

ГЕОТЕХНОЛОГІЯ

УДК 622.235:658.382.3

ОБГРУНТУВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИБУХУ СВЕРДЛОВИННИХ ЗАРЯДІВ У ПОЛІМЕРНИХ ОБОЛОНКАХ

В.С. Прокопенко, канд. техн. наук (ЗАТ "Техновибух")

Выполнен анализ влияния физических факторов на процесс распределения энергии взрыва заряда, размещенного в скважине с зазором между зарядом и стенкой скважины. Теоретически и экспериментально доказана возможность увеличения на 20–50% доли энергии, затрачиваемой на полезные формы работы. Определены новые направления совершенствования буровзрывных работ на карьерах.

Істотного покращення економічного стану гірничодобувних підприємств можна досягти за рахунок різкого зниження затрат на буропідrivні роботи (БПР) та підвищення якості дроблення гірських порід. Це вимагає розроблення і впровадження технічних рішень, які докорінно змінюють технологію підготовки масових вибухів і використовуваних при цьому технічних засобів та матеріалів.

Останнім часом зусилля наукових організацій та промислових підприємств спрямовані на створення засобів і способів здешевлення використовуваної енергії вибуху за рахунок розроблення найпростіших вибухових речовин, застосування конверсійних боєприпасів, підвищення рівня механізації виготовлення вибухових речовин (ВР) і заряджання ними свердловин. Однак можливості зниження затрат на БПР обмежуються при цьому вартістю компонентів ВР.

Стрибокподібного підвищення технічного рівня буропідrivного комплексу можна досягти шляхом збільшення коефіцієнта корисного використання енергії вибуху. Тому надзвичайно важливим і актуальним завданням є розроблення і вдосконалення технологій і технічних засобів БПР,

які забезпечують протікання процесу руйнування гірських порід з підвищеної енерговіддачею ВР.

Однією з найперспективніших є технологія заряджання свердловин з формуванням зарядів ВР в оболонках (плівкових рукавах), яка передбачає наявність зазору між зарядом та стінкою свердловини. На цей час така технологія успішно використовується на вугільних розрізах Кузбасу (Росія) та залізорудному кар'єрі Полтавського ГОКу при заряджанні сухих і обводнених свердловин. Економія коштів на одну свердловину складає 20–100 доларів США. При точковому ініціюванні зарядів в оболонках із застосуванням сенсibilізаторів забезпечується надійне підривання неводостійких ВР, а при лінійному ініціюванні з використанням потужного ініціатора – підривання ВР практично будь-якого типу, включаючи найпростіші.

Властивості плівкового рукава, як пакувальної оболонки заряду ВР, зумовлюють розвиток ряду нових напрямків удосконалення БПР, а саме:

розроблення ВР нового класу – водовмісних, зокрема таких, що наповнюються водою з свердловини без подальшого загущення;

удосконалення методів управління дією вибуху шляхом формування зарядів ВР з діаметром, що змінюється по довжині свердловини, формування радіально багат шарових зарядів, а також зарядів, енергетичні параметри яких змінюються залежно від схем комутації підривної мережі і місця розташування свердловин на висаджуваному блоці;

розроблення конструкцій зарядів залежно від типу ВР та умов підривання, що забезпечує можливість збільшення на 20–50% частки енергії, затрачуваної на корисні форми роботи.

Крім того, технологія формування свердловинних зарядів у рукавах забезпечує можливість практичного використання гідронабійки зарядів, що знижує негативний вплив масових вибухів на забруднення навколишнього середовища за рахунок зменшення концентрації пилогазових викидів у атмосферу.

Для подальшого розвитку цієї технології потрібне наукове обґрунтування області її ефективного застосування. Теоретичні дослідження динамічної поведінки системи продукти детонації (ПД)–заповнювач зазору–гірська порода спираються, як правило, на спрощені моделі взаємодіючих середовищ і не дозволяють адекватно описувати процеси, що відбуваються в даній системі. Тому для виявлення особливостей розвитку процесу вибуху заряду ВР, розміщеного у свердловині з зазором, використано числове моделювання параметрів вибуху із застосуванням сучасних математичних методів.

В основу математичної моделі покладено рівняння стану пружно-в'язкопластичного середовища, закони збереження маси, кількості руху та енергії, які визначають поведінку ПД, заповнювачів зазору між зарядом та свердловиною (води або повітря) та гірської породи.

Для обчислень використано метод скінченних різниць другого порядку точності по просторовій та часовій координатах зі штучною в'язкістю середовищ. При цьому фронт ударної хвилі (УХ) замінюється тонким перехідним шаром, в якому значення його параметрів змінюються швидко, але без розриву. Розрахунок виконано для характерних умов вугільних родовищ, покривні породи яких відпрацьовуються з використанням енергії вибуху.

На рис. 1 наведено функціональну залежність співвідношення радіусів зон дроблення при вибуху заряду з зазором і без зазору (суцільного) від співвідношення радіусів свердловини і заряду, тобто $R/R_c = f(r_{ca}/r_s)$. Аналіз показує, що наявність водного або повітряного зазору між зарядом та стінкою свердловини приводить до збільшення радіуса зони дроблення на 18–23%. Результати експериментальних вибухів у залізистих кварцитах Полтавського ГОКу (рис. 2) підтверджують цей висновок. Слід відзначити, що всі залежності (див. рис. 1 і 2) характеризуються наявністю нечіткого оптимуму. Для слабкіших порід (алевролітів) ефект збільшення розмірів зони дроблення вибухом зарядів із зазором трохи вищий, ніж для міцних порід (пісковиків, кварцитів).

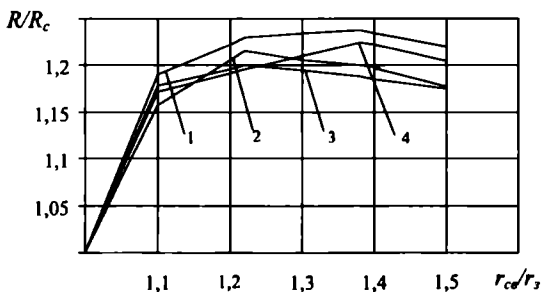


Рис. 1. Функціональна залежність $R/R_c = f(r_{ca}/r_s)$ для різних порід і заповнювачів оболонки навколо заряду: 1 – алевроліт, вода; 2 – алевроліт, повітря; 3 – пісковик, повітря; 4 – пісковик, вода

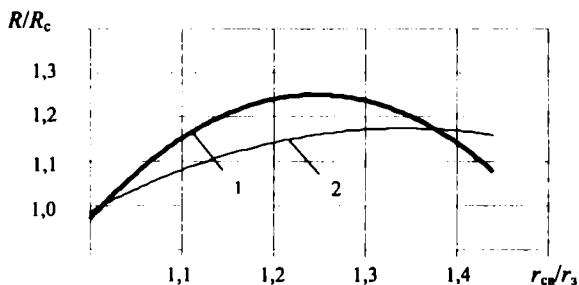


Рис. 2. Функціональна залежність $R/R_c = f(r_{ca}/r_s)$ при вибухах зарядів у свердловинах різного стану: 1 – сухі; 2 – обводнені

На рис. 3 показано зміни максимального тиску в породі P_{\max} залежно від відносної відстані (r/r_s) в алевроліті для випадку заповнення порожнини зазору водою. Аналіз залежностей дозволяє зробити висновок, що в близькій зоні (до $10r_s$) найбільші значення максимального тиску в породі реєструються при вибуху заряду без зазору, потім тиск поступово знижується у міру збільшення розмірів зазору між зарядом та стінкою свердловини. Це

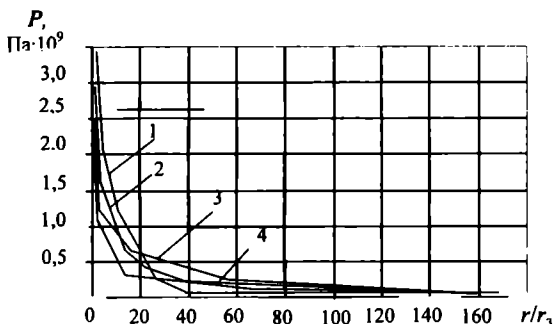


Рис. 3. Залежність максимального тиску від відносної відстані r/r_3 , при $r_{св}/r_3$, що дорівнює 1,0 (1); 1,1(2); 1,22 (3); 1,57 (4)

пояснюється тим, що при вибуху заряду без зазору відбувається підсилення УХ за рахунок ефекту "жорсткої стінки", що виникає при переході УХ з менш щільного середовища у більш щільне. При переході УХ в зазор її амплітуда падає внаслідок того, що матеріали зазору мають меншу щільність і акустичну жорсткість, ніж продукти детонації. Зменшення величини P_{\max} пояснюється також дисипативними втратами у воді або повітрі. В середній зоні дії заряду (до $50 r_3$) спостерігається перерозподіл максимумів тиску залежно від величини зазору. При вибуху заряду без зазору або з невеликим зазором інтенсивність зниження тиску зі збільшенням відстані значно вища, ніж при вибуху зарядів з великим зазором. У далекій зоні ця закономірність виявляється ще сильніше. Таким чином, на великих відстанях від заряду інтенсивнішими є хвилі, що збуджуються зарядами з великим зазором.

На рис. 4 наведено залежності середнього гідростатичного тиску від часу в середній зоні дії заряду на відносній відстані, яка дорівнює $41 r_3$. Кожна крива характеризується наявністю двох максимумів. Перший відповідає приходу в досліджувану точку ударної хвилі, яка на цій відстані вироджується в пружну [2]. Другий максимум відповідає приходу в цю точку пластичної хвилі.

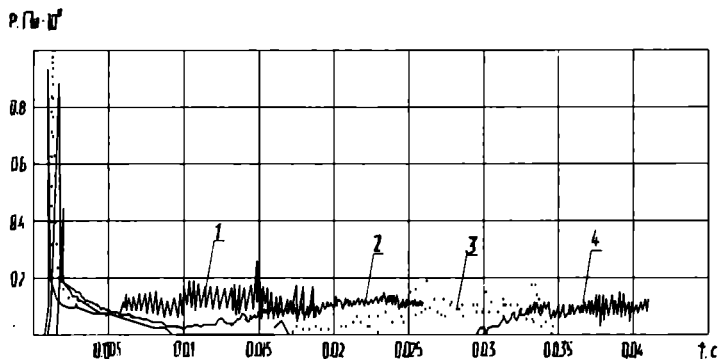


Рис. 4. Залежність тиску від часу в середній зоні дії заряду при r_{cw}/r_1 , яке дорівнює 1,1 (1), 1,22 (3), 1,38 (4), 1,57 (2)

джерелом якої служить область підвищених стискальних напружень поблизу порожнини зазору. Чим менший зазор між зарядом та стінкою свердловини, тим швидше другий максимум досягає заданої точки масиву порід і тим менша тривалість дії навантаження. Найбільше значення тиску, яке спостерігається в першому максимумі, відповідає значенню $r_{cw}/r_1 = 1,22$, а найменше – значенню $r_{cw}/r_1 = 1,57$.

Крім навантажень, описаних вище, на характер руйнування породи справляють вплив її властивості. Розрахунок щільності породи (алевроліту) після вибуху при $r = 41r_1$ показує (рис. 5), що найменше кінцеве значення щільності, а, отже, максимальний ступінь руйнування породи відповідає зазору при $r_{cw}/r_1 = 1,22$ – $1,38$. Це пояснює оптимальність теоретичних та експериментальних залежностей радіуса руйнування від величин зазору, наведених на рис. 1 і 2.

Додаткове підтвердження ефективності дії зарядів з зазором впливає з аналізу залежностей, наведених на рис. 6. Чим менший зазор, тим інтенсивніше змінюється щільність руйнованої породи на межі свердловини, а, отже, вищі втрати енергії на переподрібнення. Сповільнення зміщення стінки

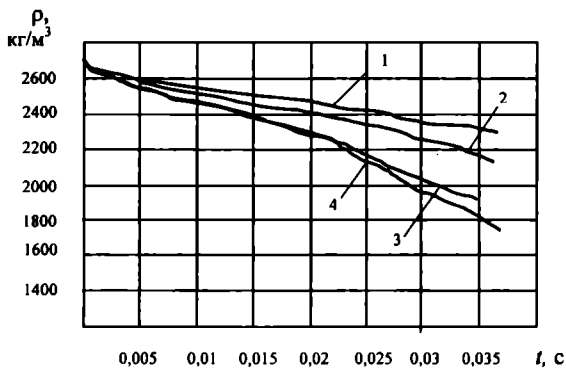


Рис. 5. Зміна щільності порід залежно від тривалості дії вибуху заряду з водним зазором при r_{ca}/r_3 , що дорівнює 1,0 (1), 1,1 (2), 1,22 (3) і 1,38 (4)

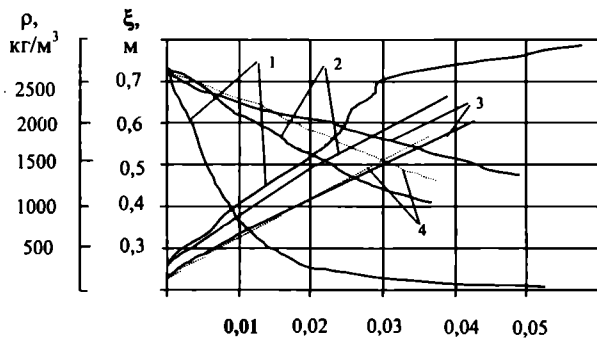


Рис. 6. Зміна величин щільності ρ і зміщення ξ алевроліту на стінці свердловини залежно від часу при r_{ca}/r_3 , що дорівнює 1,0 (1), 1,1 (2), 1,22 (3) і 1,38 (4)

свердловини, яке має місце при збільшенні зазору, сприяє повнішому протіканню хімічних реакцій і додатковому виділенню енергії вибуху ВР.

При вибуху заряду з повітряним зазором відбуваються хвильові процеси, аналогічні тим, що спостерігаються при вибуху заряду з водним зазором, однак їх амплітудно-частотні характеристики різні. Порівняння вибухів розглянутих зарядів у гірській породі (алевроліті) (рис. 7) дозволило зробити висновок, що найбільший максимум тиску P_{\max} відмічається при вибуху зарядів без зазору, найменший – зарядів з водним зазором. Заряди з повітряним зазором займають проміжне положення. Однак імпульси тиску при вибуху зарядів з зазором триваліші і характеризуються значною кількістю повторних піків тиску. При вибуху зарядів з водною оболонкою тривалість середнього тиску більша, ніж при вибуху зарядів з повітряною оболонкою, що зумовлює їх більшу енергетичну ефективність (див. рис. 1).

Різниця між амплітудно-частотними характеристиками хвильових процесів при вибуху зарядів з водним і повітряним зазорами зумовлюється такими факторами:

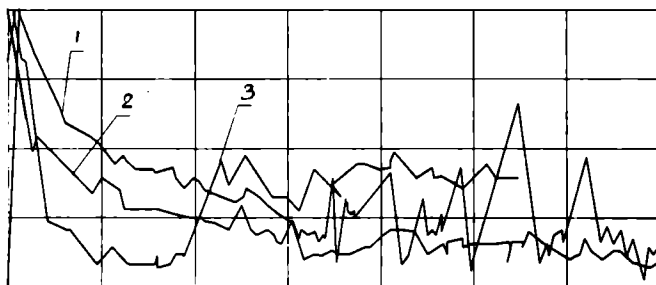


Рис. 7. Залежність відносного тиску від тривалості дії вибуху зарядів різних конструкцій: 1 – суцільного ($P_{\max} = 3.5 \cdot 10^9$ Па); 2 – з водною оболонкою ($P_{\max} = 1.5 \cdot 10^9$ Па); 3 – з повітряною оболонкою ($P_{\max} = 0.8 \cdot 10^9$ Па)

початковий тиск на фронті УХ при вибуху у воді значно більший, ніж у повітрі, і практично порівняний з початковим тиском при вибухах у гірських породах;

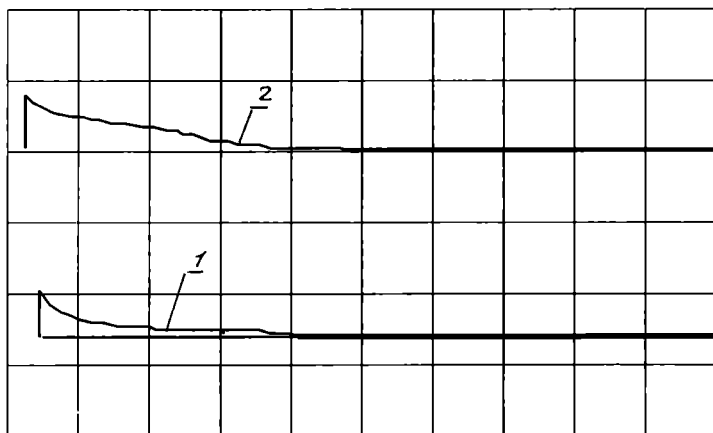
внаслідок малої стисливості води її температура підвищується в незначній мірі, тому втрати енергії вибуху будуть значно меншими порівняно з втратами у повітряному середовищі;

стисливість води більша, ніж стисливість гірських порід, тому вода грає роль амортизуючого буфера між ПД та гірською породою і сприяє зменшенню об'єму місцевого руйнування (зони переподрібнення);

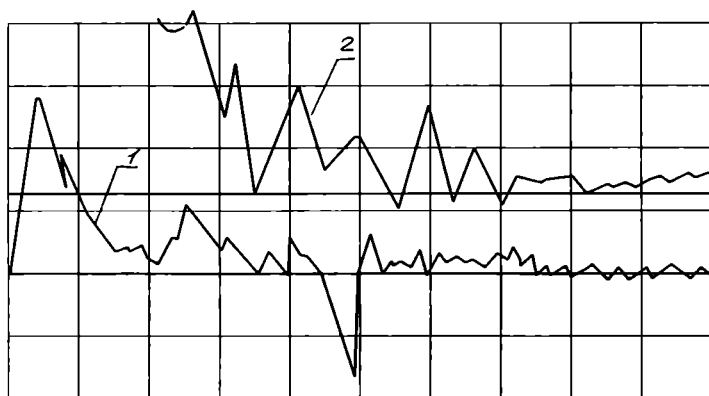
енергія вибуху у воді накопичується не тільки внаслідок її стиснення, але й за рахунок кінетичної енергії руху на даній стадії процесу, тому після зняття динамічного навантаження вода, на відміну від гірської породи, повертається до початкового стану з температурою, що лише трохи перевищує початкову.

Слід також відзначити, що при вибуху у воді близько 97% його енергії переходить в УХ. Отже, дія УХ у воді сильніша, ніж у повітрі або гірській породі.

Отримані висновки підтверджуються результатами експериментальних досліджень на об'ємних металевих моделях циліндричної форми діаметром 100 мм і висотою 120 мм. У центрі моделі висвердлювався шпур глибиною 60 мм. Діаметр шпура $d_{\text{ш}}$ приймався таким: 3 мм – для заряду без зазору; 3,3, 3,6, 3,9 і 4,5 мм – для зарядів з водним і повітряним зазорами. Діаметр заряду d_z у всіх випадках становив 3 мм, що забезпечило такі значення $d_{\text{ш}} / d_z$: 0; 1,1; 1,2; 1,3, 1,5. Як ВР використовувався ТЕН масою 400 мг. Ініціювання заряду здійснювалося наважкою азиду свинцю масою 5 мг. На рівні середини заряду із зовнішньої сторони моделі по лінії її діаметра було встановлено два датчика для реєстрації за допомогою осцилографа тиску P і швидкості зміщення U . На рис. 8 наведено характерні осцилограми дії суцільного заряду (без зазору) і заряду з водним зазором ($d_{\text{ш}}=4,5$ мм; $d_{\text{ш}} / d_z = 1,5$). Отримані експериментальним шляхом залежності підтверджують результати теоретичних



а



б

Рис. 8. Осцилограми вибухів суцільних зарядів ВР (а) і зарядів з водним зазором (б) при $d_w/d_n = 1,5$: 1 - $U = f(t)$; 2 - $P = f(t)$

розрахунків і висновків щодо механізму передачі енергії вибуху заряду в масив через зазор. За відсутності зазору спостерігається типовий імпульс з ударним фронтом і подальшим плавним затуханням тиску і швидкості зміщення частинок. За наявності зазору різко підвищується "динамічність" процесу дії заряду і спостерігаються повторні максимуми навантаження моделі.

Оцінка ефективності дії зарядів у поліетиленових рукавах, розміщених із зазором у свердловині, виконувалась також у промислових умовах методом воронкоутворення. При цьому коефіцієнт корисного використання енергії ВР, затраченої на механічні форми роботи при воронкоутворенні в породі, визначався за формулою

$$f = f_d + f_v, \quad (1)$$

де f_d, f_v – коефіцієнти корисного використання енергії вибуху відповідно на дроблення і викид породи.

Згідно з [4]

$$f_v = \frac{\rho g}{2Q_{\text{ВР}} m_{\text{ВР}}} h_v V_v, \quad (2)$$

де ρ – щільність породи, кг/м³; g – прискорення вільного падіння, м/с²; $Q_{\text{ВР}}$ – теплота вибуху ВР, Дж/кг; $m_{\text{ВР}}$ – маса ВР, кг; h_v – глибина воронки викиду, м; V_v – об'єм воронки викиду, м³.

З урахуванням закономірностей при воронкоутворенні

$$f_d = \frac{\pi}{4} \cdot \frac{q_s D_v^2}{Q_{\text{ВР}} m_{\text{ВР}}}, \quad (3)$$

де q_s – питома енергоємність руйнування порід, Дж/м³; D_v – середній діаметр воронки викиду, м.

Якщо величина $m_{\text{ВР}}$ відображає вихід гірської маси з постійною інтенсивністю дроблення, то для зарядів однотипних ВР в рукавах, з урахуванням (5), справедлива рівність

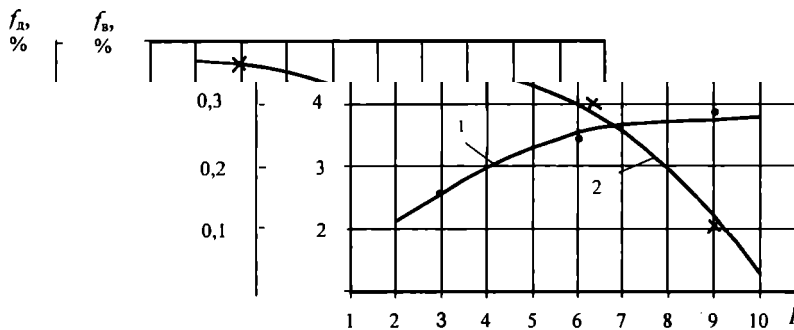
$$\frac{f_{др}}{f_{дс}} = \frac{D_{вр} d_c}{D_{вс} d_p}, \quad (4)$$

де $f_{др}, f_{дс}$ – коефіцієнт корисного використання енергії вибуху зарядів відповідно в рукавах і без рукавів; $D_{вр}, D_{вс}$ – діаметр воронки викиду при вибуху зарядів відповідно в рукавах і без рукавів, м; d_p, d_c – діаметр зарядів відповідно в рукавах і без рукавів, м.

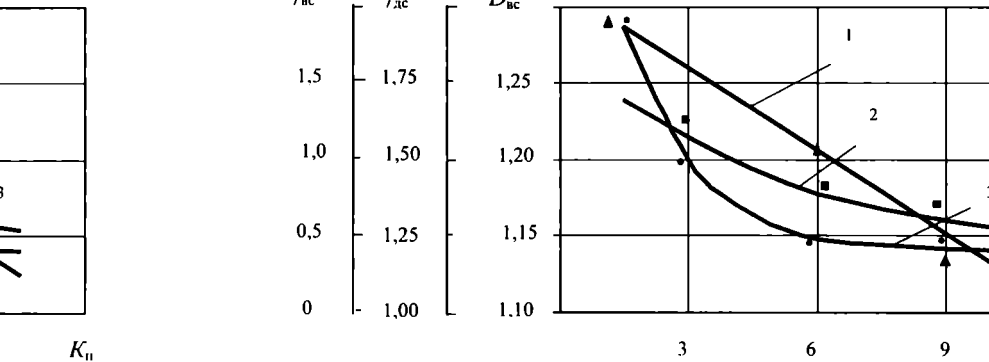
Оцінку ефективності дії вибуху розгляданих зарядів методом воронкоутворення виконано на розрізах Південного Кузбасу в легко-висаджуваних ($\rho = 2,54 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3; q_s = 50 \cdot 10^3 \text{ Дж/м}^3$), середньовисаджуваних ($\rho = 2,60 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3; q_s = 90 \cdot 10^3 \text{ Дж/м}^3$) і важковисаджуваних ($\rho = 2,65 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3; q_s = 120 \cdot 10^3 \text{ Дж/м}^3$) породах. Заряди формувалися здебільшого в сухих свердловинах глибиною 2–3 м і діаметром 0,22 м. Маса зарядів без рукавів – 40 кг, в рукавах – 28 і 40 кг. Як основна ВР використовувався грамоніт 79/21. У розрахунках використано дані праць В.Н. Мосинця [6, 7].

У зв'язку зі складністю та ненадійністю інтерпретації результатів експериментів за цим методом отримані дані не можуть розглядатися як строгий доказ ефективності вибухів зарядів тієї чи іншої конструкції. В той же час даний метод забезпечує дослідників кількісною інформацією щодо параметрів процесу руйнування і в поєднанні з іншими методами може використовуватися для підтвердження теоретичних висновків при оцінюванні ефективності дії вибуху в гірських породах.

Результати аналізу питомих затрат енергії вибуху суцільних зарядів ВР свідчать про зростання частки енергії, затрачуваної на дроблення, і зниження частки енергії, затрачуваної на викид, у міру підвищення коефіцієнта міцності порід K_n (рис. 9). Наявність повітряного зазору між зарядом та стінкою свердловини істотно змінює параметри зони дроблення: за результатами замірів, середній діаметр воронки викиду D_v зростає в 1,13–1,29 рази, f_d – в 1,27–1,66 рази (рис. 10). Найбільше зростання значень D_v і f_d спостерігається



заряду

Рис. 9. Зміна величини f_d (1) та f_v (2) залежно від K_n при вибуху суцільного- D_{vr}/D_{dc} ; 2 -Рис. 10. Залежності критеріїв оцінки воронки вибросу від величини K_n при: 1 - f_{dr}/f_{dc} ; 2 - f_{vr}/f_{nc} при вибуху заряду з повітряним зазором

при руйнуванні легковисаджуваних порід, що, імовірно, вказує на визначальну роль факторів, які "зм'якшують" дію вибуху – зниження пікового тиску і збільшення тривалості його імпульсу. Ці фактори зумовлюють зменшення зони переподрібнення навколо заряду, зниження інтенсивності зародження тріщин в близьких до заряду зонах і завершення розкриття тріщин в зонах, віддалених від заряду.

Більш тривалий вплив ПД в межах воронки викиду в слабких породах та породах з порівняно невеликою щільністю забезпечує підвищення об'єму викинутої гірської маси. Однак у щільніших породах процес розвитку викиду великих шматків, очевидно, відстає від процесу «просочення» ПД в атмосферу. Зниження первинного тиску в свердловині, в свою чергу, сприяє сповільненню переміщення шматків висадженої породи. Тому при одночасному прирості об'єму зони тріщиноутворення об'єм викиду та величина приросту зони дроблення в міцних породах при вибуху зарядів із зазором зменшуються. Це відбувається внаслідок зниження максимального тиску в свердловині і, відповідно, недостатнього рівня напружень для зародження і розвитку тріщин у далеких зонах міцних порід.

Аналіз залежностей, отриманих за допомогою методу воронкоутворення в породах Полтавського ГОКу (див. рис. 2), показує, що максимальна ефективність вибуху досягається тоді, коли діаметр свердловини дорівнює 1,20–1,55 діаметра заряду. Ефективність дії вибуху зарядів з повітряним зазором, визначена експериментально, виявилась трохи вищою порівняно з теоретичними розрахунками, що пояснюється особливостями процесів детонації сухої і водонасиченої ВР, зокрема впливом вторинних хімічних реакцій на процес вибуху.

Аналіз результатів теоретичних і експериментальних досліджень дії вибуху з використанням подовжених зарядів ВР у поліетиленових рукавах дає змогу визначити такі їх переваги:

підвищення рівномірності розподілу енергії вибуху в руйнованому об'ємі порід за рахунок різкого зниження енергозатрат в близькій (контактній) зоні і підвищення енергонасиченості масиву порід у віддалених від заряду точках;

підвищення динамічності і збільшення тривалості дії вибухового навантаження на руйнований масив;

нерівномірне навантаження порід і зниження їх міцності внаслідок явища дилатансії;

повніше хімічне перетворення ВР у процесі детонації заряду за рахунок сповільнення розширення зарядної порожнини;

при вибуху заряду з водним зазором вірогідна участь водяної пари як робочого тіла, що сприяє підвищенню ролі газоподібних ПД у загальному процесі вибуху за рахунок приросту їх об'єму.

Зазначені переваги зарядів у плівкових рукавах, розмішених у свердловинах з зазором, забезпечують ефективне використання ВР, у тому числі й найпростіших, а технологія заряджання свердловин зарядами в поліетиленових рукавах може сприяти значному (в 1,2–1,5 рази) зниженню вартості буропідривних робіт.

1. *Эффекты дилатансии при подземном взрыве. Численное исследование* / В.Н. Николаевский, А.Н. Поляничев, Е.О. Сумин и др. // Докл. АН СССР. – 1980. – Т. 250. – № 1. – С. 66–70.

2. *Ляхов Г.М.* Волны в грунтах и пористых многокомпонентных средах. – М.: Наука, 1972. – 288 с.

3. *Коул Р.* Подводные взрывы. – М.: Иностран. лит-ра, 1950. – 494 с.

4. *Покровский Г.И.* Пути повышения коэффициента использования энергии взрывчатых веществ при взрывах на выброс // Горный журнал. – М.: Недра. – 1952. – № 11.

5. *Физика взрыва* / Ф.А. Баум, Л.П. Орленко, К.П. Станюкевич и др. – М.: Наука, 1975. – 704 с.

6. Мосинец В.Н. Энергетические и корреляционные связи процесса разрушения пород взрывом. – Фрунзе: Илим, 1963. – 236 с.

7. Мосинец В.Н., Абрамов А.В. Разрушение трещиноватых и нарушенных горных пород. – М.: Недра, 1982. – 248 с.

УДК 622.235

ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ АКТИВНОЇ НАБІЙКИ У СВЕРДЛОВИНІ

*В.Д. Воробйов, докт. техн. наук (ННДІОП), В.Г. Кравець, докт. техн. наук,
О.О. Фролов, канд. техн. наук (НТУУ “КПІ”, ІЕЕ)*

Приведены результаты исследований по определению параметров активной забойки. Получена формула расчета шага винтовой линии, в которую сформирован детонирующий шнур, размещенный в забойке. Установлены факторы, влияющие на шаг винтовой линии.

Численними дослідженнями встановлено, що набійка свердловини зумовлює тривалість замикання газоподібних продуктів вибуху в свердловині. Найбільша тривалість дії вибуху на руйнований масив спостерігається при застосуванні активної набійки, конструкція якої забезпечує самозамикання матеріалу набійки [1]. Самозамикання набійки можна здійснити шляхом ініціювання в її верхній частині відрізка детонувального шнура (ДШ), сформованого у гвинтову лінію (рис. 1). Дослідженнями встановлено, що при ініціюванні укладеного таким чином ДШ матеріал набійки рухається в осьовому напрямку фронту детонації [2]. Припустимо, що ДШ, сформований у гвинтову лінію, розміщений у якійсь частині набійки a , а бойовик знаходиться в заряді на відстані b від набійки. Час поширення детонаційних хвиль по гвинтовій лінії ДШ визначимо за формулою

$$t_{\text{ДШ}} = \frac{a\sqrt{(2\pi r)^2 + h^2}}{hD_{\text{ДШ}}}, \quad (1)$$