

© А.А. Скачков¹, Д.А. Тітов², С.О. Жуков²

¹ Північний гірничо-збагачувальний комбінат, Кривий Ріг, Україна

² ДВНЗ «Криворізький національний університет», Кривий Ріг, Україна

КОНТРОЛЬНІ ПРОМИСЛОВІ ВИПРОБУВАННЯ МЕТОДУ ПІДРИВАННЯ ГІРСЬКИХ ПОРІД З ДИФЕРЕНЦІЙОВАНИМ ЕНЕРГОНАСИЧЕННЯМ МАСИВУ

© A. Skachkov¹, D. Titov², S. Zhukov²

¹ Metinvest, Northern Mining and Processing Plant, Kryvyi Rih, Ukraine

² Kryvyi Rih National University, Kryvyi Rih, Ukraine

CONTROL INDUSTRIAL EXPERIMENTS OF EXPLOSION METHODS OF ROCKS WITH DIFFERENTIATED ENERGY SATURATION OF MASS

Мета досліджень – експериментальна контрольна перевірка ефективності застосування й параметричне уточнення структурного впливу середовища щодо технології руйнування масиву скельних гірських порід з диференційованим енергонасиченням останнього за умов симетричної дії свердловинних зарядів; з'ясування взаємозв'язку при підриванні породних блоків природних і технологічних чинників та реалізації максимально продуктивного їх сполучення, а також перевірка ступеня адекватності алгоритму експериментальних вишукувань.

Методика досліджень включає планування промислових експериментів, геомеханічний аналіз стану і стійкості скельних масивів різної висоти і літології; уточнення процесу поширення пружних хвиль в кристалічному середовищі та їх суперпозиції; статистичний аналіз даних маркшейдерських спостережень і математичні методи обробки результатів експериментальних і промислових випробувань.

Досліджено важливі для теорії і практики вибухових робіт особливості формування і взаємодії силових полів від вибуху внутрішньо свердловинних зарядів ВР, які підриваються з уповільненням. Суперпозиція пружних хвиль грає головну роль в руйнуванні масиву гірських порід за цих умов. Підбираючи маси зарядів і тривалість затримки між вибухами, можна регулювати процес завантаження масиву вибуховими речовинами в залежності від конкретних гірських і геологічних умов вибухових робіт. Змінюючи способи формування і порядок підривання зарядів ВВ в руйнованому обсязі, можна впливати на процес руйнування, знаючи особливості формування силових полів.

Наукова новизна полягає в експериментальній перевірці авторської ідеї симетричного підриву породного масиву, диференційовано насиченого вибухом, і аналітичному обґрунтуванні параметрів об'єктів і процесів для ефективного впровадження розробок у виробничу практику кар'єрів гірничо-збагачувальних комбінатів.

Практичне значення. Подальша розробка й упровадження у виробництво результатів досліджень забезпечить значне зниження собівартості залізородної продукції за рахунок підвищення ефективності буропідривних робіт у кар'єрі.

Ключові слова: руда, вибухове руйнування, пружні хвилі, вибухові роботи, свердловинні заряди.

Вступ. Незважаючи на чисельні наукові дослідження руйнування гірських порід в кар'єрах шляхом буропідривних робіт (БПР), виробнича статистика свід-

чить про те, що скельні уступи найбільш нерівномірно руйнуються в зоні, прилеглий до їхніх укосів, в результаті чого утворюється роздроблена гірнична маса з найбільш неоднорідною кускуватістю, що створює серйозні проблеми при подальших технологічних процесах з нею [1]. Винятково складний напружено-деформований стан масиву в цій частині при взаємодії свердловинних зарядів, які підриваються в першому та другому рядах, і є однією з головних причин неконтрольованого виходу негабаритних та перездрібнених фракцій гірничої маси, що негативно позначається на техніко-економічних показниках всього гірничовидобувного виробництва. Тому пошук шляхів вирішення даної проблеми продовжує залишатися вельми актуальним завданням [2].

Аналіз останніх досліджень вибухового руйнування кристалічних масивів [3-4] свідчить про те, що одним з **найменш досліджених теоретично і невіршених практично питань** є продуктивно керований вплив вибуху на формування диференційованого напруження крайової частини уступу, оптимізувати що є можливим при цілеспрямованому використанні ефектів розвитку динамічної зони руйнування, створюваної силовими полями взаємодіючих зарядів вибухових речовин (ВР) приконтурних рядів [4-6]. У зв'язку з цим у дослідження закладалася ідея можливості цільового використання динамічних ефектів, що проявляються у вигляді суперпозиції вибухових хвиль при взаємодії вибуху свердловинних зарядів спеціальних конструкцій, розроблених авторами і багаторазово випробуваних в масштабах промислових експериментів.

Мета статті полягає в аналізі результатів проведених протягом 2017-2018 рр. додаткових контрольних дослідних вибухів на кар'єрі «Північний» ГЗК «Укрмеханобр», а саме: уточнення проявів динамічних ефектів за умов, коли заряди першого ряду свердловин ініціюються тільки після проходження скрізь них прямої та відбитої від поверхонь уступу хвиль, ініційованих першочерговим підриванням зарядів другого ряду, утворюючи завдяки сприятливій суперпозиції вибухових хвиль оптимальну динамічну зону відповідно до конкретних умов.

Основним завданням дослідження за цих умов є аналіз експериментальної ефективності розробленої та модифікованої авторами технології щодо симетричної дії вибуху в структурно складному природно масиві, до того ще й лінійно розчленованому паралельними укосу штучними вертикальними щілинами, що зумовлює завдяки сприятливій суперпозиції прямих та відбитих хвиль ефективно випереджаюче знеміцнення масиву.

Методика досліджень здебільшого полягала в компаративному аналізі варіабельності результатів експериментальних вибухів в залежності від комплексних характеристик середовища, параметрів технології та особливостей реєстрації динамічних проявів за змінних умов.

Викладення матеріалу досліджень. Аналіз світового досвіду розробки родовищ міцних крупноблочних порід широко демонструє виробничу практику застосування вертикальних укосів уступів висотою 10 м і більше. В кар'єрі «Північний» ГЗК «Укрмеханобр» застосовуються саме уступи висотою 10 м і породи є достатньо стійкими, тому основний обсяг експериментів здійснювався саме там. Але результати експериментів подекуди відрізнялися значним розходженням

значень внаслідок мінералогічного і структурного розмаїття порід родовища, тому було виконано представлені додаткові контрольні вибухи.

Першочергово розроблялися спеціальні конструкції комбінованих лінійних свердловинних зарядів спрямованої дії, які дозволяють реалізувати сформульовану ідею (рис. 1). У подальшому заряди споряджались різними ВР, залишаючись конструктивно незмінними за виключенням варіювання пропорцій їх складових.

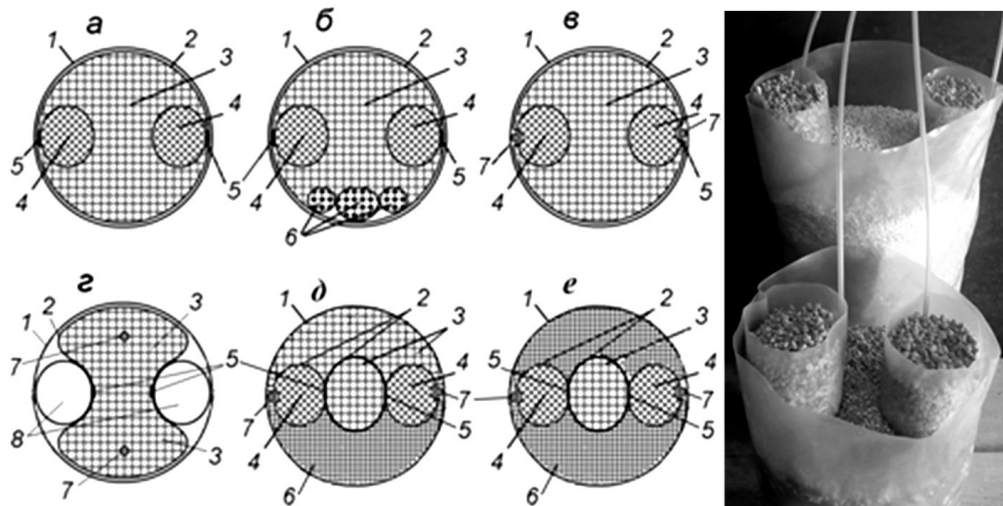


Рис. 1. Поперечний переріз свердловинних зарядів парних рядів:

1 – свердловина; 2 – полімерний рукав; 3 – низькобризантний заряд; 4 – лінійні високобризантні заряди; 5 – місця пропайки рукава; 6 – інертні демпфери; 7 – ДШ; 8 – повітряні утворювачі кумулятивних жолобів; праворуч – натурні зразки

Випробування й упровадження запропонованої технології БПР на кар'єрі «Північний» ГЗК «Укрмеханобр» завершилося в 2017-2018 рр., коли на гор. -100 м кар'єру «Північний» було виконано підривання блоку гор. -90/-100 (рис. 2, 3). При цьому у свердловинах непарних рядів формували заряди з Грануліту КМ масою, що дорівнювала паспортним значенням. В той же час у свердловинах парних рядів застосовували заряди зменшеної маси. За практично однакових результатів вибуху загальне зменшення питомої витрати ВР становить 15-20% за умов застосування нової технології (табл. 1). Якість подрібнення гірських порід у бл. №1 задовольняла умовам виробництва.

Таблиця 1

Результати контрольного випробування технології диференційованого енергонасичення порід на кар'єрі «Північний» «УКРМЕХАНОБР»

Дата вибуху	Горизонт	Витрати ВВ, кг, за:		Підірваної гірничої маси, м ³	Питома витрата ВР кг/м ³ , за:	
		відомою технологією	новою технологією		відомою технологією	новою технологією
26.12.17	-90 м	10590	8400	20350	0,52	0,41
26.12.17	-90 м	10210	7750	20240	0,50	0,38
12.06.18	-100 м	18050	16400	34910	0,52	0,46
Всього:		38850	51060	75500	0,515	0,417

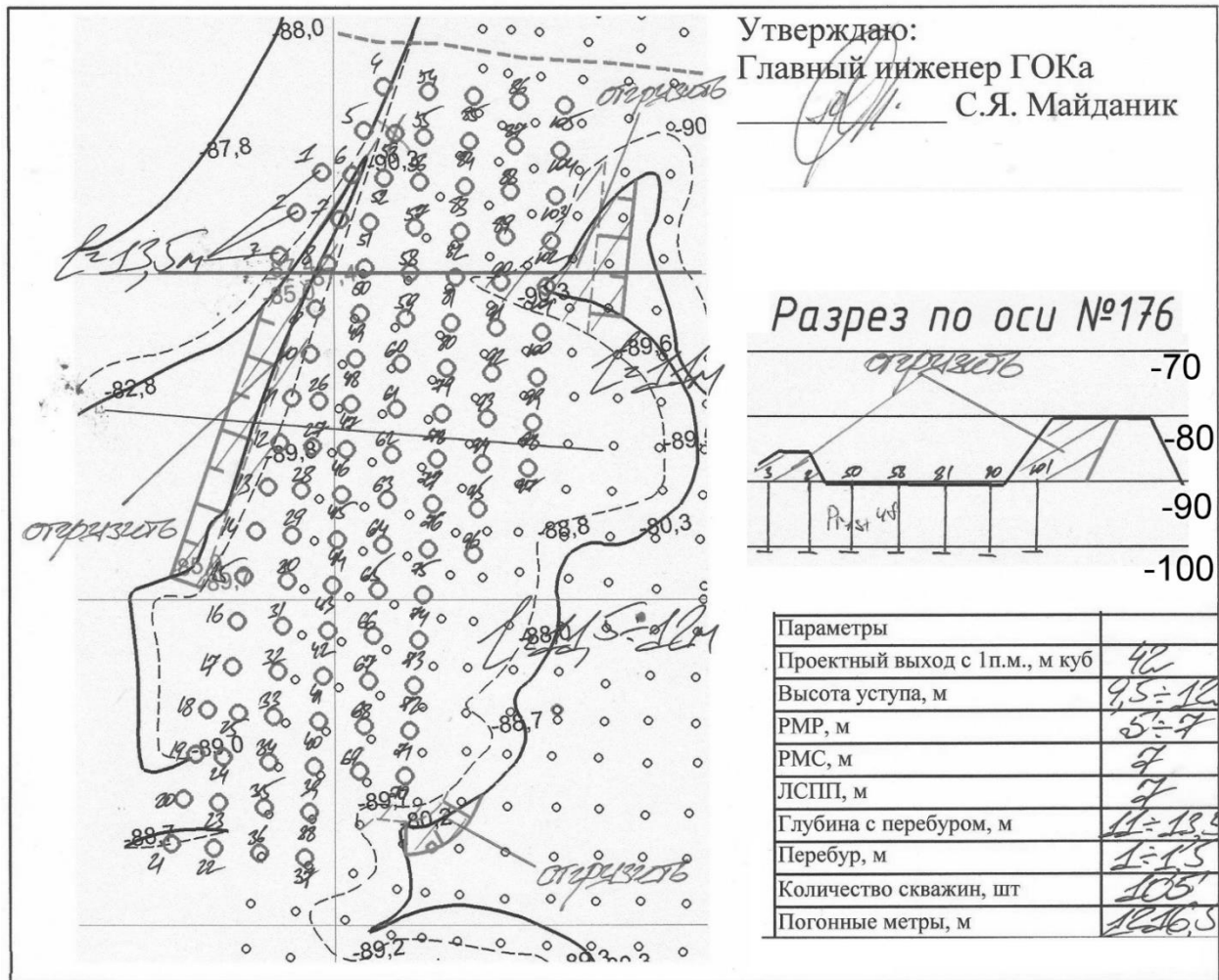


Рис. 2. Проект оббурювання блоку № 1 гор. -90/-100 м кар'єру «Північний»



Рис. 3. Схема монтажу вибухової мережі в блоці № 1 гор. -90/-100 м кар'єру «Північний»

Як відзначалося, дана технологія передбачає випереджаюче знеміцнення породного масиву [3].

Якщо вільна поверхня має форму площини, то рівняння воронки руйнування – овал Кассіні з центром на початку координат. Використовуючи це рівняння, можна отримати формулу для визначення величини порушеності вглиб масиву

$$G = \sqrt{b^2 + W - r_1^2} - W, \quad (1)$$

$$\text{де } b^2 = 2\bar{C}r_1 \sqrt{\frac{\eta g_0 E \rho}{\sigma_s^2 \cdot \ln R}}, \quad \bar{C} = \frac{\sqrt{[(d - r_1)^2 - r_2^2] [(d + r_1)^2 - r_2^2]}}{2d}. \quad (2)$$

Підставляючи значення (2) в формулу (1) і нехтуючи малою величиною, отримуємо вираз для G у вигляді

$$G = \sqrt{\frac{2Wr_1}{\sigma_s}} \cdot \sqrt{\frac{\eta g_0 E \rho}{\ln \frac{2W}{r_1}}} + W^2 + W \quad (3)$$

Як приклад, виконано розрахунок залежностей для різних W , графіки яких зображено на рис. 4.

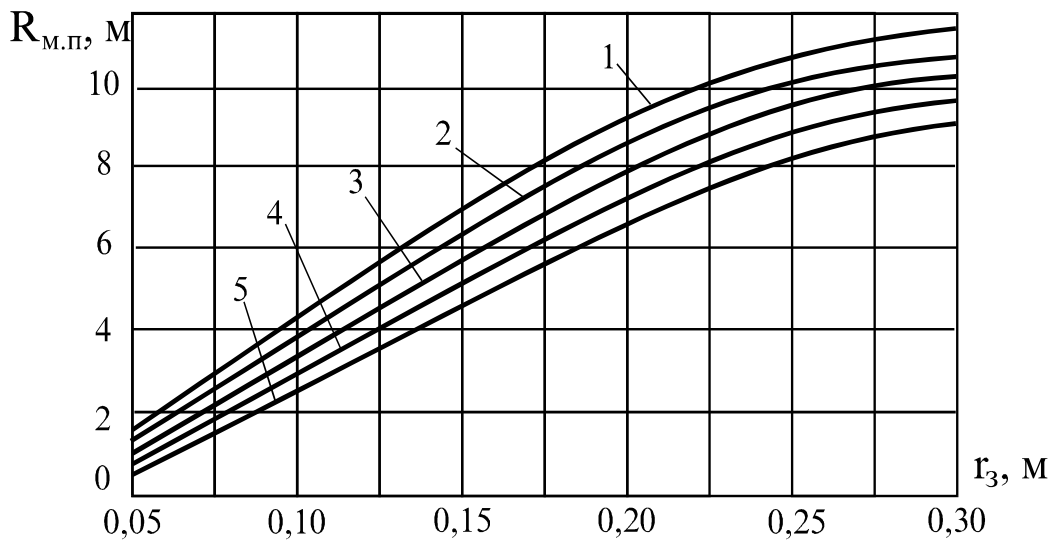


Рис. 4. Глибини зон порушень (м) для постійних значень ЛНО при:
1 — $W=6,0$; 2 — $W=7,0$; 3 — $W=8,0$; 4 — $W=9,0$; 5 — $W=10,0$

З аналізу цих даних випливає, що шукана залежність – близька до лінійної. Зі збільшенням радіуса заряду – різко зростає ступінь і поширення зони порушеності породи вглиб масиву, а з віддаленням заряду від вільної поверхні ця порушеність збільшується, прагнучи до постійної величини.

Отже, зменшити радіус зони порушеності вглиб масиву при підриванні заряду ВР можна шляхом зменшення радіуса заряду і величини ЛНО.

Враховуючи цю обставину, ми пропонуємо оцінювати межу зони, за якою окремі породи в масиві майже не руйнуються, а тому їхній можливий обсяг можна розглядати як відсотковий вихід «негабариту» певної фракції, за розробленою нами раніше методикою [8] (рис. 5).

Таким чином, запропонований теоретико-імовірнісний підхід дозволяє прогнозувати вихід фракції за відомою тріщинуватістю масиву (задається параметром x_0).

Ставлячи крупність шматка $x_1 = 0,1$ м, при різних $n > 1$ і змінному x_0 в межах $0,2 < x_0 < 1,2$, отримуємо прогнозований вихід $R(x_1)\%$ (табл. 2). Відповідні криві наведено на рис. 5.

Таблиця 2

Показники виходу крупних фракцій з масиву

x_0 , м	$R(x_1)$, %		
	$n = 1,1$	$n = 1,2$	$n = 1,5$
0,20	0,28	0,1	0,0013
0,30	2,33	1,44	0,23
0,40	8,46	4,96	1,29
0,50	11,8	10,1	5,9
0,60	17,3	15,8	11,6
0,80	27,9	27,1	24,8
1,00	36,8	36,8	36,8
1,20	42,1	44,8	46,7

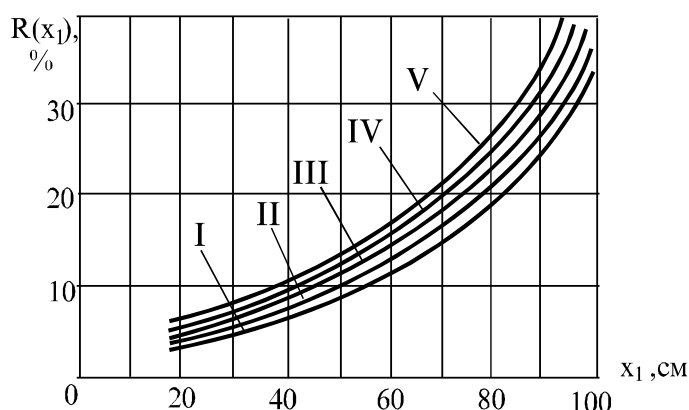


Рис. 5. Графіки залежності $R(x_1)$ від тріщинуватості масиву порід:
 I — $n=1,1$; II — $n=1,2$; III — $n=1,3$; IV — $n=1,4$; V — $n=1,5$

Висновки. З аналізу результатів експериментів слідує наступне:

Запропонований комплекс новацій, які включають розподілення рядів на окремі групи, а в межах груп, свердловин – на серії, зі зменшенням маси зарядів в деяких свердловинах серій, регламентовані сповільнення між зарядами в серіях і поміж серіями зарядів, а також поміж групами рядів – все перераховане узгоджується у взаємодії, забезпечує економію ВР на підривання порід.

Раціональною організацією підривних робіт на уступах висотою 10 м є формування вибухових блоків парною кількістю рядів свердловин, зменшенням маси зарядів у парних рядах, формуванням груп рядів по два в групі, зі взаємопов'язаним підриванням зарядів в кожній групі (для чого вони розподілені на серії по два заряди) і спрямованим їх ініціюванням від зарядів в парних рядах, до зарядів у непарних.

В кристалічних породах з вираженою системною тріщинуватістю при проектуванні БВР необхідно враховувати акустичну анізотропію середовища, що забезпечує додаткові можливості регулювання гранулометричного складу підірваної гірничої маси.

Математична обробка результатів експериментальних вишукувань підтверджує перспективність закладеної в основу дослідження ідеї: удосконалення технології БВР є кардинально новим і реальним за умов створення режиму просторово симетричної роботи зарядів ВР в межах диференційовано напруженого масиву між двома відбиваючими хвилі поверхнями. Це дозволяє більш повно використовувати енергію вибуху на дроблення породи і зменшити витрати ВР, а відтак – підвищити ефективність БВР у цілому.

Перелік посилань

1. Суханов, А.Ф. & Кутузов, Б.Н. (1983). *Разрушение горных пород взрывом*. Москва: Недра.
2. Кутузов, Б.Н. (2009). *Методы ведения взрывных работ*. Москва: Горная книга.
3. Перегудов, В.В. & Жуков, С.А. (2002). *Пути повышения качества взрывных работ при разрушении горных пород сложной структуры*. Монография. Кривой Рог: Издательский дом.
4. Ударно-волновая теория взрывного разрушения. (n.d.). Retrieved from <http://industry-portal24.ru/razrushenie/2738-udarno-volnovaya-teoriya-vzryvnogo-razrusheniya.html>
5. Бротанек, И. & Вода, Й. (1993). *Контурное взрывание в горном деле и строительстве*. Москва: Недра.
6. Друкованый, М.Ф. (1976). *Справочник по буровзрывным работам*. Москва: Недра.
7. Жуков, С.А., Ильин, П.П. & Жержерунов, Ю.И. (1990). Прогнозирование выхода крупных блоков при попутной добыче природного камня. *Разработка рудных месторождений*, 49, 15-17.
8. Жуков, С.А. (1999). *Теоретические аспекты попутной добычи природного камня*. Монография. Кривой Рог: Минерал.

АННОТАЦИЯ

Цель исследований – экспериментальная контрольная проверка эффективности применения и параметрические уточнения структурного влияния среды по технологии разрушения массива скальных горных пород с дифференцированным насыщением энергией последнего в условиях симметричного действия скважинных зарядов; выяснение взаимосвязи при подрыве породных блоков природных и технологических факторов и реализации максимально продуктивного их сочетания, а также проверка степени адекватности алгоритма экспериментальных изысканий.

Методика исследований включает планирование промышленных экспериментов, геомеханический анализ состояния и устойчивости скальных массивов разной высоты и литологии; уточнение процесса распространения упругих волн в кристаллическом среде и их суперпозиции; статистический анализ данных маркшейдерских наблюдений и математические методы обработки результатов экспериментальных и промышленных испытаний.

Исследованы важные для теории и практики взрывных работ особенности формирования и взаимодействия силовых полей от взрыва внутрискважинных зарядов ВВ, которые взрывают замедленно. Суперпозиция упругих волн играет главную роль в разрушении массива горных пород в этих условиях. Подбирая массы зарядов и длительность задержки между взрывами, можно регулировать процесс загрузки массива взрывчатыми веществами в зависимости от конкретных горных и геологических условий взрывных работ. Изменяя способы формирования и порядок взрывания зарядов ВВ в разрушаемом объеме, можно влиять на процесс разрушения, зная особенности формирования силовых полей.

Научная новизна заключается в экспериментальной проверке авторской идеи 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. Дальнейшая разработка и внедрение в производство результатов исследований обеспечит значительное снижение себестоимости железорудной продукции за счет повышения эффективности буровзрывных работ в карьере.

Ключевые слова: *руда, взрывное разрушение, упругие волны, взрывные работы, скважинные заряды.*

ABSTRACT

The purpose of the research is an experimental control verification of the effectiveness of the application and parametric refinement of the structural influence of the surroundings by the technology of destruction of a rock mass with differentiated energy saturation of the latter under conditions of symmetrical action of borehole charges; elucidation of the relationship in the undermining of the rock blocks of natural and technological factors and the implementation of their most productive combination, as well as checking the measure of adequacy of the experimental research algorithm.

The methods of research are an analysis of geomechanical processes by mathematical modeling of the dynamic stresses of a rock mass by an explosion in open pits. The research methodology includes the planning of industrial experiments, geomechanical analysis of the state and stability of rock masses of different heights and lithology; clarification of the process of dissemination of elastic waves in a crystalline medium and their superposition; statistical analysis of surveying data and mathematical methods for processing the results of experimental and industrial tests.

Findings. For the theory and practice of blasting important to know the features of the formation and interaction force fields downhole explosive charge that undermine delayed. The superposition of elastic waves plays a major role in the destruction of the rock mass under these conditions. By selecting the masses of charges and the duration of the delay between the explosions, it is possible to regulate the explosive loading process depending on the specific mining and geological conditions of blasting operations. By changing the methods of forming and ordering the destruction of explosive charges in a destroyed volume, one can influence the process of destruction, knowing the peculiarities of the formation of force fields.

Conclusions. Given the time and geometric characteristics of the rock massif, it can be assumed that its tense state will fully correspond to the physical parameters of the integral zone, in which the superposition of the explosive waves is minimized. The obtained results can be used to develop explosive technologies based on the destruction of a mountain mass, which was previously subjected to a stressed state from explosion of explosive charges, for example, low power.

The originality is consists in the experimental verification of the author's idea of symmetrical blasting of the rock mass, differentially saturated with the explosion, and the analytical substantiation of the parameters of objects and processes for the effective implementation of developments in the production practice of the open pits of mining and processing plants.

Practical implications. Further development and manufacturing application of the research results will provide a significant reduction in the cost price of iron ore products by increasing the efficiency of drilling and blasting operations in open pit.

Keywords: *ore, explosive destruction, elastic waves, blasting, borehole charges.*