

## Determination of the performance of industrial explosives by the degree of realization of the detonation rate

Maksym Kononenko<sup>1\*</sup>, Oleh Khomenko<sup>1</sup>, Ihor Kovalenko<sup>2</sup>, Andrii Kosenko<sup>3</sup>

<sup>1</sup>*Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine*

<sup>2</sup>*Ukrainian State University of Chemical Technology, Dnipro, Ukraine*

<sup>3</sup>*Branch for Physics of Mining Processes of the M.S. Poliakov Institute of Geotechnical Mechanics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Dnipro, Ukraine*

\*Corresponding author: [kononenko.m.m@nmu.one](mailto:kononenko.m.m@nmu.one)

**Abstract.** The article considers the analysis of determining the performance of explosives using experimental methods, namely ballistic pendulum, ballistic mortar, determining the volume of the ground ejection funnel, lead bomb. It is found that determining the performance of emulsion explosives using these methods has a number of significant features associated with their large critical diameter. In turn, this requires conducting experiments with charges of large mass, which will lead to the abandonment of traditional methods of determining the operability. By analyzing the known analytical methods of calculating the coefficient of relative performance of explosives, it is found that for emulsion explosives the determination of relative performance is necessary to be carried out with the help of analytical calculation methods. Analytical methods of determining the performance of explosives established significant discrepancies in the results of the calculation, and for emulsion explosives are generally underestimated, since their breezant action is not taken into account. Therefore, the paper developed a methodology for determining the performance quotient of explosives by the degree of detonation rate, taking into account the main energy and detonation characteristics of explosives: heat and volume of explosion products, density and detonation rate. The proposed analytical methodology for determining the performance factor of explosives allows us to obtain correct results, necessary for the calculation and design of parameters of drilling and blasting operations.

**Keywords:** *iron ore, emulsion explosive, drilling and blasting, performance quotient, energy and detonation characteristics, detonation rate*

## Визначення працездатності промислових вибухових речовин за ступенем реалізації швидкості детонації

Максим Кононенко<sup>1\*</sup>, Олег Хоменко<sup>1</sup>, Ігор Коваленко<sup>2</sup>, Андрій Косенко<sup>3</sup>

<sup>1</sup>*Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна*

<sup>2</sup>*Український державний хіміко-технологічний університет, Дніпро, Україна*

<sup>3</sup>*Відділення фізики гірничих процесів Інституту геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України, Дніпро, Україна*

\*Відповідальний автор: [kononenko.m.m@nmu.one](mailto:kononenko.m.m@nmu.one)

**Анотація.** У статті розглянуто аналіз визначення працездатності вибухових речовин за допомогою експериментальних методів, а саме балістичного маятника, балістичної мортири, визначення об'єму воронки викиду ґрунту, свинцевої бомби. Встановлено, що визначення працездатності емульсійних вибухових речовин за допомогою означених методів має низку вагомих особливостей, які пов'язані з їх великим критичним діаметром. В свою чергу це вимагає проведення експериментів із зарядами великої маси, що призведе до відмови від традиційних методів визначення працездатності. Аналізом відомих аналітичних методів розрахунку коефіцієнта відносної працездатності вибухових речовин встановлено, що для емульсійних вибухових речовин визначення відносної працездатності необхідно проводити за

допомогою аналітичних методів розрахунку. Аналітичними методами визначення працездатності вибухових речовин встановлено значні розбіжності у результатах розрахунку, а для емульсійних вибухових речовин взагалі занижені, оскільки не враховується їх бризантна дія. Тому у роботі розроблено методику визначення коефіцієнта працездатності вибухових речовин за ступенем реалізації швидкості детонації, що враховує основні енергетичні та детонаційні характеристики вибухових речовин: теплоту й об'єм продуктів вибуху, щільність (густину) та швидкість детонації. Запропонована аналітична методика визначення коефіцієнта працездатності вибухових речовин дозволяє отримати коректні результати необхідні для розрахунку і проектування параметрів буропідричних робіт.

**Ключові слова:** залізна руда, емульсійна вибухова речовина, буропідричні роботи, коефіцієнт працездатності, енергетичні та детонаційні характеристики, швидкість детонації

## 1. Вступ

У гірничій справі застосування вибухових речовин (ВР) розпочалося на початку XVII ст. Поштовх до розвитку підричних робіт пов'язують з появою у першій половині та на початку другої половини XIX ст. нових ВР і засобів ініціювання, що в основному обумовлено швидким розвитком гірничодобувної промисловості в світі. На початку XX ст. гірнича справа отримала нову ВР – тринітрололуол (тротил, тол), яка стала наймасовішою ВР. Дотепер гірничорудними підприємствами тротил використовується у вигляді тротиловмісних ВР. Відомо, що після підричних робіт із використанням цих ВР у атмосферу в значних обсягах надходять шкідливі речовини у вигляді оксидів азоту та оксиду вуглецю [1], що завдає істотної шкоди, як здоров'ю людини, так і довкіллю [2]. Тому практично у всьому світі тротил заборонено для використання у промислових цілях. Прямою альтернативою заміщення тротиловмісних ВР слугують аналоги місцевого приготування, до яких відносяться безтротилові ВР та емульсійні вибухові речовини (ЕВР) [3]. Останні є безпечні при транспортуванні [4] й зберіганні [5], екологічно чисті [6] та економічно вигідні [7].

Згідно Цільової регіональної програми переходу гірничо-збагачувальних комбінатів на безтротилові екологічно чисті ВР, яка спільними зусиллями гірничих підприємств Кривого Рогу була розроблена та започаткована у 1999 році, з 2004 року рудні та нерудних кар'єри почали переходити на використання нових безтротилових ВР. І вже у 2011 році використання цих ВР на гірничих підприємствах з відкритим способом розробки досягло 99%. Це призвело до того, що за останні роки в Україні відбулися зміни у техніці та технології виконання підричних робіт, збільшився різновид ВР і виробів на їх основі, у тому числі, що отримані у результаті утилізації боєприпасів і твердого ракетного палива. Особливо зросла номенклатура та збільшився обсяг споживання ВР, що виготовляються з невибухових матеріалів безпосередньо на місці виконання підричних робіт. На деяких гірничодобувних підприємствах побудовані власні виробництва ЕВР із використанням вітчизняних або закордонних технологій та обладнання. Це дозволило суттєво підвищити рівень екологічної безпеки та підняти ефективність ведення підричних робіт у різних гірничо-геологічних умовах. Однак на гірничорудних підприємствах, що видобувають руду підземним способом, в основному використовувалися тротиловмісні ВР [8]. Тому, з 2012 року Цільову регіональну програму переходу гірничодобувних підприємств на безтротилові екологічно чисті ВР почали реалізовувати і для цих гірничих підприємств.

Підземна розробка залізних руд у повному обсязі реалізується буропідричними роботами (БПР) із застосуванням промислових вибухових речовин (ПВР), з яких на сьогодні 58% – це ЕВР. Залежно від того, наскільки вірно будуть розраховані параметри (БПР) можуть змінюватися техніко-економічні показники проведення гірничих виробок [9] і відбивання руди при веденні очисних робіт [10]. На

визначення питомих витрат ВР при проектуванні БПР впливає працездатність обраної ВР. Насамперед це важливо при застосуванні ЕВР, так як їх працездатність залежить від багатьох факторів, особливо від густини заряджання [11].

## 2. Методика проведення досліджень

Розробка методики визначення коефіцієнта працездатності ПВР з урахуванням ступеня реалізації швидкості детонації включала у себе виконання наступних етапів.

1. Аналіз експериментальних методів визначення працездатності ВР;
2. Огляд методів розрахунку коефіцієнта працездатності ВР;
3. Розробка методики розрахунку коефіцієнта відносної працездатності усіх ПВР за ступенем реалізації швидкості детонації.

Аналітична методика визначення коефіцієнта працездатності для всіх ПВР ґрунтується на порівнянні максимально можливої швидкості детонації ВР та її реального значення, отриманого у натурних умовах.

## 3. Результати та обговорення

Аналізом найбільш відомих методик розрахунку параметрів БПР при проведенні гірничих виробок [10] і відбиванні руд [12], встановлено, що у запропонованих розрахункових формулах визначення лінії найменшого опору (ЛНО) шпурових і свердловинних зарядів використовується коефіцієнт відносної працездатності ВР ( $e$ ) [13]. Цей коефіцієнт впливає на визначення питомої витрати та сумарної маси ВР, що необхідно для руйнування певного об'єму масиву. Як відомо, під терміном працездатність ПВР розуміють спроможність ВР виконувати під час вибуху механічну роботу завдяки розширенню газоподібних продуктів вибуху. Також необхідно зазначити, що будь-яка ПВР характеризується деякими параметрами, які інваріантні щодо різноманітних умов вибуху. Такими параметрами є швидкість детонації, щільність заряджання, теплота вибуху, масова швидкість розльоту продуктів вибуху, тиск і питома енергія у точці Чепмена-Жуге. Теоретичний розрахунок цих величин за відомим структурно-хімічним складом ВР неможливий, за виключенням теплоти вибуху. Це пов'язано з малою вивченістю процесів, що швидко протікають у конденсованому середовищі на молекулярному рівні. Тому отримання характеристик ВР, необхідних для вирішення завдань з розрахунку параметрів БПР, можливо тільки за допомогою експериментальних методів визначення працездатності ВР [14] та критеріях її оцінки [13]. На підставі цього, виконаємо аналіз загальновідомих методів визначення працездатності ВР та методик розрахунку їх відносної працездатності.

На сьогодні для експериментальної оцінки працездатності ВР на практиці використовують наступні методи: балістичного маятника, балістичної мортири, визначення об'єму воронки викиду ґрунту, свинцевої бомби (метод Трауця І.) [14]. Аналіз визначення працездатності ВР за допомогою експериментальних методів довів, що дослідження вибухових характеристик ЕВР має низку вагомих особливостей, що пов'язані з їх великим критичним діаметром. Великий критичний діаметр, з одного боку, забезпечує низьку чутливість ЕВР до механічних впливів і, отже, дозволяє широко механізувати їх виготовлення та застосування безпосередньо на місці ведення підірвних робіт. З іншого боку, це вимагає проведення експериментів із зарядами великої маси, що призведе до відмови від традиційних методів визначення працездатності за допомогою методу Трауця І. у свинцевій бомбі, випробування у балістичній мортирі або маятнику. Тому для ЕВР визначення відносної працездатності необхідно проводити за допомогою аналітичних методів розрахунку. Аналіз відомих аналітичних методів розрахунку коефіцієнта відносної працездатності ВР подано у табл. 1.

Таблиця 1. Методи розрахунку коефіцієнта працездатності ВР

Назва методу	Автор	Формула	Чинник			
			Теплота вибуху, кДж/кг	Об'єм продуктів вибуху, л/кг	Щільність (густина) ВР, кг/м <sup>3</sup>	Швидкість детонації ВР, м/с
За теплою вибуху	Запропоновано за іспитами у свинцевій бомбі метод Трауця І. [15]	$e = \frac{Q_E}{Q_{BP}}$	+	-	-	-
За роботою продуктів вибуху	Андреев К.К., Беляев О.Ф. [16]	$e = \frac{A_E}{A_{BP}}$	+	+	-	-
	Кузнецов В.М. [17]					
За відносною руйнівною здатністю ВР	Johansson C., Langefors U. [18]	$e = \frac{1}{s}$	+	+	-	-
	Кузнецов В.М. [18]					
За методом Трауця І.	Афанасенков А.М. [19]	$e = \frac{1}{f}$	+	+	-	-
За потужністю ВР	Пупков В.В., Маслов І.Ю., Сивенков В.І., та ін. [20]	$e = \frac{E_{BP}}{E_E}$	+	-	+	+

Подані у табл. 1 формули розрахунку коефіцієнта працездатності ВР враховують тільки енергію вибуху та газовиділення або потужність ВР, але тоді не враховується об'єм газів вибуху. Однак подрібнення гірських порід не може визначатися тільки роботою розширення продуктів вибуху. Як відомо, частина енергії витрачається на утворення ударної хвилі, яка з віддаленням від заряду переходить у хвилю напружень [21]. Під час вибуху у радіусі дії ударної хвилі утворюється зона стиснення, тобто зона зминання, в якій порода подрібнюється на фракцію менше 1 мм. Тут діє бризантна складова вибуху, яка визначається швидкістю детонації та щільністю ВР. Тому необхідно розробити методику розрахунку коефіцієнта працездатності, яка б враховувала не тільки енергію вибуху та газовиділення, а й бризантну дію ВР, тобто детонаційні характеристики усіх ПВР.

У якості прикладу виконаємо розрахунок коефіцієнтів працездатності усіх ПВР, які використовуються при видобуванні залізних руд шахтами України. Результати розрахунку величини коефіцієнта працездатності ВР за існуючими методами подано у табл. 2.

Таблиця 2. Коефіцієнт працездатності ВР за різними методами

Показники	Амоніт № 6 ЖВ	Грамоніт 79/21	Україніт-П-СА	Україніт-ПП-2	Україніт-АНФО (КМ-1)	АНФО
Вихідні дані для розрахунку						
Щільність (густина), кг/м <sup>3</sup>	1100	1000	1150	1250	850	850
Теплота вибуху, кДж/кг	4316	4291	3900	3100	3800	3800
Об'єм продуктів вибуху, л/кг	895	895	825	840	985	966
Швидкість детонації, м/с	4100	3600	5050	5100	3600	3500
Розрахований коефіцієнт працездатності $e$ за:						
теплотою вибуху	1,00	1,00	1,11	1,39	1,14	1,14
роботою продуктів вибуху	1,00	1,00	1,09	1,19	0,99	1,01
відносною руйнівною здатністю	1,00	1,00	1,09	1,19	0,99	1,01
методом Трауцля І. (Афанасенков А.М.)	1,00	1,00	1,10	1,30	1,07	1,08
потужністю ВР	1,00	0,79	1,16	1,02	0,60	0,58

Аналіз результатів розрахунку коефіцієнта працездатності різних ВР за допомогою існуючих методів, що подано у табл. 2, дозволив зробити наступні висновки:

– коефіцієнт відносної працездатності ВР розрахований за теплою вибуху має більший показник у порівнянні з результатами розрахунку за іншими методами, це вказує на те, що інші методи враховують додаткову дію інших чинників, таких як об'єм продуктів вибуху;

– показники коефіцієнта працездатності ВР, які розраховані за роботою продуктів вибуху та відносною працездатністю, мають однакові величини, що пов'язано з недостатнім врахуванням енергії вибуху, а надлишковим – газовиділення;

– якщо порівняти результати розрахунку коефіцієнта працездатності ВР за методом Трауцля І. (Афанасенков А.М.) з попередніми двома методами, то отримані величини будуть мати трохи збільшені значення, що вказує на надлишкове врахування теплоти вибуху, а недостатнє – газовиділення;

– коефіцієнт працездатності розрахований за потужністю ВР взагалі має менші величини, бо цей метод враховує бризантні характеристики ВР та теплоту вибуху, але не враховує об'єм газів вибуху.

Використання різних типів ВР при проведенні гірничих виробок і відбиванні масиву з різними детонаційними характеристиками обумовлює необхідність

визначення коефіцієнта працездатності щодо еталонної ВР, яким є Амоніт № 6 ЖВ. Але у відомих методах коефіцієнт працездатності визначається за комбінацією різних показників характеристик ВР, що дає значні розбіжності в отриманих результатах розрахунку, а для ЕВР взагалі є заниженими. У зв'язку з цим коефіцієнт працездатності для ПВР пропонується визначати з урахуванням ступеня реалізації швидкості детонації, що дозволить врахувати енергетичні та детонаційні характеристики ВР, такі як, теплота й об'єм газів вибуху, щільність і швидкість детонації ВР. Розрахунок коефіцієнта працездатності ПВР пропонується розраховувати за новою методикою у наступній послідовності визначення параметрів ВР [22]:

- ідеальна швидкість детонації;
- ступень реалізації швидкості детонації;
- теплота вибуху за ступенем реалізації швидкості детонації;
- коефіцієнт працездатності за ступенем реалізації швидкості детонації ВР, тобто за завершенистю хімічної реакції.

Ідеальну швидкість детонації, тобто максимально можливу при заданій щільності (густині) ВР, визначають за формулою, запропонованою китайськими дослідниками [12]

$$D_i = 2641 + 3,231 \cdot \rho \cdot \sqrt{\omega}, \text{ м/с}, \quad (1)$$

де  $\rho$  – щільність (густина) ВР, г/см<sup>3</sup>;  $\omega$  – характеристичний добуток теплоти вибуху на об'єм продуктів вибуху для оцінки ефективності ВР (Бертло М., 1883)

$$\omega = Q_{BP} \cdot V_{ПВ}, \quad (2)$$

$Q_{BP}$  – теплота вибуху ВР, ккал/кг, визначається діленням значення  $Q_{BP}$  в кДж/кг на коефіцієнт 4,19 (механічний еквівалент теплової енергії);  $V_{ПВ}$  – об'єм продуктів вибуху, л/кг.

Ступінь реалізації швидкості детонації, тобто завершенисть хімічної реакції, визначають за виразом

$$\eta_x = \frac{D_e}{D_i} \cdot 100, \%, \quad (3)$$

де  $D_e$  – експериментальна швидкість детонації, м/с.

Теплота вибуху з урахуванням ступеня реалізації швидкості детонації складає

$$Q = \frac{Q_{BP} \cdot \eta_x}{100}, \text{ кДж/кг}, \quad (4)$$

де  $Q_{BP}$  – теплота вибуху 1 кг ВР, кДж/кг.

Коефіцієнт працездатності ВР розраховується за наступним співвідношенням

$$e = \frac{Q_E}{Q_{BP}}, \quad (5)$$

де  $Q_E$  – теплота вибуху 1 кг еталонної ВР (Амоніт № 6 ЖВ) з урахуванням ступеня реалізації швидкості детонації, кДж/кг;  $Q_{BP}$  – теплота вибуху 1 кг прийнятої ВР з урахуванням ступеня реалізації швидкості детонації, кДж/кг.

У якості прикладу розглянемо застосування запропонованої методики для оцінки ступеня реалізації потенційної енергії за швидкістю детонації, тобто за завершенистю хімічної реакції при вибуху сумішевих ВР та ЕВР, які використовуються при видобуванні залізних руд шахтами України. Результати розрахунків за новою методикою енергетичних та детонаційних характеристик різних сумішевих ВР та ЕВР подано у табл. 3.

Таблиця 3. Результати розрахунків енергетичних і детонаційних характеристик різних сумішевих ВР та ЕВР

Показник	Амоніт № 6 ЖВ	Грамоніт 79/21	Україніт-П-СА	Україніт-ПП-2	Україніт-АНФО (КМ-1)	АНФО
Щільність (густина), г/см <sup>3</sup>	1,10	1,00	1,15	1,25	0,85	0,85
Теплота вибуху, ккал/кг	1030	1024	931	740	907	907
Теплота вибуху, кДж/кг	4316	4291	3900	3100	3800	3800
Об'єм продуктів вибуху, л/кг	895	895	825	840	985	966
Експериментальна швидкість детонації, м/с	4100	3600	5050	5100	3600	3500
Ідеальна швидкість детонації, м/с	6053	5270	5897	5825	5237	5212
Ступень реалізації швидкості детонації, %	68	68	86	88	69	67
Теплота вибуху з урахуванням ступеня реалізації швидкості детонації, кДж/кг	2923	2931	3340	2714	2612	2552
Коефіцієнт працездатності ВР	1,00	1,09	0,88	1,08	1,12	1,15

Отримані дані розрахунку енергетичних і детонаційних характеристик сумішевих та ЕВР (табл. 3) дозволило зробити наступний висновок, що ступінь завершеності хімічних реакцій патронуваної Україніт-П-СА та наливної ЕВР Україніт-ПП-2 значно перевершує сумішеві ВР і становлять близько 86 – 88%, у той час, як для сумішевих ВР цей показник коливається у межах 67 – 69%. Відповідно до цього на ці ж величини зменшуються і фактична теплота вибуху. Найбільшою теплотою вибуху, яка наближається до розрахункової мають патронувана і наливна ЕВР типу Україніт. У даному випадку патронувана та наливна ЕВР Україніт-П-СА й Україніт-ПП-2 мають значно більший детонаційний тиск, що дозволяє істотно підвищити інтенсивність подрібнення гірських порід. Як видно із запропонованої методики розрахунку енергетичних і детонаційних характеристик ВР, а також багатьох експериментальних [23] і розрахункових даних [11], що максимальна швидкість детонації та відносна працездатність прийнятої ВР досягається при певній щільності (густині) заряджання. Що стосується величини коефіцієнта працездатності ВР, який розраховано за запропонованою методикою, то його величина враховує основні характеристики ВР: теплоту й об'єм продуктів вибуху, щільність і швидкість детонації. Врахування коефіцієнта працездатності ВР при розрахунку та проектуванні параметрів БПР дозволяє отримати найбільш коректні результати.

#### 4. Висновок

Аналізом існуючих методів визначення роботи вибуху та методик розрахунку працездатності ВР встановлено значні розбіжності у результатах розрахунку, а для ЕВР взагалі занижені, оскільки не враховують їх бризантну дію. Тому було розроблено нову методику розрахунку коефіцієнта працездатності для різних ПВР за ступенем реалізації швидкості детонації. Енергетичні та детонаційні характеристики, що розраховані за цією методикою для сумішевих ВР та ЕВР показали, що ступінь завершеності хімічних реакції ЕВР сягає 86 – 88 % у той час, як для сумішевих ВР цей показник коливається у межах 67 – 69%. Розроблена методика визначення коефіцієнта працездатності ВР враховує основні енергетичні та детонаційні характеристики ВР: теплоту й об'єм продуктів вибуху, щільність (густину) та швидкість детонації, що дозволяє отримати коректні результати для розрахунку і проектування параметрів БПР, як при проведенні гірничих виробок, так і при відбиванні масиву руди.

#### Література

1. Mironova, I., & Borysovs'ka, O. (2014). Defining the parameters of the atmospheric air for iron ore mines. *Progressive Technologies of Coal, Coalbed Methane, and Ores Mining*, 333-339. <http://doi.org/10.1201/b17547-57>
2. Myronova, I. (2016). Prediction of contamination level of the atmosphere at influence zone of iron-ore mine. *Mining Of Mineral Deposits*, 10(2), 64-71. <https://doi.org/10.15407/mining10.02.0064>
3. Kholodenko, T., Ustimenko, Y., Pidkamenna, L., & Pavlychenko, A. (2014). Ecological safety of emulsion explosives use at mining enterprises. *Progressive Technologies of Coal, Coalbed Methane, and Ores Mining*, 255-260. <http://doi.org/10.1201/b17547-45>
4. Lyashenko, V., Vorob'ev, A., Nebohin, V., Vorob'ev, K. (2018). Improving the efficiency of blasting operations in mines with the help of emulsion explosives. *Mining of Mineral Deposits*, 12(1), 95-102. <https://doi.org/10.15407/mining12.01.095>
5. Krysin, R.S., Ishchenko, N.I., Klimenko, V.A., Piven, V.A., & Kuprin, V.P. (2004). Explosive ukrainit-PM-1: Equipment and fabrication technology. *Gornyi Zhurnal*, (8), 32-37.
6. Kholodenko, T., Ustimenko, Y., Pidkamenna, L., & Pavlychenko, A. (2015). Technical, economic and environmental aspects of the use of emulsion explosives by ERA brand in underground and surface mining. *New Developments in Mining Engineering 2015*, 211-219. <http://doi.org/10.1201/b19901-38>
7. Kononenko M., Khomenko O., Myronova I., Kovalenko I. (2022). Economic and environmental aspects of using mining equipment and emulsion explosives for ore mining. *Mining Machines*, 40(2), 88-97. <https://doi.org/10.32056/KOMAG2022.2.4>
8. Kosenko A.V. (2021) Research and substantiation of rational parameters of drilling and blasting operations when using emulsion explosives in underground mining. *Geo-Technical Mechanics*, (158), 33–43. <https://doi.org/10.15407/geotm2021.158.033>
9. Khomenko, O., Kononenko, M., Myronova, I., & Savchenko, M. (2019). Application of the emulsion explosives in the tunnels construction. *E3S Web of Conferences*, 123, 01039. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201912301039>
10. Khomenko, O., Kononenko, M., & Savchenko, M. (2018). Technology of underground mining of ore deposits. <http://doi.org/10.33271/dut.001>
11. Kononenko, M., Khomenko, O., Kovalenko, I., & Savchenko, M. (2021). Control of density and velocity of emulsion explosives detonation for ore breaking. *Naukovi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, (2), 69-75. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2021-2/069>
12. Kononenko, M., Khomenko, O., Savchenko, M., & Kovalenko, I. (2019). Method for calculation of drilling-and-blasting operations parameters for emulsion explosives. *Mining Of Mineral Deposits*, 13(3), 22-30. <https://doi.org/10.33271/mining13.03.022>
13. Кукиб, Б. Н., Иоффе, В. Б., Жученко, Е. И., & Фролов, А. Б. (2007). О критериях оценки относительной работоспособности промышленных взрывчатых веществ. *Горный информационно-аналитический бюллетень*, 6(3), 127-137.
14. Кук М.А. (1980). *Наука о промышленных взрывчатых веществах*. Москва : Недра, 453 с.



15. Угольников, В.К., & Симонов, П.С. (2007). Определение переводных коэффициентов при расчете эквивалентных зарядов дробления. Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова, (4), 14-17.
16. Кузнецов, В.М., & Шацкевич, А.Ф. (1978). О работоспособности взрывчатых веществ. Физика горения и взрыва, 14(2), 120-125.
17. Johansson, C.H., & Langefors, U. (1972). Methods of physical characterization of explosives. In Proc. of the 36th Intern. Congress on Industrial Chemistry. Brussels (Vol. 3, p. 610).
18. Кузнецов, В.М., & Шацкевич, А.Ф. (1983). Параметры источника и эффективность взрыва в грунте. Физика горения и взрыва, (6), 58-65.
19. Афанасенков, А.Н. (2004). О работоспособности взрывчатых веществ. Метод Трауця. Физика горения и взрыва, 40(1), 132-139.
20. Пупков, В.В., Маслов, И.Ю., Сивенков, В.И., Кутьин, Н.Г., & Гаврилов, Н.И. (2005). Некоторые рекомендации по профилактике и предупреждению несчастных случаев при проведении промышленных испытаний новых взрывчатых материалов. Взрывное дело, (95/52), 132-135.
21. Kononenko M., & Khomenko O. (2021). New theory for the rock mass destruction by blasting. Mining of Mineral Deposits, 15(2), 111-123. <https://doi.org/10.33271/mining15.02.111>
22. Kononenko, M., Khomenko, O., & Korobka, Ye. (2021). Parameters of drilling-and-blasting operations for mine workings construction. Fiziko-Tehničeskie Problemy Gornogo Proizvodstva, (23), 54-71. <https://doi.org/10.37101/ftpgp23.01.004>
23. Kozyrev, S.A., Vlasova, E.A., & Sokolov, A. V. (2020). Estimation of factual energetics of emulsion explosives by experimental detonation velocity test data. Gornyi Zhurnal, (9), 47-53. <http://doi.org/10.17580/gzh.2020.09.06>