

**ПРОСТОРОВА СПРЯМОВАНІСТЬ ЕНЕРГІЇ КОМБІНОВАНИХ
СВЕРДЛОВИННИХ ЗАРЯДІВ ЗА ДИФЕРЕНЦІЙОВАНОГО
ЕНЕРГОНАСИЧЕННЯ МАСИВУ ПОРІД**

© A. Skachkov

**SPATIAL ORIENTATION ENERGY OF THE COMBINED BOREHOLE
CHARGES WITH DIFFERENTIATED ENERGY SATURATION OF THE
ROCK MASSIF**

Мета досліджень – аналіз закономірностей просторової концентрації вибухової енергії в масиві порід, який має складну структуру і зумовлену нею акустичну анізотропію, в залежності від конструкції свердловинного заряду та умов його підривання; обґрунтування загального підходу щодо розробки технології руйнування масиву скельних гірських порід в умовах симетричної дії свердловинних зарядів. Проаналізовано основні чинники впливу вибуху на якість подрібнення порід за умов застосування розроблених авторських рішень щодо конструкцій свердловинних зарядів, формування породних оголень, створення додаткових відбиваючих хвилі екранних щілин, а також вертикальних укосів уступів. Розглянуто цей процес руйнування порід зі зміною порядку підривання зарядів у рядах свердловин в напрямі від другого або третього – до першого.

Методика досліджень включає методи аналітичних розрахунків та геометричних побудов, геомеханічний аналіз зміни напруженого стану відносно структурних порушень породних уступів різної висоти та літологічного складу; обґрунтування імітаційної моделі розповсюдження пружних хвиль в анізотропному кристалічному середовищі та формування в ньому хвилеводів; статистичний аналіз даних маркшейдерських спостережень та математичні методи обробки результатів експериментальних і промислових випробувань. Застосовуються просторово-математичні методи рішення задач та порівняльні оцінки їх результатів.

Досліджено особливості та умови реалізації в залізородному кар'єрі симетричного підривання масивів скельних порід зі складною регулярною структурою комбінованими свердловинними зарядами сучасних вибухових речовин. Обґрунтовується вибір напрямів формування в мережі вибухових свердловин їх розташування. З застосуванням математичного й імітаційного моделювання з'ясовано особливості формування контурів у масиві гірських порід максимально і мінімально напружених зон навколо свердловинних зарядів у залежності від фізико-механічних та структурних характеристик гірських порід а також відносних мас різнотипної вибухівки в комбінованому заряді.

Наукова новизна полягає в формулюванні авторської ідеї щодо симетричного підривання породного масиву, диференційовано насиченого вибухом, та аналітичному обґрунтуванні параметрів об'єктів і процесів для ефективного упровадження розробок у виробничу практику кар'єрів гірничо-збагачувальних комбінатів.

Практичне значення досліджень полягає в розробці нового ефективного способу підривання скельних порід в умовах кар'єрів гірничо-збагачувальних комбінатів та обґрунтуванні параметрів технології реалізації способу, що знижує питомі витрати вибухових матеріалів і підвищує прибуток ГЗК.

Ключові слова: породний масив, вибухове руйнування, кар'єр, вибухові хвилі, анізотропія гірських порід, симетрична дія свердловинних зарядів.

Постановка проблеми. Незважаючи на виключно чисельні та серйозні наукові дослідження в Україні й інших країнах, присвячені ефективності буровибухових робіт (БВР) на відкритих розробках, проблема нерівномірності гранулометричного складу підірваної гірничої маси, особливо в зоні, прилеглій до укосу уступу, а також – як і раніше – надмірно висока собівартість й екологічна агресивність вибухових робіт однозначно свідчать про те, що дану проблему вирішено далеко не повністю. Тому **завдання** пошуку шляхів уникнення названих негативних наслідків вибуху є вельми **актуальним**, так як підвищення ефективності БВР у свою чергу сприяє **вирішенню проблеми** раціонального надкористування, ресурсо- й енергозбереження.

Як показує **аналіз останніх досліджень** з теорії вибухового руйнування кристалічних гірських порід і практики БВР [1-2], одним з **найменш досліджених теоретично й невирішених практично питань** є нерівномірне формування під дією вибуху напружено-деформованого стану породних масивів складної регулярної структури із зумовленою нею акустичною анізотропією, яка переважно має періодичну функціональну залежність (епіциклоїдну) пружно-механічних характеристик у фронті хвилі навколо підіраного заряду ВР щодо напрямку її поширення відносно просторової орієнтації структурних доміант порід уступу, оптимізувати що стає можливим шляхом диференційованого енергонасичення масиву, оптимізації взаємодії свердловинних зарядів ВР з масивом і між собою, а також – удосконалення технології БВР, зокрема – способів створення реально працюючих додаткових відбиваючих пружні хвилі екрануючих щілин та конструкцій зарядів для цього [3]. У зв'язку з чим **в дослідження закладалася ідея** використання для попереднього знеміцнення породи й утворення додаткової відбиваючої щілини особливостей формування в акустично анізотропному породному масиві просторово складних форм поверхонь різного напруженого стану, а також поглиблення диференційованого енергонасичення масиву вибухом за рахунок спеціально розроблених різнотипних зарядів ВР, для вирішення чого **задачі досліджень** передбачали обґрунтування оптимальних форм зон руйнування порід навколо зарядів ВР та взаємного розташування останніх у вибуховій мережі, коли заряди першого ряду свердловин (основні заряди рихлення) ініціюються тільки після проходження скрізь них прямої та відбитої укосом уступу хвилі вибуху зарядів другого ряду, створюючи завдяки цьому умови для симетричної дії основних зарядів між двома відбиваючими поверхнями – вертикального укосу уступу з одного, та створюваної з короткочасним випередженням «тильної» щілини – з іншого.

Викладення матеріалу досліджень. Відомо, що зниження якості дроблення порід з вираженою структурною регулярністю (системною тріщинуватістю та блочністю) зумовлюється формуванням в масиві, що руйнується, свого роду хвилеводів унаслідок заломлення й відбивання енергетичних променів від заряду ВР на контактах породних окремоностей, внаслідок чого різні зони зруйнованої породи між вибуховими свердловинами мають різний гранулометричний склад, що змушує технологів збільшувати масу вибухівки в свердловинах для гарантованого зниження до прийнятних рівнів виходу «негабаритів», разом

з тим неминуче отримуючи підвищений вихід і перездрібненої маси. Саме це протиріччя й наштотхнула автора на ідею пошуку рішень щодо уникнення даного ефекту шляхом узгодженого сполучення трохіодних контурів зон руйнування навколо свердловинних зарядів суміжних рядів за умов формування вертикальних укосів уступів та додаткових відбиваючих поверхонь (екрануючих щілин) для забезпечення умов симетричної роботи свердловинних зарядів, цілеспрямовано запроєктованих комбінованої конструкції.

Розробка й обґрунтування технології диференційованого енергонасичення гірських порід за умов масового підривання свердловинних зарядів головним чином реалізовувалася в кар'єрі «Північний» ГЗК «Укрмеханобр», де гірничі роботи ведуться по осадовим, насипним та корінним скельним породам, які представлені глинами, суглинками, залізистими кварцитами та сланцями. Щільність гірських порід коливається від 1,8 до 3,0 т/м³. Підривні роботи передбачені по скельним породам.

Протягом 2011-2013 рр. за участю автора було розроблено й запатентовано способи БВР [3, 4], в яких за рахунок формування різних за конструкцією свердловинних зарядів в паралельних бровці укосу рядах та черговості підривання цих зарядів, максимізувалося використання енергії вибуху на руйнування породи і мінімізувалося – на її переміщення. При висоті уступів до 10 м ряди свердловин групуються по 2 і підриваються з уповільненням від парного до непарного, тобто в послідовності: 2-й→1-й→4-й→3-й→6-й→5-й і т.д. Застосування вертикальних укосів у поєднанні з пропонованою послідовністю підривання зарядів у згрупованих попарно рядах забезпечує уніфікацію свердловинних зарядів, та знижує на 5÷7 % питому витрату ВР. За цих умов в якості основного застосовувався заряд, захищений патентом [4].

Конструкція ослабленого заряду – для попереднього знеміцнення породи й утворення відбиваючої щілини – також розроблялася автором у різних варіантах, але для різних умов реалізації БВР (рис. 1).

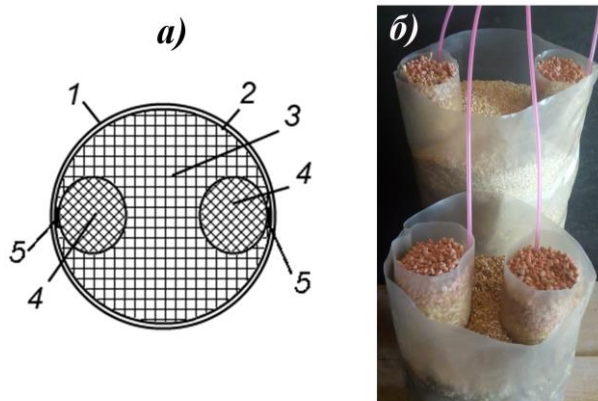


Рис. 1. Поперечний переріз свердловинного заряду парних рядів: 1 – свердловина, 2 – полімерний рукав, 3 – низькобризантний заряд, 4 – лінійні високобризантні заряди, 5 – місця пропайки рукава (а); б – натурні зразки

Конструкції та речовини основного й щільноутворюючого зарядів визначаються, залежно від фізико-механічних характеристик порід, критичних діаметрів ВР, співвідношення акустичної жорсткості порід зі швидкістю детонації ВР, а також від мети та вимог щодо результатів підривання масиву.

Аналіз БВР стосовно кар'єру «Північний», на якому велася реалізація описаного вище диференційованого енергонасичення порід в умовах сухих свердловин найпростішою ВР – Грануліт КМ – показав наступне. Для цієї ВР виміряні значення щільності заряджання і швидкості детонації складають відповідно 1020 кг/м³ і 3850 м/с, а розрахункова теплота вибуху – 980 ккал/кг. Розрахункове для цих умов значення показника політропи (n) становить 1,8, що є в межах, характерних для порошкоподібних ВР (1,5÷2,0). Масову швидкість у площині Чепмена-Жуге (ω , м/с) обчислено за формулою: $\omega = v/(n+1) = 3850/(1,8+1) = 1375$ м/с, а тиск детонаційної хвилі на площині $P_2 = v \cdot \omega \cdot \Delta / g = (3850 \cdot 1020) / 9,81 = 5,504 \cdot 10^8$, Па. Цей тиск – удвічі більший стаціонарного тиску у свердловині: $P_{св} = 5,504 \cdot 10^8 / 2 = 2,752 \cdot 10^8$ Па; оскільки довжина заряду – 4 м, а його діаметр – 0,25 м, то площа, що сприймає цей тиск, становить – 3,61 м². Загальна площа хвилі з циліндричної частини і двох півкуль від торців заряду на момент виходу її на межу воронки дроблення складає: 267,42 м², що у 74 рази більше початкової (3,61 м²). З урахуванням витрат енергії на руйнування порід (наприклад, 20%) тиск – близько 3,0 МПа. В той же час, при підході хвилі до покрівлі уступу, тиск складе близько 0,5 МПа, а біля площини укоса уступу – ще менше.

Разом з тим, експериментальні вибухи з реєстрацією реальних деформацій та напружень в породному масиві навколо зарядів ВР виявили дещо нижчі показники, порівняно з ідеалізованими розрахунковими. Дослідивши напружений стан та структуру масиву, ми встановили головну причину даного розходження – вплив системних макротріщин, які розділяють масив на окремі блоки. А виконавши компаративний (порівняльний) аналіз значень названих відхилень зі значеннями розкриття тріщин, розробили спрощений метод компенсації його в розрахунках шляхом уведення відповідного коефіцієнту K_{cm} , який відрізняється від запропонованого проф. Жуковим С.О. k_{cm} [5], тим, що враховує не тільки рівень заповнення тріщин мінеральним дріб'язком, але й кінетику вибуху та інерційний фактор проходження пружною хвилею через макроріщину. Фізичний сенс даного коефіцієнту полягає в «сходінковому» зрізанні амплітуди пружної хвилі при її поширенні через блоки або шари породи (рис. 2) у поєднанні з пластичними деформаціями приповерхневих зон макротріщин, зумовленими рухом породних мас при розгляді поведінки гірського масиву, що руйнується, як сукупності пружних стержнів.

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

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

де f – міцність породи; ρ_{mp} – рівень заповненості тріщини породним дріб'язком, визначається відношенням об'єму заповнювача V_3 до об'єму тріщини V_{mp} ($\rho_{mp} = V_3 / V_{mp}$); $r_{ф.х.}$ – відстань від заряду до фронту хвилі; g_{mp} – показник питомої трі-

щинуватості масиву, визначається відношенням середньої ширини системних тріщин, нормальних щодо напрямку руху хвиль ($g_{mp} = \delta_{mp} / l_{mp}$).

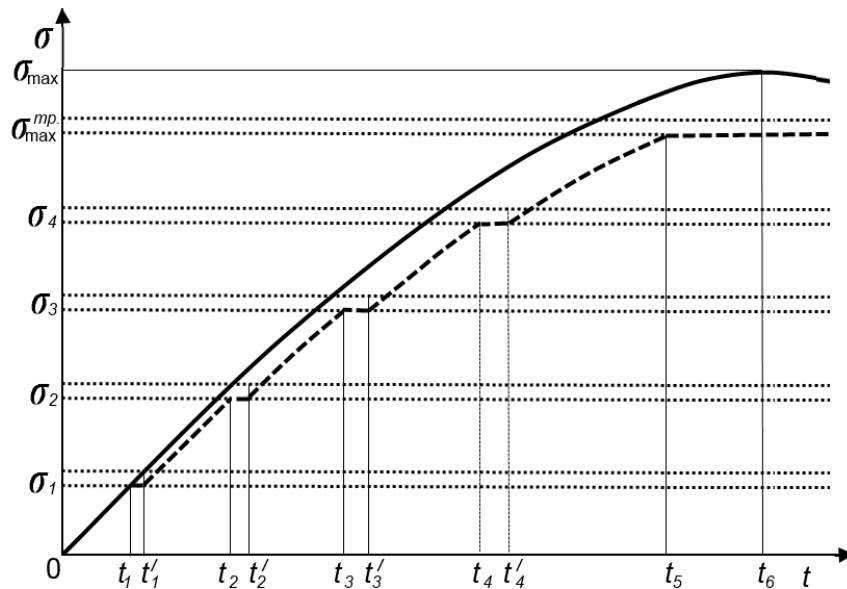


Рис. 2. Модифікація графіка залежності напружень (деформацій) у фронті пружної хвилі за системної тріщинуватості породного масиву

Розрахункові значення K_{mp} для різних порід і структурних характеристик їх масивів наведено в табл. 1.

Таблица 1

Значення коефіцієнта K_{mp}

Назва породи	Середня ширина тріщин, м	Середня відстань між тріщинами, м			
		0,5	1	1,5	2
Граніт $A_o = 2,5 \cdot 10^{-2}$ м, $\nu = 0,5$	0,001	0,96	0,97	0,98	0,99
	0,005	0,77	0,89	0,93	0,95
	0,01	0,45	0,77	0,87	0,89
	0,02	0,01	0,45	0,69	0,77
Мігматит $A_o = 2,3 \cdot 10^{-2}$ м, $\nu = 0,5$	0,001	0,95	0,97	0,98	0,99
	0,005	0,75	0,88	0,91	0,94
	0,01	0,36	0,75	0,86	0,88
	0,02	0,14	0,36	0,65	0,75
Амфіболіт $A_o = 2,1 \cdot 10^{-2}$ м, $\nu = 0,5$	0,001	0,94	0,96	0,97	0,98
	0,005	0,74	0,87	0,89	0,98
	0,01	0,22	0,72	0,84	0,81
	0,02	0,10	0,22	0,61	0,72

Уведення даного коефіцієнту значно покращує сходиність результатів теоретичних розрахунків та експериментальних реєстрацій щодо визначення взаємодії енергії вибуху з породним масивом. Самі ж розрахунки параметрів наближеного до контурного підривання, на наш погляд, найзручніше виконувати згідно [6], доповнюючи в них просторово-енергетичні показники розробленим коефіцієнтом K_{cm} .

З рис. 2 видно, наскільки відрізняються теоретичний та реальний, представлений модифікованою кривою, графіки розвитку напружень (деформацій) у фронті пружної хвилі за системної тріщинуватості породного масиву. Відповідно до цього пропонується межі зон мінімальних і максимальних навантажень блочного породного масиву вибуховою хвилею визначати не теоретичною, а модифікованою трохойдою (рис. 3).

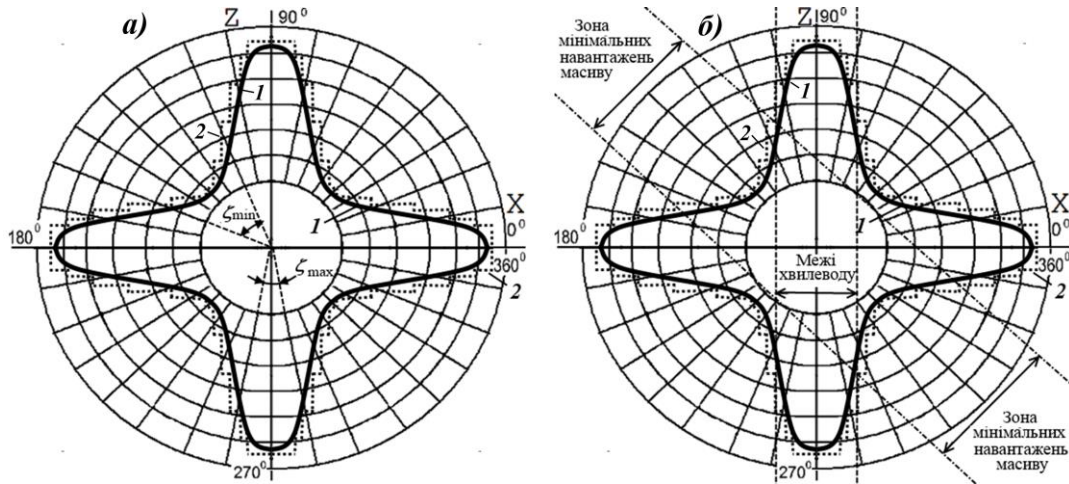


Рис. 3. Межі зон мінімальних і максимальних навантажень блочного породного масиву вибуховою хвилею: 1 – теоретична трохойда, 2 – модифікована трохойда

Що стосується експериментальних реєстрацій рівнів навантаження породного масиву паралельно (R_{\parallel}) і перпендикулярно (R_{\perp}) субортогональній системній тріщинуватості порід, то вони наочно продемонстрували, наскільки різними формуються поля напружень, в залежності від ступеня «проробки» системних тріщин і зумовленою цим акустичною анізотропією масиву (рис. 4): зцементованих близьким за пружністю до породи природним мінеральним матеріалом поперечних і незв'язно зімкнених повздовжніх (а), та «пророблених» тріщинах обох систем (б).

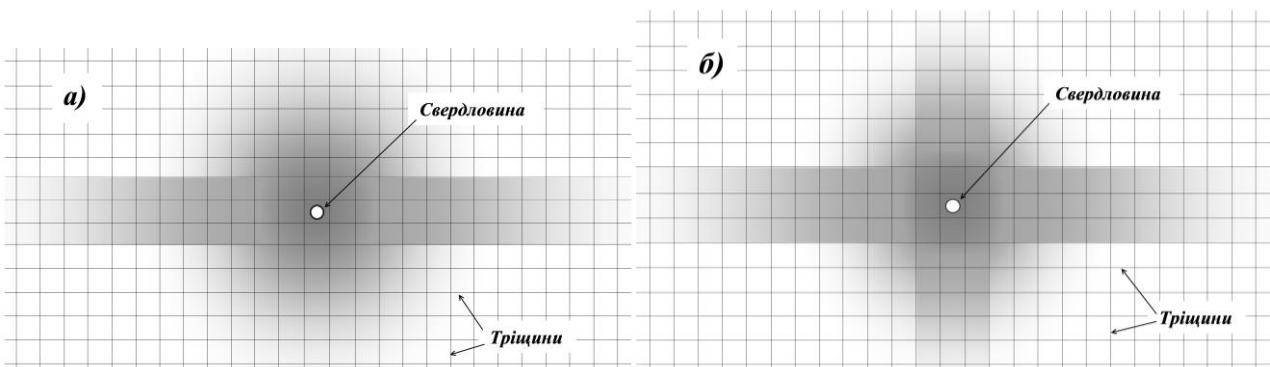


Рис. 4. Різниця між просторовим навантаженням породного масиву навколо свердловинного заряду в залежності від ступеня «проробки» системних тріщин

Експериментально було також встановлено характер впливу конструктивних параметрів комбінованого заряду ВР на залежність між відносними межами зон рів-

них навантажень породного масиву паралельно (R_{\parallel}) і перпендикулярно (R_{\perp}) субортогональній системній тріщинуватості від співвідношення мас високо- (M_{BB}) та низькобризантної (M_{HB}) ВР в заряді (рис. 5).

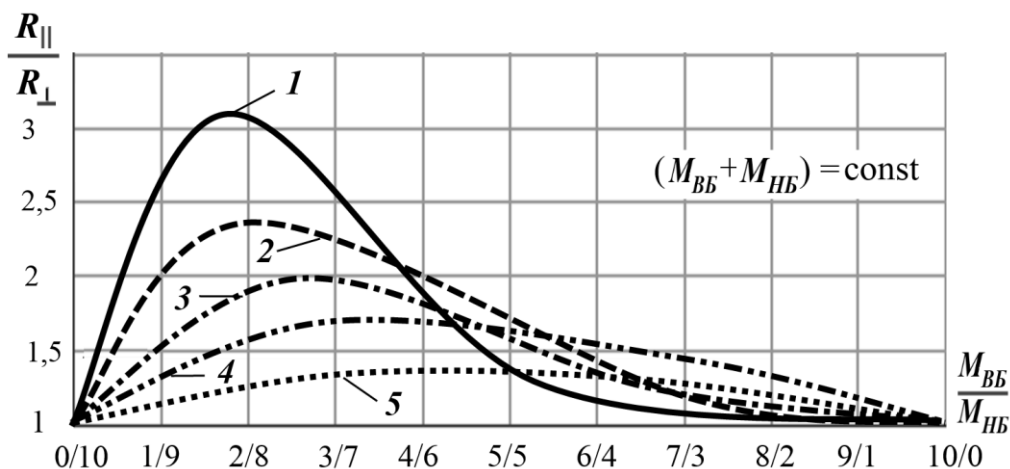


Рис. 5. Залежність між відносними межами зон рівних навантажень породного масиву паралельно (R_{\parallel}) і перпендикулярно (R_{\perp}) субортогональній системній тріщинуватості від співвідношення мас високо- (M_{BB}) та низькобризантної (M_{HB}) ВР в заряді

Висновок. Описане переконує, що для уступів висотою до 11 м, розподілення рядів на групи, по два в кожній, значне зменшення маси зарядів в парних рядах, розподілення зарядів у групі на окремі серії і початок ініціювання в кожній серії саме зі зменшених за масою зарядів, змушує ці зменшені заряди віддавати всю енергію на утворення екрануючої щілини, розвиток знеміцнюючих породо мікротріщин, формування відбитих хвиль від вільних поверхонь, долання інерції масиву, що разом узятє полегшує роботу з подрібнення порід основним зарядам у непарних рядах, зменшує загальні витрати ВР, а відтак – збільшує коефіцієнт корисної дії зарядів ВР.

Перелік посилань

1. Фокин В.А., Тарасов Г.Е., Тогунов М.Б., Данилкин А.А. и Шитов Ю.А. (2008). Совершенствование технологии буровзрывных работ на предельно контуре карьеров. Апатиты: Изд-во Кольского научного центра РАН.
2. Бротанек И.и Вода Й. (1983). Контурное взрывание в горном деле и строительстве. М.: Недра.
3. Скачков А.А, Сергієнко С.Є., Шапурін О.В. и Сидоренко В.Д (2012). Спосіб виконання буро-вибухових робіт. Пат. України на корисну модель UA№ 70655. Бюл. №12.
4. Шапурін О.В., Скачков А.А., Мясніков О.Ф. и М'ясніков О.Ф. (2016) Вибухова свердловина. Пат. України UA№ 112654. Бюл. №24.
5. Жуков С.А. (1998). Разработка технологии добычи природного камня как попутного сырья в действующих карьерах. Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. Кривой Рог.
6. Матвейчук В.В. и Чурсилов В.П. (2002). Взрывные работы. М.: Академический Проект.

АННОТАЦИЯ

Цель исследований - анализ закономерностей пространственной концентрации взрывной энергии в массиве пород, который имеет сложную структуру и обусловленную им акустическую анизотропию, в зависимости от конструкции скважинного заряда и условий его

взрывания; обоснование общего подхода по разработке технологии разрушения массива скальных горных пород в условиях симметричного действия скважинных зарядов. Проанализированы основные факторы влияния вывзрыва на качество измельчения пород в условиях применения разработанных авторских решений по конструкции скважинных зарядов, формирования породных обнажений, создание дополнительных отражающих волны экранных щелей, а также вертикальных откосов уступов. Рассмотрен этот процесс разрушения пород с изменением порядка взрывания зарядов в рядах скважин в направлении от второго или третьего - к первому.

Методика исследований включает методы аналитических расчетов и геометрических построений, геомеханический анализ изменения напряженного состояния относительно структурных нарушений породных уступов разной высоты и литологии; обоснование имитационной модели распространения упругих волн в анизотропной кристаллической среде и формирование в нем волноводов; статистический анализ данных маркшейдерских наблюдений и математические методы обработки результатов экспериментальных и промышленных испытаний. Применяются пространственно-математические методы решения задач и сравнительные оценки их результатов.

Исследованы особенности и условия реализации в железорудном карьере симметричного взрывания массивов скальных пород со сложной регулярной структурой комбинированными скважинными зарядами современных взрывчатых веществ. Обосновывается выбор направлений формирования в сети взрывных скважин их расположения. С применением математического и имитационного моделирования выяснены особенности формирования контуров в массиве горных пород максимально и минимально напряженных зон вокруг скважинных зарядов в зависимости от физико-механических и структурных характеристик горных пород а также относительных масс разнотипной взрывчатки в комбинированном заряде.

Научная новизна заключается в формулировке авторской идеи касательно симметричного подрыва породного массива, дифференцированно насыщенного взрывом, и аналитическом обосновании параметров объектов и процессов для эффективного внедрения разработок в производственную практику карьеров горно-обогатительных комбинатов.

Практическое значение исследований заключается в разработке нового эффективного способа взрывания скальных пород в условиях карьеров горно-обогатительных комбинатов и обосновании параметров технологии реализации способа, снижает удельные затраты взрывчатых материалов и повышает прибыль ГОКа.

Ключевые слова: *породный массив, взрывное разрушение, карьер, взрывные волны, анизотропия горных пород, симметричная действие скважинных зарядов.*

ABSTRACT

Purpose. The main purpose of the presented research is to analyze the patterns of the spatial concentration of explosive energy in an array of rocks, which has a complicated structure and its acoustic anisotropy due to the design of the well borehole and the conditions for its blasting; the substantiation of the general approach to the development of technology for the rock destruction an rock massif array in conditions of symmetrical action of well borehole charges. The main factors of the explosion impact on the quality of rocks crushing under the conditions of application of developed author's decisions regarding the designs of borehole charges, formation of rock bumps, creation of additional reflecting waves of the screen gaps, as well as vertical slopes of the ledges are analyzed. This process of destruction of rocks with the change in the order of bursting of charges in the rings of wells in the direction from the second or third – to the first.

The research methodology includes methods of analytical calculations and geometric surveys, geomechanical analysis of the change of the stress state relative to structural disturbances of rocky ledges of different heights and lithological composition; the substantiation of the simulation model for the distribution of the elastic waves in anisotropic crystalline medium and the formation of waveguides in it; statistical analysis of mine surveying observations and mathematical methods for processing the results of experimental and industrial tests. Spatial-mathematical methods of solving problems and comparative estimations of their results are used.

Findings. The peculiarities and conditions of realization in the iron-ore quarry of symmetric blasting of rocks with complex regular structure with combined well-borne charges of modern explosives are investigated. The choice of directions of formation in the network of explosive wells of their location is substantiated. Using mathematical and simulation modeling, the peculiarities of formation of contours in the rock massif of maximum and minimum stressed zones around well boreholes depending on the physical and mechanical and structural characteristics of rocks as well as relative masses of various types of explosives in the combined charge are determined.

The originality. The scientific novelty consists in formulating the author's idea of symmetric blasting of the rock massif, differentiated by the explosion-rich, and analytical substantiation of the parameters of objects and processes for the effective implementation of developments in the production practice of the mining and concentrating mills' quarries.

Practical implications. The practical significance of the research is to develop a new effective way of undermining the rock massif in the open pit of the mining and processing plants and to substantiate the parameters of the technology for implementing the method, which reduces the specific costs of explosive materials and increases the profit of the GOK.

Keywords: *rock massif, explosive destruction, quarry, explosive waves, anisotropy of rocks, symmetrical action of well boreholes.*

УДК 622.271:504.062

© Б.Ю. Собко, О.В. Ложніков

СИСТЕМАТИЗАЦІЯ КАР'ЄРІВ НЕРУДНИХ КОРИСНИХ КОПАЛИН УКРАЇНИ ПРИДАТНИХ ДО БЕЗВИБУХОВОЇ РОЗРОБКИ

© B. Sobko, O. Lozhnikov

SYSTEMATIZATION OF NON-ORE MINERAL QUARRIES OF UKRAINE SUITABLE TO NON-BLASTING MINING

Мета. Розробити систематизацію кар'єрів нерудних корисних копалин придатних для безвибухової підготовки міцної гірської маси до виймання на основі аналізу науково-дослідних і практичних досягнень в галузі відкритої розробки.