії і обчислення їх адекватності виконувалося за допомогою засобів MS Excel із врахуванням фізичної сутності процесу. На рис. 4 подано залежність кількості дрібних фракцій від діаметра порожнини в центрі моделі і відповідну лінію регресії.

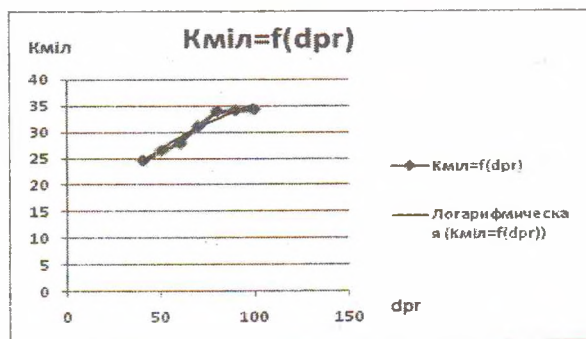


Рис. 4 – Залежність кількості дрібних фракцій ($K_{міл}$) від діаметра порожнини ($d_{пр}$)

Отримане рівняння регресії має вигляд

$$K_{міл} = 11,96 \ln(d_{пр}) - 20,06 \quad (1)$$

Для перевірки адекватності отриманої моделі обчислено коефіцієнт детермінації який дорівнює 0,94. Отже, модель враховує 94% кількості дрібних фракцій при зміні діаметра порожнини в центрі моделі від 40 до 100 мм. Коефіцієнт апроксимації даного рівняння дорівнює 0,95. Аналогічно отримано

аналітичний вигляд залежності кількості середніх та крупних фракцій від діаметра порожнини, відповідні рівняння мають наведений нижче вигляд.

Для кількості середніх фракцій

$$K_{cp} = 0,000129(dpr)^3 - 0,029(dpr)^2 + 2,018dpr - 9,631 \quad (2)$$

де коефіцієнт детермінації складає $-0,99$, а апроксимація $-0,98$.

Для кількості крупних фракцій

$$K_{kp} = -9,44 \ln(dpr) - 77,03$$

де коефіцієнт детермінації $-0,98$, а апроксимація $-0,94$.

Тобто існує сильна залежність між розподілом фракцій різної величини і діаметром порожнини. Це означає, що можна покращити параметри вибуху шляхом вибору оптимального діаметра порожнини.

Враховуючи отримані залежності побудуємо математичну модель. За цільові функції візьмемо кількість середніх (її необхідно максимізувати) та кількість дрібних (її необхідно мінімізувати) фракцій. Тоді цільові функції будуть мати такий вигляд:

$$\begin{aligned} 0,000129(dpr)^3 - 0,029(dpr)^2 + 2,018dpr - 9,631 &\rightarrow \max, \\ 11,96 \ln(dpr) - 20,06 &\rightarrow \min. \end{aligned}$$

Крім того існують обмеження на розмір середнього куска та природні обмеження для відсоткового складу фракцій, а саме:

$$\begin{aligned} 35 &\leq dsr \leq 44, \\ K_{ml} + K_{cp} &\leq 100, \\ 40 &\leq dpr \leq 100, \\ dsr &= -0,156dpr + 31,26. \end{aligned}$$

Враховуючи обмеження на діаметр порожнини, остаточно математичну модель отримуємо у вигляді:

$$\begin{aligned} 0,000129(dpr)^3 - 0,029(dpr)^2 + 2,018dpr - 9,631 &\rightarrow \max, \\ 11,96 \ln(dpr) - 20,06 &\rightarrow \min. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} 35 &\leq dsr \leq 44, \\ K_{ml} + K_{cp} &\leq 100, \\ 40 &\leq dpr \leq 100, \\ dsr &= -0,156dpr + 31,26. \end{aligned}$$

Це є багатокритеріальна задача оптимізації. Оскільки кількість дрібних фракцій не може дорівнювати 0, то для її розв'язування будемо використовувати таку згортку:

$$\frac{K_{cp}}{K_{ml}} \rightarrow \max$$

В результаті задача набуває виду:

$$\frac{0,000129(dpr)^3 - 0,029(dpr)^2 + 2,018dpr - 9,631}{11,96 \ln(dpr) - 20,06} \rightarrow \max$$

$$35 \leq dsr \leq 44,$$

$$K_{ml} + K_{cp} \leq 100,$$

$$40 \leq dpr \leq 100,$$

$$dsr = -0,156dpr + 31,26.$$

Цю задачу було вирішено за допомогою засобів MS Excel.

В результаті виконаних досліджень обґрунтовано оптимальний діаметр порожнини в центрі моделі, який дорівнює 69 мм, кількість середніх фракцій 33,9%, кількість дрібних фракцій 30%, діаметр середнього шматка – 44мм.

Висновки. По результатах експериментальних досліджень побудована математична модель, яка дозволяє обґрунтувати і визначити раціональні геометричні параметри врубів, що призведуть до підвищення техніко-економічних показників проходки горизонтальних виробок в напружено деформованому стані масиву гірських порід.

Для отримання додаткових даних планується проведення нової серії експериментальних досліджень по впливу зміненої конфігурації компенсаційної порожнини, наприклад еліпсоїдної форми і обґрунтуванню параметрів свердловинних зарядів нового способу проведення підняттявої виробки з урахуванням напруженого стану руйнуючого середовища. В теперішній час для проведення таких досліджень враховуються деякі положення методики досліджень, готуються зразки моделей і експериментальні прилади.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Ищенко К.С. Повышение эффективности взрывной проходки выработок на рудных шахтах / К.С. Ищенко, В.Н. Конзал // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2006. – № 6. – С.68-70.
2. Ищенко К.С. Управление взрывным разрушением напряженных горных пород – один из путей снижения дальности разлета породы и повреждения постоянного крепления в забое подготовительной выработки / К.С. Ищенко // *Научный вестник НГУ*. – Днепропетровск: – 2008. – №1. – С.19-25.
3. Ищенко К.С. Повышение эффективности способов взрывного разрушения крепких напряженных пород при проведении выработок в шахтах / К.С. Ищенко, Н.Н. Налышко // *Научный вестник НГУ*. – Днепропетровск: – 2008. – №2. – С.12-16
4. Ищенко К.С. Экспериментальные исследования влияния микроструктуры на характер взрывного разрушения урановых руд Ватугинского месторождения / К.С. Ищенко,

И.Л. Кратковский // Науковий Вісник НГУ. – Дніпропетровськ, 2008. – №8. – С.58-64.

5. Ищенко К.С. Повышение эффективности способов управления взрывным разрушением крепких напругенных пород в глубоких шахтах / К.С. Ищенко, А.К Ищенко // Уголь – 2009 – №2 – С.9–12.

6. Пат. № 88827 Україна МПК 7 E21C 37/00 Спосіб утворення врубової порожнини в міцних напружених породах / Булат А.Ф., Ищенко К.С. Осінній В.Я.; заявник і власник патенту ПТМ НАН України – № а 2008 03853; замоєля. 27.03.2008; надр. 25.11.2009. – Бюл. №22 – 6с.

7. Ефремов Э.И. Оценка эффективного действия смесевых зарядов ВВ с энергоактивными добавками/ Э.И.Ефремов, В.М. Комир, В.А. Низифорова // Высокоэнергетическая обработка материалов. – Сб. научн. трудов НГА Украины. – Днепропетровск: – 1999. – №8. – С.77–80.

8. ГОСТ 21153.0–75. Породы горные. Отбор проб и общие методы физических испытаний. Введен с 01.07.75. – М.: Изд-во стандартов, 1976. – 20с.

9. ГОСТ 21153.2–84. Породы горные. Метод определения предела прочности при одноосном сжатии. Введен с 01.07.86. – М.: Изд-во стандартов, 1986. – 10с.

10. ГОСТ 21153.7–75. Породы горные. Метод определения скоростей распространения упругих продольных и поперечных волн. Введен с 01.01.75. – М.: Изд-во стандартов, 1976. – 35с.

11. Барон Л.И. Определение свойств горных пород / Л.И. Барон, Б.М. Логунцов, Е.З. Позин. – М.: Гос.научн.–техн.изд лит.по горному делу, 1962. – 332с.