



РОЗРОБКА РОДОВИЩ КОРИСНИХ КОПАЛИН

УДК 622.235.07:614.72

<https://doi.org/10.31713/vt2202018>

Новак А. І., к.т.н., доцент (Технічний Університет «Метінвест Політехніка», м. Маріуполь, Донецька область, e-mail: Anatoliy.Novak@mipolytech.education), **Гнєушев В. О., к.т.н., доцент** (Національний університет водного господарства та природокористування, м. Півне, e-mail: v.o.hnieushev@nuwm.edu.ua)

СПОСІБ РУЙНУВАННЯ ГІРСЬКИХ ПОРІД ВИБУХОМ

Аналітично розглянутий найбільш поширений метод руйнування скельних та напівскельних гірських порід енергією вибухових хвиль. Показано, що вагома частина енергії вибуху свердловинних зарядів не використовується для руйнування порід, а розповсюджується в глибину гірського масиву, формуючи в ньому залишкові деформації і накопичуючи потенційну енергію вибухових хвиль без видимих дезінтеграційних ознак руйнування порід. Запропоновано використати цю накопичену в гірському масиві енергію для інтенсифікації руйнування гірських порід. Це досягається використанням інтерференції вибухових хвиль, що буде виникати при застосуванні у свердловинах вибухової речовини іншого типу, що має імпеданс, який максимально відповідає акустичній жорсткості напруженої гірської породи та відрізняється від попередньої вибухової речовини на одну напівхвилю стиснення. Застосування нового способу ведення буропідривних робіт підвищить ефективність використання енергії вибуху для руйнування гірських порід, зменшить собівартість видобувних робіт на кар'єрах та знизить об'єми викидів отруйних газів в атмосферу при проведенні масових вибухів.

Ключові слова: кар'єр; міцні скельні та напівскельні гірські породи; акустична жорсткість породи; вибухова речовина; імпеданс вибухової речовини; швидкість детонації вибухової речовини; отруйні гази вибуху.

Аналіз досліджень і постановка задачі. Відомі різноманітні способи підривання свердловинних зарядів, які широко застосовуються для руйнування гірських порід енергією вибуху на кар'єрах в різних країнах та в Україні [1]. Для підвищення ефективності цього процесу використовують різні вибухові речовини, змінюють діаметри

свердловин та параметри їх розташування на уступі, час, черговість та послідовність підривання зарядів вибухової речовини, застосовують різні конструкції свердловинних зарядів. Для вибору оптимальних параметрів проведення буропідривних робіт на уступах при руйнуванні скельних та напівскельних порід використовують різноманітні методи розрахунків зарядів [1]. Але всі ці заходи не позбавляють вибухові роботи притаманного їм недоліку: надто значна частина енергії вибуху свердловинних зарядів не використовується для руйнування порід, а марно втрачається, розповсюджуючись вглиб гірського масиву без ефективного виконання корисної роботи з його руйнування.

Одним із засобів удосконалення буропідривних робіт стало збільшення діаметру свердловин (від 180 до 440 мм) та розширення сітки їх розташування (з 4-5 до 8-9 м) без зміни інтервалів уповільнень [2]. Недооцінка впливу величини інтервалу уповільнення на результати вибуху мала наступні наслідки: вихід гірничої маси з погонного метру свердловини зріс від 20,3 до 91 м³/п. м, але якість гранулометричного складу підірваної гірничої маси значно погіршилася [2].

Відомим способом поліпшення якості підривних робіт є застосування підривання в затиснутому середовищі та збільшення питомої витрати вибухової речовини (ВР). Приміром, застосування підривання в затиснутому середовищі та короткоуповільненого підривання (КУП) спричинило збільшення питомої витрати ВР з 0,47 до 0,72 кг/м³, але вихід негабариту при цьому відповідно знизився з 2,5 до 0,06% [2]. І хоча поліпшення якості дроблення порід повністю компенсувало додаткові витрати на ВР, питання подальшого поліпшення якості дроблення підірваної гірничої маси для отримання продукту заданого гранулометричного складу ще потребує свого розв'язання. Вирішення цього завдання, на думку авторів [2], стримується недостатньою вивченістю фізичної сутності процесу руйнування гірських порід вибухом, тим більше – при підриванні масиву гірських порід на висоту двох і більше уступів з подальшим відвантаженням гірської маси на кожному горизонті.

Професором Кутузовим Б. М. викладені загальні принципи розрахунку параметрів вибухових робіт, правила монтажу вибухових мереж, а також загальні принципи підготовки та організації вибухів при підземній та відкритій розробці корисних копалин, дано загальну характеристику спеціальним вибуховим роботам [3]. Детально розглянуто принципи регулювання ступеня дроблення гірських порід вибухом. Але автор не передбачає можливість використання потен-



ційної енергії вибухових хвиль, яка вже накопичена у гірському масиві. У роботах [4; 5; 6; 7] також детально розглянуто процес руйнування міцних гірських порід вибухом та відмічено значну роль вибухових хвиль у їх руйнуванні та дробленні. Але у цих роботах також відсутні пропозиції щодо залучення енергії вибухових хвиль, яка вже накопичена у гірському масиві, для додаткового руйнування скельних гірських порід.

Метою даної статті є обґрунтування можливого механізму залучення залишкових деформацій та потенційної енергії вибухових хвиль, що утворилися і збереглися в гірському масиві від попередніх вибухів, для виконання корисної роботи з подрібнення гірничої маси.

Узагальнено, що механізмом реалізації пропонованого принципу може стати форма імпульсу вибуху. Управляти формою імпульсу вибуху, а отже, і переходом енергії заряду в енергію хвилі у промислових умовах можливо шляхом зміни типу вибухової речовини, конструкції заряду, застосування внутрішньосвердловинних уповільнень та ін.

Основна частина. Автори статті пропонують здійснювати керування формою первинного імпульсу шляхом зміни типу вибухової речовини на такий, що зможе передати масиву порід якомога більше енергії та одночасно, за рахунок інтерференції вибухових хвиль, зруйнувати гірничу породу дією хвиль розтягування.

Такий підхід має наступне теоретичне обґрунтування. Згідно роботи А. Н. Ханукаєва [4], при вибуху заряду поблизу вільної поверхні хвиля напружень викликає зміщення частинок середовища, що не мають перешкоди, в сторону вільної поверхні, залучаючи до цього процесу все більш віддалені від поверхні ділянки породи. У масиві при цьому починає поширюватися відбита хвиля розтягування, напруження в якій за знаком протилежні напруженням прямої хвилі. Хвиля розтягування являє собою відбиту від вільної поверхні хвилю стиснення і поширюється так, наче вона була утворена від вибуху мінного заряду, величина якого однакова з дійсно підірваним зарядом, але розташованого зовні на відстані від вільної поверхні, що дорівнює лінії найменшого опору підіраного заряду.

У роботах [8; 9] зазначається, що руйнування скельних та напівскельних гірських порід енергією вибуху відбувається за рахунок дії відбитої від вільної поверхні повздовжньої вибухової хвилі, яка в цьому випадку втрачає свою половину хвилі, отже – трансформується з хвилі стиснення у хвилю розтягування. При відсутності у масиві гірських порід вільної поверхні її роль відіграють прошарки породи з іншими фізико-технічними властивостями [9]. Оскільки ж межа міц-

ності гірських порід на розтягування на порядок менше межі їх міцності на стиснення, то процес руйнування скельного та напівскельного масиву гірських порід на уступі буде відбуватися в напрямку від вільної поверхні у бік розміщення свердловинного заряду за рахунок енергії вже відбитих вибухових хвиль розтягування. Під час проведення багаторазових вибухових робіт відомими способами одночасно відбуваються процеси як релаксації напружень, так і постійного накопичення потенційної енергії вибухових хвиль у масиві порід. При цьому ефект попереднього насичення гірничого масиву потенційною вибуховою енергією виникає без видимих ознак дезінтеграції гірських порід. Отже, доцільно запропонувати раціональний спосіб використання цієї, вже наявної в масиві енергії, для додаткового руйнування гірських порід.

Авторами пропонується досягати цю мету послідовним використанням двох різних типів вибухових речовин (ВР). Спочатку у свердловинах підривають першу вибухову речовину, яка повинна якомога більше енергії вибуху передати у масив гірських порід [11]. При цьому для максимальної передачі енергії вибуху гірничому масиву має бути виконано умову: акустична жорсткість порід, що підлягають руйнуванню, повинна бути тотожною імпедансу вибухової речовини, що застосовується. При наступному ж вибуху необхідно використовувати іншу вибухову речовину, яка за допомогою своїх властивостей, що відрізняються від властивостей попередньої ВР, дозволить вилучити раніше накопичену у масиві від попередніх вибухів потенційну енергію для збільшення руйнування масиву гірських порід. Такий ефект досягається тим, що наступні свердловини заряджаються вже іншою вибуховою речовиною, імпеданс якої також повинен дорівнювати акустичній жорсткості гірничої породи та, водночас, відрізняться на одну напівхвилю стиснення від імпедансу попередньої вибухової речовини.

Для ілюстрації викладеного принципу розглянемо масив неоднорідних скельних та напівскельних порід, який складено з трьох різних прошарків (рисунок) [9].

Шар породи (1) з високими показниками міцності, який обмежений зверху і знизу шарами породи (2 і 3) з відмінними від нього і один від одного фізико-механічними властивостями. Під час вибуху свердловинного заряду вибухової речовини, розташованого в шарі (1), формується повздовжня вибухова хвиля.

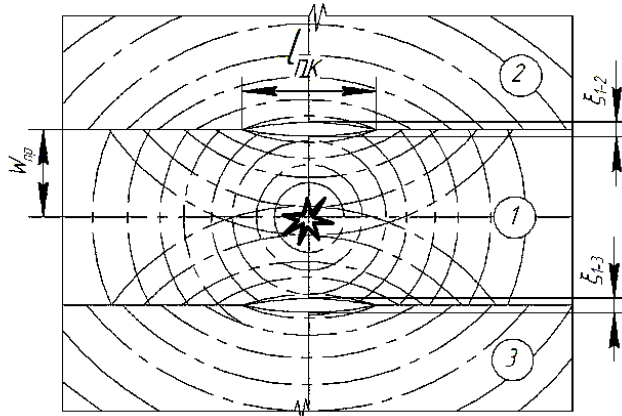


Рисунок. Схема механізму руйнування неоднорідного масиву порід вибухом

Максимальна швидкість зміщення у фронті вибухової хвилі [10] становить:

$$U_{R \max} = \frac{\sigma_{R \max}}{\rho C_p} \cdot g, \quad (1)$$

де $\sigma_{R \max}$ – максимальне напруження стиснення;

ρC_p – акустична жорсткість породи;

g – прискорення вільного падіння.

Величина зсувів породи за час дії вибухової хвилі з фазою стиснення тривалістю τ дорівнює:

$$\xi = \int_0^{\tau} U_{R \max}(t) dt. \quad (2)$$

Оскільки величина зміщення для різних порід неоднакова, то на їх контакті відбувається розрив шарів з утворенням тріщини, товщиною:

$$\Delta \xi_{1-2} = |\xi_1 - \xi_2|, \quad \Delta \xi_{1-3} = |\xi_1 - \xi_3|. \quad (3)$$

Ширина зони ураження контакту тріщиною визначається з формули

$$l_{ПК} = 2 \sqrt{R_0^2 \cdot \frac{\sigma_0}{[\sigma]} \cdot \sqrt[3]{\frac{\sigma_0}{[\sigma]}} - W_{np}^2}, \quad (4)$$

де σ_0 – напруження, що виникають під час вибуху циліндричного за-

ряду, радіусом R_0 ;

$[\sigma]$ – межа міцності породи на стиснення;

$W_{пр}$ – приведена лінія найменшого опору.

Сутність запропонованого способу [11] полягає у тому, що у ще не зруйнований, але насичений потенційною енергією від попередніх вибухів масив гірничих порід, спрямовується вибухова хвиля з протилежною амплітудою коливань, яка відповідає втраті напівхвилі стиснення. Цей ефект досягається завдяки інтерференції [8] вибухових хвиль, яка виникає при застосуванні для заряджання та підривання у свердловинах вибухової речовини іншого типу: з іншим імпедансом, який також повинен максимально відповідати акустичній жорсткості зруйнованої гірничої породи, але відрізнитися від імпедансу попередньої вибухової речовини на одну напівхвилю стиснення. У цьому випадку раніше накопичена енергія вибухових хвиль у масиві гірничих порід буде вилучена та скерована на додаткове руйнування гірничого масиву порід вже не за рахунок напружень стиснення у вибуховій хвилі, а за рахунок напружень розтягування.

Приклад застосування способу. Пробурені свердловини заповнюють вибуховою речовиною, імпеданс якої повинен максимально відповідати акустичній жорсткості гірської породи, та здійснюють підривання. Якщо масив гірських порід вже достатньо насичений потенційною енергією від раніше проведених вибухів, то цей перший етап можна не виконувати.

На другому етапі пробурені свердловини необхідно заповнити вже іншою вибуховою речовиною, імпеданс якої також повинен максимально відповідати акустичній жорсткості гірничої породи але ця ВР повинна відрізнитися від попередньої на одну напівхвилю стиснення. При підриванні цієї ВР виникає інтерференція щойно утворених вибухових хвиль та статичних хвиль залишкових напружень, що дозволяє активізувати раніше накопичену в масиві енергію попередніх вибухів та спрямувати її на додаткове руйнування гірських порід.

Запропонований спосіб [11] може застосовуватись для ефективного руйнування та подрібнення гірських порід не лише при відкритій розробці родовищ корисних копалин, а й на вугільних та рудних шахтах країни, де проводяться буропідривні роботи. Рекомендується приймати відстань між зарядами в ряду і між рядами зарядів рівною розміру лінії найменшого опору, оскільки, при цьому забезпечується більш рівномірний вплив хвилі напружень на ділянку породи, що розташована між зарядною камерою і забоєм, та новоствореною поверхнею [4]. Цих рекомендацій також доречно дотримуватись при роз-



робці паспорту буровибухових робіт та встановлення параметрів розташування свердловин на уступі.

Позитивним результатом пропонованого способу є також зменшення питомих витрат BP , що дає можливість знизити сумарну масу зарядів вибуху, а отже – кількість отруйних газів, що викидаються при вибуху в атмосферу, а також зменшити радіус газонебезпечної зони r_r , який, як відомо, безпосередньо залежить від сумарної маси заряду Q і, приміром, при відсутності вітру розраховується за формулою [12]

$$r_2 = 160 \cdot \sqrt[3]{Q}. \quad (5)$$

Ця обставина покращує умови праці персоналу, знижує рівень загроз для населення та довкілля в зоні ведення буропідричних робіт взагалі і при здійсненні масових вибухів зокрема.

Висновок. Спосіб руйнування гірських порід вибухом, на який отримано деклараційний патент України [11], можна використовувати на кар'єрах з метою зменшення непродуктивних витрат енергії вибуху при руйнуванні гірських порід, зменшення витрати вибухових речовин, покращення дроблення порід, зменшення затрат на вантажні та бурові роботи. Все перелічене має наслідками також зменшення загальної собівартості видобутку корисних копалин, підвищення рівня безпеки праці персоналу та умов проживання населення на прилеглих територіях.

Звичайно, запропонований спосіб руйнування гірських порід вибухом потребує перевірки в умовах діючого виробництва з можливістю внесення в нього (за потреби) необхідних коректив.

1. Рубцов С. К., Шеметов П. А. Управление взрывным воздействием на горный массив при открытой разработке месторождений. Ташкент : Издательство «Фан», 2011. 400 с. 2. Ткачук К. Н., Ткачук К. К., Тверда О. Я. Управление разрушением горных пород взрывом на карьерах : монография. Киев : издательство «Основа», 2015. 262 с. 3. Кутузов Б. Н. Методы ведения взрывных работ. *Разрушение горных пород взрывом*. 3-е изд. Москва : издательство Московского Государственного горного университета, 2018. Часть 1. 476 с. 4. Ханукаев А. Н. Энергия волн напряжений при разрушении пород взрывом. Москва : Гостехнадзор, 1962. 200 с. 5. Суханов А. Ф., Кутузов Б. Н. Разрушение горных пород взрывом : учеб. для вузов. 2-е изд. перераб. и доп. Москва : издательство «Недра», 1983. 344 с. 6. Ханукаев А. Н. О физической сущности процесса разрушения горных пород взрывом. Вопросы теории разрушения горных пород действием взрыва. Москва : издательство АН СССР, 1958. 264 с. 7. Шемякин Е. И. О волнах напряжений в прочных горных породах. *Журнал ПМТФ*. 1963. № 5. 8. Борзых А. Ф., Новак А. И. Оце-

нка действия взрывных волн в слоистом массиве. *Горный журнал*. Известия вузов, 1984. № 4. С. 40–43. **9.** Новак А. И. Механизм разрушения неоднородного слоистого массива горных пород энергией взрыва. *Вісник НУВГП. Сер. Технічні науки* : зб. наук. праць. Рівне : НУВГП, 2014. Вип. № 4(68). С. 441–447. **10.** Баум Ф. А., Станюкович К. П., Шехтер Б. И. Физика взрыва. Госуд. изд-во физ.-мат. литературы, 1959. 800 с. **11.** Новак А. І. Спосіб руйнування гірничих порід вибухом : пат. України: № 136031; опубл. 25.07.2019, Бюл. № 14. **12.** НПАОП 0.00-1.66-13. Правила безпеки під час поведження з вибуховими матеріалами промислового призначення. [Чинні від 2013-08-13]. URL : <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/z1127-13> (дата звернення: 25.06.2020).

REFERENCES:

1. Rubtsov S. K., SHemetov P. A. Upravlenie vzryivnyim vozdeystviem na gornyy massiv pri otkryitoy razrabotke mestorojdeniy. Tashkent : Izdatelstvo «Fan», 2011. 400 s. **2.** Tkachuk K. N., Tkachuk K. K., Tverda O. YA. Upravlenie razrusheniem gornyyh porod vzryivom na karerah : monografiya. Kiev : izdatelstvo «Osnova», 2015. 262 s. **3.** Kutuzov B. N. Metodyi vedeniya vzryivnyih rabot. Razrushenie gornyyh porod vzryivom. 3-e izd. Moskva : izdatelstvo Moskovskogo Gosudarstvennogo gornogo universiteta, 2018. Chast 1. 476 s. **4.** Hanukaev A. N. Energiya voln napryajeniy pri razrushenii porod vzryivom. Moskva : Gostehnadzor, 1962. 200 s. **5.** Suhanov A. F., Kutuzov B. N. Razrushenie gornyyh porod vzryivom : ucheb. dlya vuzov. 2-e izd. pererab. i dop. Moskva : izdatelstvo «Nedra», 1983. 344 s. **6.** Hanukaev A. N. O fizicheskoy suschnosti protsessa razrusheniya gornyyh porod vzryivom. Voprosy teorii razrusheniya gornyyh porod deystviem vzryiva. Moskva : izdatelstvo AN SSSR, 1958. 264 s. **7.** Shemyakin E. I. O volnah napryajeniy v prochnyih gornyyh porodah. *Jurnal PMTF*. 1963. № 5. **8.** Borzyih A. F., Novak A. I. Otsenka deystviya vzryivnyih voln v sloistom massive. *Gornyyi jurnal*. Izvestiya vuzov, 1984. № 4. С. 40–43. **9.** Novak A. I. Mehanizm razrusheniya neodnorodnogo sloistogo massiva gornyyh porod energiey vzryiva. *Visnyk NUVHP. Ser. Tekhnichni nauky* : zб. nauk. prats. Rivne : NUVHP, 2014. Vyp. № 4(68). С. 441–447. **10.** Baum F. A., Stanyukovich K. P., SHehter B. I. Fizika vzryiva. Gosud. izd-vo fiz.-mat. literaturyi, 1959. 800 s. **11.** Novak A. I. Sposib ruinuvannia hirnychykh porid vybukhom : pat. Ukrainy: № 136031; opubl. 25.07.2019, Biul. № 14. **12.** NPAOP 0.00-1.66-13. Pravyla bezpeky pid chas povodzhennia z vybukhovymy materialamy promyslovoho pryznachennia. [Chynni vid 2013-08-13]. URL : <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/z1127-13> (data zvernennia: 25.06.2020).



Novak A. I., Candidate of Engineering (Ph.D.), Associate Professor,
(Technical University «Metinvest Polytechnic», Mariupol),

Hnieushev V. O., Candidate of Engineering (Ph.D.), Associate Professor
(National University of Water and Environmental Engineering, Rivne)

METHOD OF ROCKS DESTRUCTION BY EXPLOSION

The most common method of destruction of rocks and semi-rocks by the energy of blast waves is considered analytically. It is shown that a significant part of the energy of explosion of downhole charges is not used for rock destruction, but spreads deep into the rock mass, forming residual deformations and accumulating potential energy of blast waves without visible disintegration signs of rock destruction. To intensify the energy transfer of the explosion to the rock mass, the condition must be met: the acoustic stiffness of the rocks to be destroyed must be identical to the impedance of the explosive used. In the next explosion, it is necessary to use another explosive, which with its properties that differ from the properties of the previous explosive, will remove previously accumulated in the array of potential energy from previous explosions to enhance the destruction of rocks. This effect is achieved by the fact that subsequent wells are charged with another explosive, the impedance of which must also be equal to the acoustic stiffness of the rock and, at the same time, differ by one half-wave of compression from the impedance of the previous explosive. The application of a new method of drilling and blasting will increase the efficiency of explosive energy for the destruction of rocks, reduce the cost of mining in quarries and reduce emissions of toxic gases into the atmosphere during mass explosions.

***Keywords:* quarry; strong rock and semi-rock rocks; acoustic stiffness of rocks; explosive; explosive impedance; explosive detonation rate; toxic explosive gases.**

Новак А. И., к.т.н., доцент (Технический Университет «Метинвест Политехника», г. Мариуполь, Донецкая область), **Гнеушев В. А., к.т.н., доцент** (Национальный университет водного хозяйства и природопользования, г. Ровно)

СПОСОБ РАЗРУШЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД ВЗРЫВОМ

Аналитически рассмотрен наиболее распространенный метод разрушения скальных и полускальных горных пород энергией взрывных волн. Показано, что значительная часть энергии взрыва скважинных зарядов не используется для разрушения пород, а распространяется вглубь горного массива, формируя в нем остаточные деформации и накапливая потенциальную энергию взрывных волн без видимых дезинтеграционных признаков разрушения пород. Предложено использовать эту накопленную в горном массиве энергию для интенсификации разрушения горных пород. Это достигается использованием интерференции взрывных волн, которая будет возникать при применении в скважинах взрывчатого вещества другого типа, имеющего импеданс, который максимально соответствует акустической жесткости напряженной горной породы и отличается от предыдущего взрывчатого вещества на одну полуволну сжатия. Применение нового способа ведения буровзрывных работ повысит эффективность использования энергии взрыва для разрушения горных пород, уменьшит себестоимость добычных работ на карьерах и снизит объемы выбросов ядовитых газов в атмосферу при проведении массовых взрывов.

Ключевые слова: карьер; прочные скальные и полускальные горные породы; акустическая жесткость породы; взрывчатое вещество; импеданс взрывчатого вещества; скорость детонации взрывчатого вещества; ядовитые газы взрыва.
