

ДИНАМІКА ЗМІНИ ТИСКУ В ЗОНІ ПОВІТРЯНОГО ПРОМІЖКУ В РАЗІ ЗАСТОСУВАННЯ КУМУЛЯТИВНОГО ЕФЕКТУ

Віктор Воробйов

доктор технічних наук, професор кафедри машинобудування

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, вул. Університетська, 20, Кременчук, Полтавська область, Україна, 39600, vvv.imit@gmail.com

ORCID: 0000-0002-3446-4714

Лариса Воробйова

кандидат технічних наук, доцент кафедри машинобудування

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, вул. Університетська, 20, Кременчук, Полтавська область, Україна, 39600, larivorobiova@gmail.com

ORCID: 0000-0002-5333-6091

Руслан Пастушенко

аспірант кафедри машинобудування

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, вул. Університетська, 20, Кременчук, Полтавська область, Україна, 39600, r.m.pastushenko@gmail.com

ORCID: 0000-0003-1087-1558

Робота присвячена промисловій перевірці ефективності розробленої нової конструкції розосередженого заряду вибухової речовини при уступній відбійці гірських порід на залізородних кар'єрах. Досліджено особливості процесу вибухового руйнування гірських порід свердловинними зарядами різної конструкції. В роботі для різних видів сучасних промислових вибухових речовин розроблена методика визначення параметрів продуктів вибуху в зоні повітряного проміжку. На основі теоретичних результатів розроблену нову конструкцію та встановлені параметри кумулятивного замикаючого пристрою, який розташовується у нижній частині верхнього заряду.

Експериментальними дослідженнями підтверджено, що удосконалена конструкція розосередженого свердловинного заряду дозволяє зосередити енергію вибуху в зоні повітряного проміжку. Визначено вплив параметрів кумулятивної виїмки та властивостей вибухової речовини на зміну тиску продуктів детонації в зоні повітряного проміжку. В промислових умовах встановлено взаємозв'язок між параметрами розосередженого свердловинного заряду та гранулометричним складом зруйнованої гірської маси. Це приводить до значного впливу кумулятивного замикаючого пристрою на зміну параметрів продуктів детонації в зоні повітряного проміжку.

Розроблено раціональну конструкцію замикаючого пристрою, яка враховує особливості його застосування у промислових умовах та наведено основні технологічні вимоги до матеріалу та параметрів для виготовлення та застосування кумулятивного замикаючого пристрою. Зокрема, встановлено, що за рахунок застосування кумулятивного ефекту можна збільшити довжину повітряного проміжку в 1,25 рази та на 20% зменшити витрати вибухової речовини.

Таким чином, є підстави стверджувати, що запропонована конструкція розосередженого свердловинного заряду належним чином впливає на гранулометричний склад зруйнованої гірської маси.

Ключові слова: вибухова речовина, динаміка, рух, заряд, кумулятивний ефект, повітряний проміжок, тиск, тріщина, свердловина.

Актуальність роботи. Буровибухові роботи займають одну з базових позицій у комплексі процесів гірничодобувної промисловості, оскільки фактично це – початковий етап, результати якого значною мірою впливають на умови роботи та продуктивність екскаваторів, транспортного та дробильного обладнання. Ступінь дроблення гірських порід безпосередньо пов'язаний з технологіями ведення вибухових робіт на гірничодобувному підприємстві. Тен-

денція розвитку даної галузі та аналіз існуючих технологій показує [1], що у найближчі десятиліття основним способом первинного руйнування гірських порід, як і раніше, буде використання енергії вибуху. Тому актуальним слід вважати дослідження, спрямовані на розробку нових методів підвищення ефективності вибуху, а також модернізацію існуючих, що є базовим завданням галузі. Одним з можливих варіантів вирішення цієї проблеми можливо подальше

вдосконалення конструкції свердловинних зарядів з повітряними проміжками.

Аналіз літературних даних та постановка проблеми. Необхідно відзначити, що заряди з повітряними проміжками були вперше запропоновані минулого століття [2] і активно використовувалися на кар'єрах (особливо на підприємствах будівельної індустрії).

На теперішній час, коли підвищується вартість вибухових речовин та витрати на подальшу обробку, підприємства заново почали використовувати заряди з повітряними проміжками. При цьому однією з головних особливостей зарядів з повітряними проміжками є зниження тиску та забезпечення багаторазового навантаження середовища в зоні проміжку. Для залізрудних кар'єрів перший ефект менш позитивно впливає на кінцевий результат вибуху, оскільки отримання дрібніших шматків суттєво знижує енерговитрати на наступних етапах подрібнення. Але цей недолік можна усунути за рахунок використання кумулятивного ефекту у зоні повітряного проміжку.

Більшість існуючих розробок здебільшого спрямовані на забезпечення можливості формування кумулятивного ефекту у суцільних свердловинних зарядах. У роботі [3] показана можливість створення поздовжньої кумулятивної виїмки за рахунок розміщення в свердловині спеціальних шаблонів.

Авторами [4] були проведені лабораторні дослідження впливу повітряних проміжків у заряді на ефективність вибухового руйнування на зразках з цементного розчину та чисельне моделювання процесу утворення тріщин та зон дроблення при поширенні вибухової хвилі. Отримані результати показують, що, у порівнянні з суцільним зарядом, структура заряду з повітряними проміжками може покращити розподіл фрагментів за розміром та збільшити коефіцієнт використання енергії вибуху. Однак у роботі не наведено аналіз даного ефекту для різних типів порід, а також відсутні рекомендації щодо раціонального розміщення повітряного проміжку.

У дослідженнях [5; 6] здійснювалися спроби оцінити вплив довжини повітряного проміжку на підставі результатів подальшого дроблення, враховуючи відстань між свердловинами та їх розташування. Авторами встановлено, що при раціональному співвідношенні висоти повітряного проміжку до діаметра свердловин можна досягти зниження виходу негабариту до 40%. Але існують інші неконтрольовані параметри, що можуть

впливати на фрагментацію вибуху і які також не розглядаються, як і способи формування повітряних проміжків.

На основі теорії ударних труб в роботі [7] проводиться оцінка поздовжнього навантаження на стінки свердловини внаслідок багаторазових відображень ударних хвиль у повітряному середовищі і, як результат, збільшення швидкості утворення початкової мережі тріщин, що підтверджує ефективність використання повітряних проміжків у заряді. При цьому хвилі розвантаження, що виникають, є причиною розтягуючих навантажень в гірському масиві. При всій простоті аналітичного опису процесів у розосередженому повітряних проміжками заряді, одномірний підхід має істотний недолік – він не враховує ефекту поперечних ударно-хвильових збурень. А такі збурення мають місце під час вибухів реальних зарядів.

Автори [8] пропонують підвищувати ефективність використання повітряного проміжку за рахунок зміни поперечного перерізу повітряної порожнини. Використання форми порожнини, що змінюється (трикутник, квадрат, прямокутник), дозволяє при вибуху отримати кумулятивні струмені, які формуються в кутах багатокутника і сприяють підвищенню вибухового впливу на руйноване середовище.

Але запропоновані способи створення кумулятивного ефекту в заряді свердловин мають істотні недоліки: відсутня можливість зміни довжини повітряного проміжку; складність осьового фіксування у свердловинному заряді, особливо у зимовий час; висока трудомісткість використання в обводнених умовах.

Мета та задачі дослідження. Проведені дослідження ставили за мету визначити ефективність розробленої нової конструкції розосередженого заряду вибухової речовини при уступній відбійці гірських порід на залізрудних кар'єрах та дослідити особливості процесу вибухового руйнування гірських порід свердловинними зарядами різних конструкцій.

Для досягнення поставленої мети вирішувалися такі задачі:

- 1) теоретично оцінити вплив параметрів кумулятивного замикаючого пристрою на зміну тиску продуктів детонації в зоні повітряного проміжку;
- 2) встановити взаємозв'язок між кутом кумулятивної виїмки в замикаючому пристрої та гранулометричним складом зруйнованої гірської породи;

3) дослідити вплив параметрів розосередженого заряду нової конструкції на характер руйнування гірської породи.

Матеріали та методи дослідження. Головними напрямками підвищення ефективності вибухових робіт є пошук та розробка таких конструкцій зарядів вибухових речовин, при застосуванні яких було б можливо максимально перетворити енергію вибуху на корисну роботу руйнування та деформування гірничого масиву. Цим питанням присвячені роботи багатьох вітчизняних учених, однак величина коефіцієнта корисної дії вибуху все ще залишається низькою.

Відомо, що детонація суцільного подовженого заряду вибухової речовини призводить до виникнення серед порожнини з високим тиском газоподібних продуктів детонації, а в оточуючій гірській породі виникає ударна хвиля. Незважаючи на те, що розміри зони поширення ударної хвилі незначні, висока амплітуда тиску та надзвичайна швидкоплинність процесу призводять до високих втрат енергії вибуху поблизу заряду на пластичні деформації та переподібнення середовища. Ця проблема вирішується за допомогою зарядів з повітряними проміжками. Основна перевага цих зарядів полягає в тому, що вони передають енергію вибуху середовищу не миттєво, а порціями, завдяки багаторазовому впливу продуктів детонації на стінки свердловини. Крім того, зіткнення в свердловині газових потоків від окремих частин заряду змінює газодинаміку розширення продуктів вибуху і збільшує тривалість вибухового впливу на середовище, що руйнується. Багаторазове навантаження вибухового масиву призводить до того, що весь наступний (за хвилиною стиснення) цуг хвиль бере активну участь у розвитку системи тріщин, що сприяє більш рівномірному руйнуванню гірської породи.

Відомо, що формування у заряді кумулятивної виїмки та ініціювання його з протилежного боку призводить до концентрації енергії вибуху у напрямку осі.

Якщо першим ініціюється нижній заряд, то після заповнення продуктами вибуху повітряного проміжку починається рух кумулятивного струменя. Зустрічаючи своєму шляху перешкоди (які перебувають під високим тиском продуктів детонації нижнього заряду), кумулятивний струмінь виробляє надзвичайно високий додатковий тиск, величина якого дорівнює

$$P_k = \frac{v_k^2 \rho_0}{4}, \quad (1)$$

де v_k – швидкість кумулятивного струменя, м/с;

ρ_0 – щільність матеріалу облицювання, кг/м³.

У свою чергу, швидкість кумулятивного струменя може бути визначена з наступної залежності [3]:

$$v_k = v_o \operatorname{ctg}(\alpha),$$

де v_o – середня швидкість схлопування конічної оболонки, що формує кумулятивну виїмку, м/с;

α – половинний кут розчину конічної оболонки.

Початкова швидкість схлопування конічної оболонки залежить від швидкості детонації, маси активної частини заряду та маси оболонки наступним чином [3]:

$$v_o = \frac{D\chi}{2} \sqrt{\frac{\beta}{\beta+2}}, \quad (2)$$

де D – швидкість детонації промислової вибухової речовини, що використовується, м/с;

β – коефіцієнт навантаження ($\beta = \frac{M_{ак}}{m_{об}}$, де $M_{ак}$ – маса активної частини заряду вибухової речовини, кг; $m_{об}$ – маса оболонки, кг);

χ – коефіцієнт, що враховує відхилення математичної моделі метання ділянок оболонки від реального процесу (для показника політропи продуктів детонації $k = 3$, $\chi = 1$, для $k = 2,25$, $\chi = 1,2$).

Обсяг активної частини циліндричного заряду, що бере участь у створенні кумулятивного ефекту, визначається як [3]:

$$V_{ак} = \frac{\pi r_o^3}{3},$$

$$\text{а його маса} - M_{ак} = \frac{\pi r_o^3}{3} \rho_{ВВ},$$

де r_o – радіус циліндричного заряду, м;

$\rho_{ВВ}$ – щільність вибухової речовини, кг/м³.

Маса поліетиленового облицювання для випадку конічної кумулятивної виїмки буде рівна:

$$m_{об} = S_{об} \delta_{об} \rho_{об},$$

де $S_{об}$ – повна поверхня конічної виїмки, м²;

$\delta_{об}$ – товщина поліетиленового облицювання, м;

$\rho_{об}$ – щільність матеріалу облицювання, кг/м³.

Повна поверхня конічної кумулятивної виїмки залежить від радіусу основи і кута розчину таким чином:

$$S_{об} = \pi r_o^2 \left(1 + \frac{1}{\operatorname{Sin} \alpha}\right).$$

Отже, для коефіцієнта навантаження отримаємо таку залежність:

$$\beta = \frac{r_o}{3\delta_{об}} \frac{\rho_{об}}{\rho_{об} \left(1 + \frac{1}{\sin \alpha}\right)} \quad (3)$$

Зважаючи, що щільність поліетилену знаходиться в межах $\rho_{об} = 1000\text{--}1100 \text{ кг/м}^3$, можемо допустити, що $\rho_{об} = \rho_{вв}$, тоді

$$\beta = \frac{r_o}{3\delta_{об} (1 + 1/\sin \alpha)}$$

Для промислових вибухових речовин можна прийняти, що $k \approx 2,25$, тоді залежність для початкової швидкості згортання конічного облицювання матиме такий вигляд:

$$v_o = 0,6D \sqrt{\frac{r_o \cos \alpha / \delta_{об}}{2 + r_o \cos \alpha / \delta_{об}}} \quad (4)$$

Нині діаметр свердловинних зарядів, які використовують при відкритій розробці корисних копалини, змінюється в межах від 200 до 320 мм, тобто $r_o \approx 130 \text{ мм}$.

Отже, при товщині конічної оболонки в межах 1–2 мм і кута розчину $30^\circ\text{--}60^\circ$, підкорінне вираження в залежності (4) знаходиться в межах 0,96–0,98, тому початкова швидкість згортання конічного облицювання для даних умов може приблизно визначатися по більш простій залежності

$$v_o = 0,6D.$$

В цьому випадку швидкість кумулятивного струменя буде рівна

$$v_k = 0,6D \text{ctg}(\alpha),$$

і при ударі по заповненому продуктами вибуху проміжку вона створюватиме тиск

$$P_k = \frac{0,36D^2 \text{ctg}^2(\alpha) \rho_{об}}{4} \quad (5)$$

Результати розрахунку відносної величини додаткового кумулятивного тиску (\bar{P}_k) для дея-

ких типів вибухових речовин і різних кутах розчину конічної виїмки приведені в таблиці 1, де $\bar{P}_k = \frac{P_k}{P_o}$, а $P_o = \frac{\rho_{об} D^2}{4}$.

або

$$\bar{P}_k = \frac{0,36 \text{ctg}^2(\alpha) \rho_{об}}{\rho_{об}} \quad (6)$$

Процес зіткнення ударної хвилі від нижнього заряду і кумулятивного струменя є складним газодинамічним завданням, оскільки при цьому необхідно враховувати розподіл параметрів не лише за фронтом ударної хвилі, але і в ПД. Після зіткнення в повітряному проміжку з'являється джерело у формі клину, від якого в обидві сторони від осі відійдуть ударні хвилі. За рахунок цього буде мати місце підвищення тиску газоподібних продуктів вибуху в повітряному проміжку. Необхідно відзначити, що при зіткненні в повітряному проміжку ударних хвиль від звичайних суцільних зарядів істотна концентрація напруги відбувається в дуже вузькому шарі, тоді як при використанні кумулятивного ефекту ця зона буде пропорційна ефективній довжині кумулятивного струменя, який складає (5–30) $d_{об}$, де $d_{об}$ – внутрішній діаметр конічного кумулятивного облицювання.

Отже, не лише у вузькій області зіткнення кумулятивного струменя і газоподібних ПД, але і на стінки свердловини в зоні повітряного проміжку діятиме додатковий тиск.

Результати досліджень. Розглянуті способи створення кумулятивного ефекту у свердловинному заряді мають істотні недоліки (відсутня можливість зміни довжини повітряного проміжку; складність осьової фіксації у свердловинному заряді, особливо в зимовий час; висока трудомісткість використання в умовах, що обводнюють). Тому одним з можливих варіантів усунення вказаних недоліків є використання для створення повітряного проміжку кумулятивного замикаючого пристрою (КЗП) (рис. 1), який

Таблиця 1

Вплив типу ВР і кута розчину оболонки на зміну величини кумулятивного тиску

Тип ВР	Щільність ВР, кг/м ³	Швидкість детонації, м/с	Детонаційний тиск, МПа	Відносна величина кумулятивного тиску при куті розчину виїмки (град)		
				20	30	40
Граммоніт 79/21	1000	3600	3240	11,3	5,0	2,7
Україніт-ПП	1600	4800	9200	7,1	3,1	1,7
Анемікс 70	1220	4800	8570	9,0	4,0	2,2
ЕРА-А	1050	3600	3400	16,1	7,1	3,8

складається з усіченого конуса, у вершині якого сформована кумулятивна виїмка. Цей пристрій за допомогою мотузки і нерухомого упору (рейки) фіксується на необхідній глибині у свердловині і тим самим створює повітряний проміжок із заданими параметрами [9].

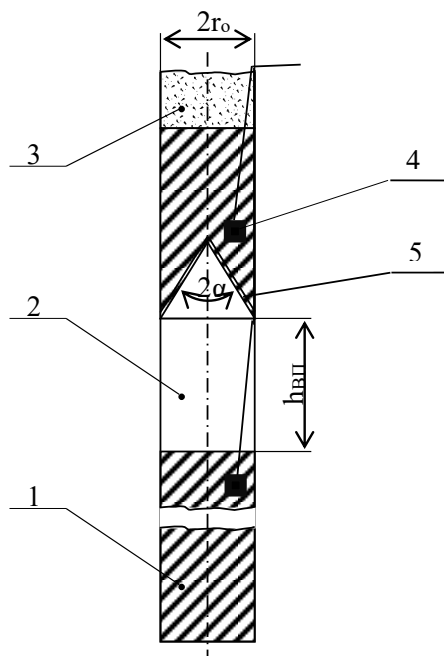


Рис. 1. Конструкція подовженого заряду з повітряним проміжком (1 – ВР, 2 – повітряний проміжок, 3 – забійка, 4 – бойовики, 5 – КЗП)

При розробці раціональної конструкції КЗП необхідно враховувати особливості їх використання в промислових умовах. Виходячи з цього, можна виділити основні технологічні вимоги, які будуть вимагатися до матеріалу і параметрів КЗП. До таких відносяться: параметри свердловини (її внутрішній діаметр); матеріал КЗП повинен бути достатньо пружним, щоб не допустити розсипу ВР верхнього заряду в повітряний проміжок; матеріал КЗП повинен мати низьку вартість; матеріал КЗП повинен відповідати вимогам техніки безпеки при виробництві вибухових робіт; конструкція КЗП повинна забезпечувати можливість занурення у свердловину, заповнену водою; конструкція КЗП повинна зберігати форму кумулятивної виїмки при формуванні верхнього заряду і забійки свердловини.

Зважаючи на перераховані вимоги, в якості матеріалу для виготовлення КЗП був вибраний поліетилен. По-перше, його використання не суперечить вимогам «Правил безпеки при

веденні вибухових робіт на відкритій поверхні», по-друге, він має низьку вартість і останнім часом широко використовується в масовому виробництві товарів народного споживання.

При розробці конструктивних параметрів КЗП враховували наступне. Запропонований кумулятивний замикаючий пристрій повинен мати у своїй нижній частині кумулятивну виїмку. Зважаючи на технологічні особливості виробництва даних виробів, прийнята кумулятивна виїмка з кутом розчину 60° . Для усунення перевертання пристрою при опусканні у свердловину його довжина повинна складати не менше 1,5 діаметру свердловини, тобто 360 мм. На більшості кар'єрів Кременчуцького регіону діаметр свердловин, які використовуються при веденні вибухових робіт, складає 250 мм. Тому максимальний зовнішній діаметр верхньої частини КЗП був також вибраний 250 мм.

Спочатку верхня частина пристрою була виконана з подовжніми гофрами, максимальний діаметр яких складав 245 ± 5 мм. При виконанні вибухових робіт в літній час ця конструкція повністю відповідала вимогам виробничників: легко опускалася у свердловину, забезпечувала щільне прилягання її стінок до стінок свердловини, не було помічено розсипу ВР в зону проміжку. Проте в зимовий час і при знижених температурах при використанні цієї конструкції КЗП були виявлені певні недоліки. Передусім, ускладнилося опускання пристрою у свердловину.

Аналіз показав, що при знижених температурах матеріал пристрою втрачає пружність. Це привело до того, що частина ВР з верхнього заряду прокидалася через проміжки між гофрами і стінками свердловини в нижній заряд. Якщо ж стінки свердловини були порушені при бурінні (або ж на стінках був шар льоду) і їх діаметр за рахунок цього був менше за проектний, то для опускання КЗП доводилося використовувати дерев'яні штовхальники. В деяких випадках при цьому спостерігалось пробиття дна пристрою.

Для усунення цих недоліків надалі була використана конструкція КЗП, в якій верхня частина була виконана з подовжніми розрізами шириною 1–1,5 мм. Товщина матеріалу у верхній частині складала 1–1,6 мм. За рахунок цього окремі пелюстки, що утворилися, мають достатню пружність і при низьких температурах, що повністю усуває усі недоліки попередньої конструкції. Крім того, для підвищення міцності дна пристрою у ньому були виконані вертикальні ребра жорсткості.

Ця конструкція виявилася працездатною і в свердловинах, що обводнювали. Проведені дослідження показали, що наявність подовжніх розрізів і пружність пелюсток дозволяє досить просто опускати пристрій у свердловини, які заповнені водою.

Для оцінки ефективності формування розосереджених зарядів за допомогою КЗП у промислових умовах впродовж 2019–2021 років були проведені дослідження на кар'єрі Полтавського гірничо-збагачувального комбіната. При підриванні блоку №- 369-08 були проведені експерименти для оцінки впливу кумулятивного ефекту в повітряному проміжку на якість дроблення гірської маси.

З цією метою даний блок було розділено на три ділянки. На першій ділянці (дослідній) повітряний проміжок створювали за допомогою циліндричної ємності з плоским дном (рис. 2, а), на другому (дослідній) – за допомогою КЗП (рис. 2, б), на третій ділянці (контрольній) застосовували суцільні свердловинні заряди.

Глибина свердловин дорівнювала 11,0 м, сітка свердловин – 5,5х6,5 м. Маса суцільного заряду – 384 кг (анемікс – 70). Для розосереджених зарядів довжина повітряного проміжку дорівнювала 1,0 м, довжина забійки – 5,0 м. Маса верхнього заряду – 128 кг, нижнього – 192 кг. Загальна кількість свердловин складала 68 штук (діаметр – 262 мм).

Після вибуху систематично (через 1–2 години) проводили фотографування забою і фотопланіметричним способом (табл. 2) визначали грануло-метричний склад зруйнованої гірської маси.

Аналіз отриманих результатів показує, що використання кумулятивного ефекту у верхній частині повітряного проміжку істотно впливає на кінцевий результат вибуху. При використанні традиційного способу формування проміжку на 9% збільшується діаметр середнього шматка, зменшуються дрібні фракції (<100) і майже удвічі збільшується вихід фракції (600–800) мм. Наявність кумулятивної виїмки у повітряному проміжку дозволила при меншій масі ВР отримати практично однакове із суцільним зарядом дроблення гірської породи.

Надалі при проведенні масових вибухів на блоках «-240-210» і «-360-11» було досліджено вплив довжини повітряного проміжку з кумулятивним ефектом на зміну гранулометричного складу зруйнованої породи.

У цих експериментах блоки розділялися вже на дві ділянки, де одна була контрольною (використовували суцільні заряди ВР), а друга – дослідна (на блоці «-240» довжина повітряного проміжку складала 1,25 м, на блоці «-360» – 1,5 м). Результати виміру гранулометричного складу наведені в таблиці 3.



Рис. 2. Загальний вигляд пристроїв, які були використані при формуванні розосереджених зарядів (зліва – пристрій з плоским дном; справа – КЗП)

Таблиця 2

Вплив кумулятивного ефекту в повітряному проміжку на зміну гранулометричного складу зруйнованої гірської маси

Дільниця	Відсотковий вміст фракцій (мм)						Діаметр середнього шматка, мм
	0–100	100–200	200–400	400–600	600–800	800	
1 (дослідний)	8,7	30,6	29,4	20,5	10,8	-	306
2 (дослідний)	12,3	33,8	29,5	18,3	6,1	-	279
3 (контрольний)	11,6	31,8	32,9	18,4	5,3	-	281

Таблиця 3

Вплив довжини повітряного проміжку на зміну гранулометричного складу зруйнованої гірської маси

Блок (дільниця)	Відсотковий вміст фракцій (мм)					Діаметр середнього шматка, мм
	0–100	100–200	200–400	400–600	600–800	
1 (контрольний)	13,8	31,6	29,4	18,0	7,2	282
1 (дослідний, l=1,25 м)	11,1	33,8	29,2	17,2	8,7	290
2 (контрольний)	12,0	34,4	25,5	21,3	6,8	288
2 дослідний, l=1,5м)	9,0	27,4	25,5	25,9	12,2	337

Завдяки отриманим результатам можна зауважити, що для даних гірничо-геологічних і технологічних умов за рахунок кумулятивного ефекту можна збільшити довжину повітряного проміжку в 1,25 разів. При цьому станеться незначне збільшення діаметру середнього шматка зруйнованої гірської маси, проте більш ніж на 20% зменшиться використання ВР. Збільшення довжини проміжку до 1,5 м призводить до 30%-го зменшення виходу фракції «<100 мм» і майже до подвійного зростання кількості великих («600–800 мм») фракцій.

Висновки. Проведеними дослідженнями встановлено, що в умовах виробництва гірничодобувних підприємств для проведення вибухових робіт використання кумулятивних замикаючих пристроїв є перспективним. Можна стверджувати, що розроблена раціональна конструкція КЗП враховує особливості застосування в промислових умовах завдяки наведеним основним технологічним вимогам до матеріалу і до параметрів кумулятивного замикаючого пристрою.

Завдяки кумулятивному ефекту можна збільшити довжину повітряного проміжку в 1,25 рази, при цьому відбудеться незначне збільшення діаметру середнього шматка зруйнованої гірської маси, проте більш ніж на 20% зменшаться витрати ВР. Збільшення довжини проміжку до 1,5 м призводить до 30%-го зменшення виходу фракції «<100 мм» і майже до подвійного зростання кількості великих («600–800 мм») фракцій.

Наведені дані застосовні для геологічних умов Полтавського ГЗК і потребують дослідно-промислової перевірки в інших регіонах і родовищах.

ЛІТЕРАТУРА

1. Воробйов В.Д., Масюкевич О.М., Прокопенко В.С. Застосування зарядів з повітряним зазором для підвищення безпеки та ефективності вибухів у свердловинах. *Проблеми охорони праці в Україні*. Зб. наук. праць. Київ : ННДІОП, 2000. Вип. 3. С. 18–25.

2. Мандрикевич В.Н. Вибух. *Науковий вісник НГА України*. 1999. № 3. С. 90–95.

3. He Man-chao, Cao Wu-fu, Wang Shuli. *Anquan yu huanjing*. № 1. 2004. P. 8–11.

4. Liang W.M., Liu H.Y., Zhou F.J. Influence of air-decoupling charge on rock blasting. Beijing Ligong Daxue Xuebao. *Transaction of Beijing Institute of Technology*. Volume 32, Issue 12, 2012. PP. 1215–1218.

5. Jhanwar J, Jethwa J, Reddy A. Influence of air-deck blasting on fragmentation in jointed rocks in an open-pit manganese mine. *European Scientific Journal*. December. 2013. Vol. 3. PP. 200–207.

6. Леміжанська В.Д., Долударева Я.С., Козловська Т.Ф. Вплив поверхнево-активних речовин у зоні руйнування гірських порід на інтенсивність їх подрібнення за впливу імпульсних навантажень. *Науковий Вісник Національного Університету*. Vol. 4(130). 2012. PP. 93–97.

7. Lu W. A further study on the mechanism of air decking. *International Journal For Rock Fragmentation by Blasting*. 2003. Vol. 7. № 4. PP. 231–255.

8. Rock Fracture and Blasting: Theory and Applications. Oxford : BN/Elsevier Science, 2016. 345 p.

9. Воробйов В.В., Пеев А.М. Перспективні напрями підвищення ефективності вибухової руйнації гірських порід. *Сучасні ресурсо-енергозберігаючі технології гірничого виробництва*. Кременчук : КНУ, 2010. Вип. 1(5). С. 19–22.

10. Воробйов В.В., Помазан М.В. Використання кумулятивного ефекту для підсилення руйнування нижніх шарів масиву. *Сучасні ресурсо-енергозберігаючі технології гірничого виробництва*. Кременчук : КДПУ, 2009. Вип. 1(3). С. 21–25.

11. Vorobyov V., Pomazan M., Shlyk S. Simulation of dynamic fracture of the borehole bottom taking into consideration stress concentrator. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2017. Vol. 3, № 1(87). PP. 53–62.

12. Туручко І.І., Косьмін І.В. Нові вибухові речовини з регульованою об'ємною концентрацією енергії. *Вісник НТУУ «КПІ». Гірництво*. 2001. Вип. 5. С. 52–56.

13. Купрін В.П. Розробка і впровадження емульсійних вибухових речовин на кар'єрах України. Дніпро : ДВНЗ УДХТУ, 2012. 243 с.

**DYNAMICS OF PRESSURE CHANGE IN THE AIR GAP ZONE
WHEN THE CUMULATIVE EFFECT IS USED**

Viktor Vorobyov

Doctor of Technical Sciences, Professor at the Department of Mechanical Engineering

Kremenchuk Mykhailo Ostrogradskyi National University, 20 Pershotravneva str., Kremenchuk, Poltava region, Ukraine, 39600, vvv.imit@gmail.com

ORCID: 0000-0002-3446-4714

Larisa Vorobyova

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at the Department of Mechanical Engineering

Kremenchuk Mykhailo Ostrogradskyi National University, 20 Pershotravneva str., Kremenchuk, Poltava region, Ukraine, 39600, larivorobiova@gmail.com

ORCID: 0000-0002-5333-6091

Ruslan Pastushenko

Postgraduate Student at the Department of Mechanical Engineering

Kremenchuk Mykhailo Ostrogradskyi National University, 20 Pershotravneva str., Kremenchuk, Poltava region, Ukraine, 39600, r.m.pastushenko@gmail.com

ORCID: 0000-0003-1087-1558

The work is devoted to the industrial verification of the efficiency of the developed new design of a distributed charge of an explosive substance during the retreating of rocks in iron ore quarries. Peculiarities of the process of explosive destruction of rocks by well charges of various designs have been investigated. In the work, a method for determining the parameters of the explosion products in the air gap zone was developed for various types of modern industrial explosives. Based on the theoretical results, a new design was developed and the parameters of the cumulative closing device, which is located in the lower part of the upper charge, were established.

Experimental studies have confirmed that the improved design of the dispersed well charge allows to concentrate the energy of the explosion in the air gap zone. The influence of the parameters of the cumulative recess and the properties of the explosive substance on the change in the pressure of the detonation products in the air gap zone was determined. In industrial conditions, the relationship between the parameters of the dispersed well charge and the granulometric composition of the destroyed rock mass has been established. This leads to a significant impact of the cumulative closing device on the change in the parameters of the detonation products in the air gap zone.

A rational design of the closing device has been developed, which takes into account the peculiarities of its use in industrial conditions, and the main technological requirements for the material and parameters for the manufacture and use of the cumulative closing device are given. In particular, it was established that due to the application of the cumulative effect, the length of the air gap can be increased by 1.25 times and the consumption of explosives can be reduced by 20%.

Thus, there are reasons to assert that the proposed construction of a dispersed well charge adequately affects the granulometric composition of the destroyed rock mass.

Key words: explosive, dynamics, movement, charge, cumulative effect, air gap, pressure, crack, well.

REFERENCES

1. Vorobyov, V., Masyukevich, O., Prokopenko, V., Kosmin, I. (2000). Application of charges with an air gap to increase the safety and efficiency of explosions in wells. *Problems of labor protection in Ukraine*. Coll. of science works Kyiv: NNDIOP, Vol. 3. PP. 18-25.
2. Mandrykevich, V. (1999). Explosion. *Scientific Bulletin of the National Academy of Sciences of Ukraine*, No. 3. PP. 90-95.
3. He Man-chao, Cao Wu-fu, Wang Shuli. (2004). Anquan yu huanjing. № 1. PP. 8-11.
4. Liang, W., Liu, H., Zhou, F. (2012). Influence of air-decoupling charge on rock blasting. *Beijing Ligong Daxue Xuebao. Transaction of Beijing Institute of Technology*. Volume 32, Issue 12, PP. 1215-1218.
5. Jhanwar J, Jethwa J, Reddy A. (2013). Influence of air-deck blasting on fragmentation in jointed rocks in an open-pit manganese mine. *European Scientific Journal*. December, Vol. 3. PP. 200-207.
6. Lemizhanska, V., Doludareva, Y., Kozlovska, T., Komir, A. (2012). The influence of surface-active substances in the zone of destruction of rocks on the intensity of their grinding under the influence of impulse loads. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, Vol. 4 (130). PP. 93-97.
7. Lu, W. (2003). A further study on the mechanism of air decking. *International Journal For Rock Fragmentation by Blasting*, Vol. 7. № 4. PP. 231-255.

8. Rock Fracture and Blasting: Theory and Applications (2016). Oxford: BH/Elsevier Science. 345 p.

9. Vorobyov, V., Peev, A. (2010). Prospective directions for increasing the efficiency of explosive destruction of rocks. *Modern resource and energy-saving technologies of mining production*. Kremenchuk: KNU, vol. 1(5). P. 19-22.

10. Vorobyov, V., Pomazan, M. (2009). The use of the cumulative effect to strengthen the destruction of the lower layers is massive. Modern resource-energy-saving technologies of mining production. Kremenchuk: KDPU, vol. 13. PP. 21-25.

11. Vorobyov, V., Pomazan, M., Shlyk, S., Vorobyova, L. (2017). Simulation of dynamic fracture of the borehole bottom taking into consideration stress concentrator. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, vol. 3, №. 1(87). PP. 53-62.

12. Turuchko, I., Kosmin, I. (2001). New explosives with adjustable volume concentration of energy. *Bulletin of NTUU "KPI". Mining*, issue 5. PP. 52-56.

13. Kuprin, V. (2012). Development and implementation of emulsion explosives in quarries of Ukraine. Dnipro: DVNZ UDHTU. 243 p.

Стаття надійшла 03.06.2023