

## УДОСКОНАЛЕННЯ НАУКОВО-МЕТОДИЧНИХ ПІДХОДІВ ДО ВИБОРУ ВИБУХОВОЇ РЕЧОВИНИ ПІД ЧАС ПІДРИВНИХ РОБІТ НА ГІРНИЧОПРОМИСЛОВИХ КОМПЛЕКСАХ ІЗ ВИРОБНИЦТВА ШЕБЕНЮ

Тверда О.Я., Репін М.В., Ткачук К.К., Радецька О.Й.

Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»  
пр. Перемоги, 37, 03056, м. Київ  
tverdaya@ukr.net, rmv.kpi.iee@gmail.com,  
kkttkk297@gmail.com, sasha7731@gmail.com

Гірничопромислові комплекси з відкритим способом розробки родовищ роблять значний внесок у забруднення навколишнього природного середовища та призводять до зниження екологічної безпеки цілих регіонів. Значну роль у такому забрудненні відіграє процес проведення вибухових робіт. У статті проаналізовано підходи до вибору вибухових речовин за різними технічними характеристиками, запропоновано алгоритм вибору вибухових речовин, що базується на вирішенні оптимізаційної задачі лінійного програмування. *Ключові слова:* вибухова речовина, підривні роботи, оптимізаційна задача.

**Усовершенствование научно-методических подходов к выбору взрывчатых веществ при взрывных работах на горнопромышленных комплексах по производству щебня.** Твердая О.Я., Репин М.В., Ткачук К.К., Радецкая А.И. Горнопромышленные комплексы с открытым способом разработки месторождений вносят значительный вклад в загрязнение окружающей природной среды и приводят к снижению экологической безопасности целых регионов. Значительную роль в таком загрязнении играет процесс проведения взрывных работ. В статье проанализированы подходы к выбору взрывчатых веществ с различными техническими характеристиками, предложен алгоритм выбора взрывчатых веществ, основанный на решении оптимизационной задачи линейного программирования. *Ключевые слова:* взрывчатое вещество, взрывные работы, оптимизационная задача.

**Improvement of scientific and methodological approaches to the selection of explosives in blasting operations at mining complexes for the production of breakstone.** Tverda O., Repin M., Tkachuk K., Radetska O. Mining complexes with an open method of field development make a significant contribution to environmental pollution and lead to a decrease in the environmental safety of entire regions. A significant role in such pollution is played by the process of blasting. The article analyzes the approaches to the selection of explosives with different technical characteristics and proposes an algorithm for the selection of explosives based on the solution of the optimization problem of linear programming. *Key words:* explosive, blasting, optimization problem.

**Постановка проблеми.** Розвиток економіки України значною мірою визначається ефективністю гірничо-металургійного комплексу. Головним процесом видобутку скельних гірських порід є вибухові роботи (далі – ВР), які вирішальним чином впливають на кінцеві результати виробництва щебеневої продукції та її собівартість, стан довкілля і здоров'я людей. Водночас тип ВР є визначальним не тільки для вибору мережі свердловин і якості подрібнення порід, але й для зниження втрат нерудних корисних копалин, пов'язаних із надмірним подрібненням породи під час вибуху [1].

Істотні відмінності мають критерії оцінки ефективності вибуху для гірничих підприємств, які виробляють високоякісний щебінь для дорожнього, промислового і житлового будівництва. Тут потрібно не тільки забезпечити під час вибуху відсутність негабаритів і досягнення заданого середнього розміру шматків, важливо не допустити переподрібнення

породи – гранітів, діабазів, габро. Пилоподібна фракція, що утворюється у ближній зоні вибуху зарядів високобрізантих ВР і часто перевищує 20% загальної гірської маси, є прямою втратою гірничого виробництва [2].

**Актуальність дослідження.** Аналіз досліджень [3–27] показав, що питанням визначення ефективності ВР за різними технічними характеристиками та залежно від їхнього хімічного складу присвячено значну кількість праць. Основним критерієм вибору ВР для проведення підривних робіт (далі – ПР) уважається ефективність вибухового руйнування або якість підірваної гірської маси (гранулометричний склад). Екологічні показники ВР або їхній вплив на навколишнє середовище у процесі вибору ВР здебільшого не враховуються взагалі.

У роботі [28] запропоновано здійснювати вибір ВР за комплексним коефіцієнтом ефективності ВР, який враховує її технічну, економічну та екологічну

ефективності. Однак на практиці реалізувати такий вибір не завжди можливо й економічно доцільно. В.В. Твердим [29] запропоновано використовувати концентрацію шкідливих газів на момент формування пилогазової хмари (далі – ПГХ) під час проведення масового вибуху для характеристики ВР з погляду екологічної безпеки і зіставлення отриманих результатів для виділення менш та більш екологічно безпечних складів ВР. Однак такий підхід не є коректним, оскільки не враховує матеріал забійки та його здатність адсорбувати утворені внаслідок вибуху газу. Більш доцільним та раціональним може бути комплексний підхід до вибору ВР у поєднанні із забійковим матеріалом. Тому питання вибору ВР для вибухового руйнування скельних порід із метою виробництва щебеню, яка б забезпечувала одночасно необхідний гранулометричний склад та високі показники екологічної безпеки, залишається відкритим.

**Метою дослідження** є аналіз наявних підходів до вибору вибухової речовини під час проведення підіривних робіт у гірничопромислових комплексах, розроблення вдосконаленого алгоритму вибору вибухових речовин.

**Виклад основного матеріалу.** Відомо, що у процесі роботи всього устаткування кар'єру утворюється утричі менше газів, ніж під час здійснення одного масового вибуху. У зв'язку із цим оцінювання об'ємів шкідливих газів, що поширюються із ПГХ, їх поширення в атмосфері кар'єру і прилеглої території під час масових вибухів залежно від характеристик ВР набуває особливої актуальності.

Сьогодні основними критеріями екологічної безпечності ВР вважаються висота ПГХ з урахуванням термічної стратифікації атмосфери та її об'єм. Під час розрахунку даних критеріїв беруться до уваги сухоадіабатичний і вертикальний градієнти температури в шарі атмосфери, прискорення вільного падіння, температура ПГХ і навколишнього середовища, стала Кармана, характерний вертикальний масштаб турбулентної пульсації, час після вибуху, швидкість динамічного тертя, швидкість виходу ПД (визначається за формулою Мінделі), швидкість детонації ВР у заряді, довжина забійки, довжина заряду, об'ємна маса забійки, об'ємна маса ВР, коефіцієнт, що враховує взаємодію тіла, що метається, зі стінками висаджуваної породи, ширина та довжина блока, що підривається, кут між напрямком руху повітряного потоку та великою віссю еліпса в перерізі ПГХ.

Оцінку небезпечності ВР для навколишнього середовища можна провести і за кількістю утворених унаслідок масового вибуху шкідливих газів. Однак, на думку автора [29], сама кількість утворених газів не несе інформації щодо дійсного впливу викидів на навколишнє середовище. Тому в роботі [29] запропоновано задатися певним параметром, за допомогою якого можна було б характеризувати ВР з погляду екологічної безпеки, зіставляти отри-

мані результати для виділення менш та більш екологічно безпечних ВР. За такий параметр пропонується використовувати концентрацію шкідливих газів на момент формування ПГХ під час проведення масового вибуху.

Цей показник можна визначити, використовуючи таку формулу [29]:

$$C_{\text{шг}} = \frac{M_{\text{сум}}}{V_{\text{ПГХ}}},$$

де  $C_{\text{шг}}$  – концентрація шкідливого газу у ПГХ на момент її формування (від 60 с до 120 с), мг/м<sup>3</sup>;  $M_{\text{сум}}$  – сумарна маса викиду шкідливого газу, мг;  $V_{\text{ПГХ}}$  – об'єм ПГХ на момент її формування після вибуху, м<sup>3</sup>.

Сумарна маса викиду шкідливого газу:

$$M_{\text{сум}} = m_{\text{шг}} M_{\text{ВРсум}} \cdot 10^{-3},$$

де  $m_{\text{шг}}$  – питомий викид шкідливого газу під час підіривання 1 кг ВР, мг/кг;  $M_{\text{ВРсум}}$  – сумарна маса ВР, що підривається, у процесі масового вибуху, кг.

$$m_{\text{шг}} = v_{\text{шг}} M_{\text{шг}},$$

де  $v_{\text{шг}}$  – кількість шкідливого газу, що виділяється під час вибухового перетворення 1 кг ВР (визначається за рівнянням вибухового перетворення), моль;  $M_{\text{шг}}$  – молярна маса шкідливого газу, г/моль.

Однак такий підхід не є коректним, оскільки не враховує матеріал забійки та його здатність адсорбувати утворені внаслідок вибуху газу. Більш доцільним та раціональним може бути комплексний підхід до вибору ВР у поєднанні із забійковим матеріалом за таким алгоритмом (рис. 1).

На першому етапі здійснюється вибір за коефіцієнтом передачі енергії вибуху в масив, на другому – відбувається, за можливості, коригування хімічного складу ВР без зміни рецептури, на третьому – підбирається відповідний тип забійкового матеріалу, на четвертому етапі – за наявності альтернативних ВР проводиться їх порівняльна оцінка за впливом на довкілля з урахуванням матеріалів забійки, на п'ятому – проводиться оцінка за економічними показниками.

Водночас оцінку впливу ВР на навколишнє середовище пропонується здійснювати за концентрацією шкідливих газів у ПГХ, розрахованою з урахуванням газів, поглинутих забійкою:

$$C_{\text{шг}} = \frac{M_{\text{сум}} - M_{\text{погл.г.}}}{V_{\text{ПГХ}} - V_{\text{погл.г.}}},$$

де  $M_{\text{погл.г.}}$  – маса газів, поглинутих забійкою, кг;  $V_{\text{погл.г.}}$  – об'єм поглинутих забійкою газів, м<sup>3</sup>.

З метою підвищення економічних і водночас екологічних показників гірничопромислових комплексів із виробництва щебеню авторами пропонується реалізувати процес вибору ВР за допомогою вирішення оптимізаційної задачі. Одним із методів вирішення оптимізаційних задач є «симплекс-метод», сутність якого полягає у здійсненні спрямованого перебору допустимих планів у такий спо-

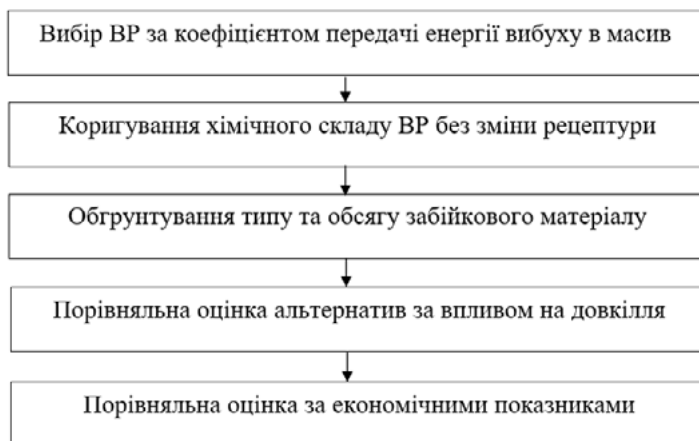


Рис. 1. Алгоритм вибору вибухових речовин

сіб, що на кожному кроці здійснюється перехід від одного опорного плану до наступного, який за значенням цільової функції був би хоча б не гіршим за попередній.

Загалом оптимізаційна задача має такий вигляд:

$$\sum_{j=1}^n c_j \cdot x_j \rightarrow \max,$$

$$\sum_{j=1}^n A_j \cdot x_j = B,$$

де  $x_j \geq 0, j = 1, 2, \dots, n$ ;

$X = (x_1, \dots, x_n)$  – вектор змінних;

$C = (c_1, \dots, c_n)^T$ ;

$B = (b_1, \dots, b_m)^T$ ;

$A_j = (\alpha_1, \dots, \alpha_m)^T$ ;

$n$  – задані вектори;

$T$  – знак транспонування;

$\bar{X} = (\bar{x}_1, \dots, \bar{x}_m)$  – відмінні від нуля компоненти опорного плану.

Загалом алгоритм розв’язування задачі лінійного програмування симплекс-методом складається з п’яти етапів:

1. Визначення початкового опорного плану задачі лінійного програмування.

2. Побудова симплексної таблиці.

3. Перевірка опорного плану на оптимальність за допомогою оцінок. Якщо всі оцінки задовольняють умові оптимальності, то визначений опорний план є оптимальним планом задачі. Якщо хоча б одна з оцінок не задовольняє умові оптимальності, то переходять до нового опорного плану або встановлюють, що оптимального плану задачі не існує.

4. Перехід до нового опорного плану задачі здійснюється визначенням розв’язувального елемента та розрахунками елементів нової симплексної таблиці.

5. Повторення дій, починаючи з етапу 3. Далі ітераційний процес повторюють, доки не буде визначено оптимальний план задачі [30].

У нашому випадку за функцію приймається прибуток підприємства, який залежить від витрат на закупівлю ВР ( $B_{BP}$ ), величини сплати екологічного податку ( $EP$ ) за забруднення атмосферного повітря шкідливими газами, витрат на закупівлю адсорбенту (у забійку свердловини) ( $B_{ad}$ ) та доходу підприємства від продажу щебеню ( $D$ ), який, у свою чергу, залежить від величини коефіцієнта трансформації енергії вибуху в масив ( $\eta$ ).

Функція:

$$D - (B_{BP} + B_{ad} + EP) \rightarrow \max,$$

з обмеженнями:

$$\begin{cases} V_{ad} \leq EP \\ \frac{B_{BP}}{2C_{BP}\rho_{BP}} = \frac{3B_{ad}}{C_{ad}\rho_{ad}}, \\ \frac{EP}{\Pi_z m_z} = \frac{B_{BP}}{C_{BP}} \end{cases}$$

де  $C_{BP}$  – ціна 1 кг ВР, грн;  $\rho_{BP}$  – щільність ВР, кг/м<sup>3</sup>;  $C_{ad}$  – ціна 1 кг адсорбенту для забійки, грн;  $\rho_{ad}$  – щільність адсорбенту, кг/м<sup>3</sup>;  $\Pi_z$  – ставка податку за відповідною забруднюючою речовиною, грн/кг;  $m_z$  – маса шкідливих газів з 1 кг вибухової речовини, кг.

Підставляючи показники кожної з альтернативних ВР та запропонованого забійкового матеріалу, з урахуванням системи обмежень, можна за допомогою симплекс-методу розрахувати очікуваний прибуток за використання кожної ВР. Порівняння величин отриманих прибутків дозволить обрати оптимальну ВР із позиції як економічної ефективності, так і екологічної безпеки.

**Головні висновки.** У статті проведено аналіз наявних підходів до вибору вибухової речовини під час проведення підривних робіт на гірничопромислових комплексах із виробництва щебеню. З метою забезпечення високих економічних та екологічних показників діяльності підприємств запропоновано підхід до вибору ВР на основі рішення оптимізаційної задачі. За критерій оптимізації прийнято прибуток підприємства як функцію, що залежить від доходу підприємства від продажу щебеню, витрат на закупівлю ВР, витрат на закупівлю адсорбенту для забійки свердловин та величини сплати екологічного податку.

## Література

1. Розробка і впровадження емульсійних вибухових речовин на кар'єрах України: монографія / В.П. Купрін та ін. Дніпропетровськ : ДВНЗ УДХТУ, 2012. 243 с.
2. Жученко Е.Н., Елизов О.Н. Современные взрывчатые вещества и технологии их применения. *Записки Горного института*. 2005. Т. 164. С. 97–101.
3. Стрілець О.П. Вплив типу і фізико-хімічних властивостей сенсibilізаторів на вибухові характеристики емульсійної ВР українці. *Вісник КДПУ*. 2006. Вип. 2/2006 (37). Ч. 2. С. 101–103.
4. Ромашко А.М. Опыт использования эмульсионных взрывчатых веществ при отбойке нерудных полезных ископаемых. *Сучасні ресурсоенергозберігаючі технології гірничого виробництва*. 2010. Вип. 2/2010 (6). С. 48–52.
5. Кузьмицкий Я.О., Терещенко А.Ю. Процесс газогенерации эмульсионного взрывчатого вещества «Анемикс» и его влияние на качество дробления породы. *Сучасні ресурсоенергозберігаючі технології гірничого виробництва*. 2012. Вип. 1/2012 (9). С. 58–63.
6. Горинов С.А., Купрін В.П., Савченко Н.В. Выбор химического состава окислительной фазы эмульсионных взрывчатых веществ для отбойки крепких горных пород скважинами уменьшенного диаметра. *Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського*. 2012. Вип. 5/2012 (76). С. 56–60.
7. Устименко Е.Б., Шиман Л.Н., Кириченко А.Л. Особенности свойств ЭВВ для безопасного применения их при взрывных работах. *Вісник КДПУ імені Михайла Остроградського*. 2009. Вип. 2/2009 (55). Ч. 1. С. 86–89.
8. Горинов С.А., Маслов И.Ю., Купрін В.П. Возбуждение детонации в эмульсионных взрывчатых веществах, сенсibilізованных газовыми порами скользящей детонационной волной. *Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського*. 2013. Вип. 5/2013 (82). С. 116–123.
9. Сеницын В.А. Повышение эффективности взрывной подготовки горной массы на карьерах с применением взрывчатых веществ на основе обратных емульсий : автореф. дис. ... канд. техн. наук: 25.00.22. Екатеринбург, 2007. 26 с.
10. Лучко А.І. Результати дослідження параметрів вибухів еталонних і нових промислових сумішевих вибухових речовин місцевого приготування. *Вісник Житомирського державного технологічного університету*. Серія «Технічні науки». 2008. № 3 (46). Т. 1. С. 156–162.
11. Ключко И.И., Манжос Ю.В. Особенности детонации и работоспособности промышленных смесевых взрывчатых веществ. *Сучасні ресурсоенергозберігаючі технології гірничого виробництва*. 2008. Вип. 1/2008 (1). С. 72–78.
12. Щербань В.В., Кривцов Н.В., Козлов С.С. Модель разрушения скальных блочных массивов зарядами из конверсионных взрывчатых материалов. *Сучасні ресурсоенергозберігаючі технології гірничого виробництва*. 2008. Вип. 1/2008 (1). С. 78–85.
13. Калякин С.А., Лабинский К.Н. Теоретические и экспериментальные исследования действия взрыва заряда взрывчатого вещества в горной породе. *Сучасні ресурсоенергозберігаючі технології гірничого виробництва*. 2008. Вип. 2/2008 (2). С. 39–46.
14. Давыдов В.Ю., Дубнов Л.В., Гришкин А.М. Универсальный термодинамический критерий эффективности ВВ. *Физика горения и взрыва*. 1992. № 4. С. 102–107.
15. Воробьев В.В., Долударев В.Н. Теоретический анализ изменения давления продуктов детонации смесового заряда. *Вісник КДПУ імені Михайла Остроградського*. 2009. Вип. 4/2009 (57). Ч. 2. С. 106–110.
16. Чебенко В.Н., Козловская Т.Ф., Комир В.М. Об особенностях изменения параметров детонации при взрывчатых превращениях различных ВВ. *Сучасні ресурсоенергозберігаючі технології гірничого виробництва*. 2009. Вип. 1/2009 (3). С. 7–13.
17. Виноградов Ю.И. Оценка эффективности применения взрывчатых веществ нового поколения. *Сучасні ресурсоенергозберігаючі технології гірничого виробництва*. 2011. Вип. 1/2011 (7). С. 45–50.
18. Пепекин В.И., Губин С.А. О теплоте взрыва промышленных и бризантных взрывчатых веществ. *Физика горения и взрыва*. 2006. № 2. Т. 43. С. 100–107.
19. Афанасенков А.Н. О работоспособности взрывчатых веществ. *Метод Трауцля*. *Физика горения и взрыва*. 2004. № 1. Т. 40. С. 132–139.
20. Афанасенков А.Н., Котова Л.И., Кукиб Б.Н. О работоспособности промышленных взрывчатых веществ. *Физика горения и взрыва*. 2001. № 3. Т. 37. С. 115–125.
21. Воробьев В.Д., Масюкевич А.М., Косьмин И.В. О взаимосвязи давления продуктов взрыва скважинного заряда с направлением разлета кусков породы. *Вісник НТУУ «КПІ»*. Серія «Гірництво». 2002. Вип. 6. С. 80–88.
22. Ключков В.Ф. Критерий выбора промышленных ВВ. *Разработка рудных месторождений*. 1991. Вып. 51. С. 36–39.
23. Маслов И.Ю. Разработка технологии взрывной отбойки обводненных горных пород глубокими скважинами с применением эмульсионных взрывчатых веществ на основе пенополистирола : автореф. дис. ... канд. техн. наук: 25.00.20. Москва, 2013. 23 с.
24. Азаркович А.Е., Шуйфер М.И. Оценка относительной взрывной эффективности различных взрывчатых веществ массивов пород. *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. 1997. № 2. С. 47–51.
25. Жуков С.А., Тищенко С.В. Закономерности формирования силовых полей скважинных зарядов взрывчатых веществ в разрушаемом объеме горных пород. *Сучасні ресурсоенергозберігаючі технології гірничого виробництва*. 2008. Вип. 1/2008 (1). С. 38–44.
26. Туручко І.І., Косьмин І.В. Нові вибухові речовини з регульованою об'ємною концентрацією енергії. *Вісник НТУУ «КПІ»*. Серія «Гірництво». 2001. Вип. 5. С. 52–56.
27. Кушнеров П.И., Панчишин О.В., Панчишин В.Я. Способы оценки эффективности действия промышленных взрывчатых веществ. *Сучасні ресурсоенергозберігаючі технології гірничого виробництва*. 2012. Вип. 1/2012 (9). С. 63–69.
28. Твердая О.Я., Воробьев В.Д. Обоснование критерия выбора безопасного и эффективного типа ВВ при массовых взрывах на карьерах. *Проблеми охорони праці в Україні*. 2012. Вип. 22. С. 56–64.
29. Твердый В.В., Лучко І.А. Визначення впливу підричних робіт на виробничий персонал кар'єра та населення прилеглої території при застосуванні нових сумішевих вибухових речовин. *Проблеми охорони праці в Україні*. 2010. Вип. 19. С. 95–102.
30. Вікі ЦДПУ. URL: <https://wiki.cuspu.edu.ua/index.php> (дата звернення: 25.03.2019).