

## КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ВІДБИВАННЯ ЗАЛІЗНИХ РУД ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНИХ ПАРАМЕТРІВ БУРО-ВИБУХОВИХ РОБІТ ЗА КРИТЕРІЯМИ ЇХ ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ

*С. О. Попов, д. т. н., професор, Криворізький національний університет, [ultrapost\\_2017@ukr.net](mailto:ultrapost_2017@ukr.net), [orcid.org/0000-0003-4874-997X](https://orcid.org/0000-0003-4874-997X),*

*О. В. Романенко, д. т. н., професор, Інгулецький гірничо-збагачувальний комбінат, [alexrom60@ukr.net](mailto:alexrom60@ukr.net), Д. В. Колосовський, аспірант, [kolosovsvski.denis.ua@gmasl.com](mailto:kolosovsvski.denis.ua@gmasl.com), [orcid.org/0000-0002-0550-2021](https://orcid.org/0000-0002-0550-2021), І. В. Ковницька, студентка, А. К. Могіль, студент, Криворізький національний університет*

**Методологія дослідження.** Результати роботи отримані за рахунок застосування методів: аналітичної обробки літературних джерел, кореляційного аналізу даних, економіко-математичного моделювання, алгоритмізації та економічного аналізу процесів.

**Результати.** Проаналізовано існуючі методики визначення параметрів буро-вибухових робіт при відбиванні залізних руд та виявлено їх недоліки. Досліджена найбільш прийнятна методика визначення цих параметрів, визначні економічні аспекти її розрахункових параметрів. Встановлена залежність між коефіцієнтом міцності гірничих порід і величиною лінії найменшого опору, яка є базовим параметром для визначаються результативності процесу відбивання руд і його економічної ефективності. Розроблено підхід комбінаторного економіко-математичного моделювання буро-вибухових робіт і алгоритм пошуку рішень з параметрів буро-вибухових робіт, який дозволяє визначити оптимальну комбінацію їх величин для конкретних гірничо-технічних і економічних умов розробки залізрудних родовищ. Розроблена комп'ютерна система для здійснення економіко-математичного моделювання буро-вибухових робіт і визначення їх оптимальних параметрів при проектуванні процесу відбивання залізних руд.

**Новизна.** Отримана нова формалізована залежність між основною фізико-механічною характеристикою гірських порід і показником (лінія найменшого опору), який регламентує параметри буро-вибухових робіт, які визначають необхідні обсяги виконання необхідних робіт, а також обсяги витрат матеріальних, трудових і фінансових ресурсів для відбивання руди. Вперше розроблено алгоритм пошуку оптимального рішення з параметрів буро-вибухових робіт за критерієм мінімізації собівартості основного продукту гірничодобувних підприємства – залізрудного концентрату за процесом відбивання руди.

**Практична значущість.** На основі результатів виконаних досліджень і теоретичних заклад підходу до оптимізаційного економіко-математичного моделювання процесу відбивання залізних руд розроблена автоматизована система для такого моделювання і практичної параметризації буро-вибухових робіт при підготовки паспортів масових вибухів на залізрудних гірничодобувних підприємствах.

**Ключові слова:** комп'ютерне моделювання, відбивання залізних руд, оптимальні параметри, буро-вибухові роботи, економічна ефективність.

**Постановка проблеми.** На даний час Україна є одним з лідерів у світі за масштабами діяльності залізрудної гірничодобувної промисловості. Ця промисловість виробляє на рік 80,0–87,0 млн. т товарної залізрудної продукції (залізрудного концентрату, окатишів, агломерату, доменної руди),

що складає 9% ВВП України. За продуктивністю виробництва вказаної продукції Україна займає 7 місце у світі серед 52 країн, які мають родовища залізних руд і здійснюють таке виробництво. Біля 60% цієї продукції споживають вітчизняні металургійні підприємства,

40% експортуються у 19 країн світу [1]. За цим залізорудна гірничодобувна промисловість є одним з найбільш крупних джерел надходження до бюджету України вітчизняної та іноземної валют.

Наряду із цим, необхідно відмітити, що подальше функціонування і розвиток цієї промисловості в Україні пов'язане з необхідністю розв'язання ряду серйозних проблем економічного характеру. Однією з найбільш нагальних серед цих проблем є постійне зростання собівартості видобутку руд з підвищенням глибини розробки. Глибина основних кар'єрів в Україні вже досягла 400–500 м, а у найближчі 15–20 років планується її збільшення до 600–700 м. При перевищенні цих глибин розробка стане нерентабельною, якщо до цього не буде прийнято дієвих заходів зі зменшення собівартості видобутку руд.

У плані можливостей зниження цієї собівартості слід звернути особливу увагу на один з найбільш масштабних технологічних процесів розробки, а саме *Відбивання руди* [2]. На даний час цей процес здійснюється *Буро-вибуховим способом* за технологією *Масового вибуху*. Для відбивання руди необхідно виконати цілий комплекс спеціальних видів гірничих робіт під загальною назвою *Буро-вибухові роботи* (БВР). Це технологічно складні, відповідальні, небезпечні і вкрай фінансово витратні роботи. У калькуляції собівартості видобутку руди їх частка досягає 40-50% [3]. До результатів БВР висуваються жорсткі вимоги за їх продуктивністю  $Ar_m$ ; розміром кусків відбитої рудної маси  $dr_m$ ; виходом негабариту  $\eta$ ; собівартістю виконання  $Sr_m$ ; впливом на навколишнє середовище.

Для дотримання цих вимог БВР повинні виконуватись з певними параметрами, які визначаються з врахуванням необхідності забезпечення економічної ефективності відбивання руди, а також цілого ряду обмежень технічного, економічного і екологічного характеру. Таким чином, задача визнання параметрів БВР повинна вирішуватись методом багатокритеріальної економічної оптимізації [4].

Вибір саме оптимальних параметрів БВР є однією з найбільш важливих і склад-

них задач при розробці залізорудних родовищ, яка до кінця так ще і не розв'язана. Сама процедура визначення параметрів БВР виконується при їх проектуванні для підготовки спеціального документу *Паспорту масового вибуху* для кожного добувного блока [5]. Їх розрахунок на даний час здійснюється за певною регламентованою методикою [6]. Вибрати параметри БВР необхідно у стислі терміни проектування масового вибуху [7] і вирішувати цю задачу необхідно постійно адже процес підготовки паспортів масових вибухів йде безперервно для все нових і нових добувних блоків. Масовий вибух на залізорудних кар'єрах здійснюється через кожні 2 тижні з отриманням від 200,0 до 900,0 тис. т відбитої рудної маси.

Крім того, при розробці залізних руд необхідно відбивати і значні обсяги пустих порід для забезпечення доступу до їх покладів. Це є вкрай негативним фактором для економіки розробки, адже для видобутку 1,0 т рудної маси необхідно відбити 0,5–0,8 м<sup>3</sup> пустих порід і з підвищенням глибини розробки цей показник зростає. На глибинах 600–700 м його величина прогнозується до 1,2–1,8 м<sup>3</sup>/т.

Таким чином, розрахунки параметрів БВР необхідно виконувати у оптимізаційному режимі, що на даний час на вітчизняних гірничодобувних підприємствах не здійснюється. Такий режим потребує надто значного обсягу розрахунків і розв'язати цю задачу можна тільки за допомогою оптимізаційних економіко-математичних моделей, які формалізують процес відбивання залізних руд, і їх реалізації у спеціалізованих комп'ютерних системах моделювання БВР, яких для вітчизняних гірничодобувних підприємств ще не розроблено.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** На даний час різними спеціалістами у галузі відбивання руд розроблено багато методик визначення параметрів БВР (включаючи і [6]) та певні системи їх програмної реалізації. Найбільш відомими з цих дослідників є Б. П. Кутузов, Г. А. Воротеляк, Л. І. Барон, О. В. Шапурін, В. Ф. Горбунов, А. А. Шершнєв, В. Н. Клочков, А. В. Коваженков, Е. О. Мінделі, D. Grtgon, A. Esh, V. S. Gird. Ці автори створили певні математичні моделі для визначення параметрів БВР [2, 6] і відповідні

програмні засоби [8], але вони мають ряд недоліків, а саме: розрахунки за ними здійснюються не у оптимізаційному режимі, а лише за регламентованими параметрами які характеризують гірничотехнічні умови виконання БВР і наявних на підприємстві методів, машин, обладнання, матеріалів для відбивання руди, тобто вони не реалізують повномасштабний варіаційний пошук за всіма принципово можливими варіантами рішень з параметрів БВР. Багато з цих методик і програмних засобів загалом не враховують економічні умови здійснення відбивання, а їх економічні результати розраховуються не проєктним відділом, а планово-економічним, як пострафактум здійснення масового вибуху.

**Формулювання мети статті.** Відповідно до викладеного вище авторами поставлена задача розробки автоматизованої системи визначення оптимальних параметрів БВР за технічними і економічними критеріями їх оптимальності для гірничотехнічних і економічних умов функціонування залізородних гірничодобувних підприємств України.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Для вирішення поставленої задачі авторами були виконані відповідні дослідження і розроблена вказана автоматизована система для реалізації цієї методики. І цій системі використаний комбінаторний підхід [9] для пошуку і визначення оптимальних рішень. Вона включає три взаємопов'язані модулі – модуль формування комбінацій конкурентоспроможних рішень з параметрів БВР, модуль з визначення технічних результатів виконання БВР з цими параметрами; модуль визначення економічних результатів БВР за кожним сформованим варіантом рішень і вибору з них оптимального варіанта. Загальні відомості про ці розробки, викладені далі.

*1. Формування конкурентоспроможних варіантів рішень з параметрів БВР.* У технології відбивання залізних руд буро-вибуховим способом є багато факторів, які впливають на їх технічні і економічні результати. Але, серед них найбільш вагомими є два, а саме: діаметр заряду  $d_z$  (фактично це діаметр вибухових свердловин) [10] і вид *Вибухової речовини* (ВР), для заряджання свердловин, кожна з ВР має свою характеристику, яка відображає ступінь їх руйнівної дії – *Роботоздатність Авр* [11]. Ці пара-

метри є незалежними між собою і з їх величин можна формувати комбінації без певних обмежень з їх поєднання. Однак, при різних комбінаціях їх величини будуть отримані і різні технічні та економічні результати виконання БВР.

За цим, визначення оптимальної комбінації значень цих параметрів можна здійснити методом порівняльної оцінки альтернативних варіантів [12] на основі варіаційного економіко-математичного моделювання відбивання руди з встановленням прогнозних техніко-економічних результатів БВР. До параметрів, які характеризують ці результати відносяться: обсяг відбитої рудної маси у заданий термін; обсяги виконання робіт всіх видів, що входять до комплексу БВР; обсяги витрат матеріальних, трудових, енергетичних ресурсів, амортизаційні відрахування обладнання.

*2. Визначення параметрів БВР за гірничотехнічними умовами їх виконання.* Визначити прогнозні значення економічних результатів БВР на етапі проєктування масового вибуху можна шляхом математичного моделювання відбивання руди з конкретними значеннями комбінацій вказаних параметрів. При цьому слід враховувати, що величини цих параметрів є одним з базових факторів формування економічних результатів БВР, що буде розглянуто далі.

Для виконання цього моделювання авторами у модулі розрахунку технічних параметрів БВР використана методика розрахунку, розроблена проф. Ю. П. Капленком [13], яка певним чином удосконалена авторами і адаптована до варіаційного пошуку оптимального рішення на основі критеріїв економічної ефективності відбивання руди.

Розглянемо суть цієї методики з урахуванням їх економічного аспекту, чого не було зроблено її автором. За цією методикою параметри БВР при відбиванні гірських порід визначаються на основі положення про рівність між опором масиву порід руйнуванню вибухом і енергетичними затратами на подолання цього опору при досягненні необхідного ступеню дезінтеграції масиву [14].

Головним показником, який характеризує спроможність породи протидіяти руйнуванню є Показник підриваємості пороли  $S_0$ , суть якого і економічний сенс детально ми

поснемо далі. Енергетичні затрати на руйнування гірських порід визначаються показником *Питомі витрати вибухової речовини  $q_{вр}$* , тобто витрати ВР на руйнування 1,0 т породи, для досягнення певного розміру її кусків. Слід зауважити, що цей показник є одним базових у формуванні економічних результатів відбивання руди, адже від нього прямо залежить загальний обсяг витрати ВР на здійснення масового вибуху.

Найважливішим параметром, який характеризує масштаб руйнування порід вибухом є так звана *Лінія найменшого опору (ЛНО)  $W$* , від величини якої залежить значення  *$q_{вр}$* . Зв'язок між  $W$  і  *$q_{вр}$*  визначається таким чинниками. Величина параметра  $W$  формується за результатами підривання заряду ВР обсягом  $Q_{вр}$ , розташованого на визначеній глибині  $h$  у масиві породи з об'ємною вагою  $\gamma$ .

При вибуху заряду руйнування масиву відбувається не хаотично, а за певними закономірностями, результатом дії яких є утворення фігури руйнування у вигляді *Воронки викиду*. Ця воронка має такі параметри: висота  $h$  (дорівнює глибині розташування заряду); радіус  $R$  у основі воронки; кут у вершині воронки (растрі)  $\alpha$ .

При різній величині заглиблення заряду  $h$  при одному і тому ж обсягу ВР  $Q_{вр}$  відбуваються вибухи різних вдів, які оцінюються за геометричними параметрами воронки, а саме: камуфлетний вибух  $R=0, \alpha=0^\circ$  (фігура руйнування локалізується у надрах, воронки не утворюється); вибух на розпушення  $h \geq R, 0 < \alpha \leq 90^\circ$ ; вибух на викид  $h < R, \alpha > 90^\circ$ . Об'єм воронки  $V_v$  і відповідно вагу відбитої гірської маси можна розрахувати так  $Q_{рм} = V_v \gamma = 0,33\pi h R^2 \gamma$  або  $Q_{рм} = 0,33\pi (h \operatorname{tg} 0,5\alpha)^2 \gamma$ .

Всі ці види вибухів мають певні застосування у гірничій справі, але нас буде інтересувати тільки один їх вид, а саме – вибух на розпушення при таких параметрах воронки викиду  $h=R, \alpha=90^\circ$ . Специфіка цих параметрів полягає у тому, що тільки при таких їх величинах досягається найвища економічна ефективність вибуху, тобто досягається оптимум виду  $Q_{вр}/Q_{рм} = \min$ , а розмір середнього діаметра куска відбитої породи  $d_{рм}$ , дорівнює розміру кондиційного куска 400-600 мм. При таких параметрах вибуху

утворюється так звана *Воронка нормального викиду*, а глибина  $h$  і називається ЛНО та позначається символом  $W$ , тобто у даному разі має місце рівняння  $h=R=W$ . За цим, вагу зруйнованої породи у воронці нормального викиду можна розрахувати так:  $Q_{рм} = 1,0362\gamma W^3$ .

Для того щоб отримати такі результати вибуху у конкретних умовах відбивання руди необхідно точно визначити, вибух самої якої потужності  $P$  необхідно здійснити у цих умовах, щоб за його результатами отримати воронку нормального викиду? Це можна визначити з такого виразу:

$$W/d_3 = C_0 \quad (1)$$

де  $d_3$  – діаметр заряду, умовно вважається, що це еквівалент руйнівної дії вибуху за обсягом ВР у колонковому заряді цього діаметра при певному виді застосованої ВР, тобто це еквівалент потужності вибуху  $P$ ;  $C_0$  – показник підриваємості породи – фізико-механічна характеристика, що визначає величину опору породи руйнівній дії вибуху.

Величина  $C_0$  є параметром розрахунковим і залежить від іншої механічної характеристики – коефіцієнта міцності породи  $f$  за класифікацією гірських порід проф. М. М. Протод'яконовим [15].

За результатами виконаного авторами кореляційного аналізу практичних даних з джерела [13] величину  $C_0$  можна розрахувати з точністю до 3% з поліному такого виду:

$$C_0 = \frac{K_1}{f^4} - \frac{K_2}{f^3} + K_3 f^2 - K_4 f + 70,96 \quad (2)$$

де  $K_1=0,0016$ ;  $K_2=0,0832$ ;  $K_3=1,5523$ ;  $K_4=13,056$ .

Величина  $C_0$  є специфічною для кожного виду породи за її мінералогічним складом і морфологією, тобто  $C_0 = \text{const}$  і для конкретної породи.

Таким чином тепер з формули (1) можна визначити, на яку глибину у масиві породи з конкретною величиною  $C_0$  необхідно розташувати заряд ВР з потужністю вибуху, яка визначається величиною  $d_3$ , щоб отримати воронку нормального викиду з висотою і радіусом  $W$ . Це забезпечить отримання рудної маси у обсязі  $Q_{рм}$  при витраті ВР у обсязі  $Q_{вр}$  при оптимальному відношенні між ними  $Q_{вр}/Q_{рм} = \min$  для даних

умов.

Тепер розглянемо більш детально параметр  $dз$ . Його величина, у прийнятій інтерпретації, залежить від двох параметрів: обсягу ВР  $Q_{вр}$  у заряді; виду ВР. Це є важливим у економічному плані за тим, що різні види ВР забезпечують різну потужність вибуху і мають різну ціну, яка відрізняється у різних ВР аж у 7 разів. Обсяг ВР  $Q_{вр}$  визначає: величину  $q_{вр} = Q_{вр} / Q_{рм}$ , де  $Q_{рм} = f(W)$ ; величину фінансових затрат на закупівлю цього обсягу ВР, а також виконання певного обсягу різних видів робіт комплексу БВР, для його розміщення ВР у масиві (обсягів робіт буріння свердловин, їх заряджання з формуванням зарядів спеціальних конструкцій, комутація сіті ініціювання вибуху).

Для визначення необхідного обсягу ВР конкретного виду для здійснення вибуху нормального викиду застосовують такий метод. Руйнівна дія вибуху, головним чином визначається його потужністю  $P$ , але і ще комплексом інших характеристик, які є різними у різних ВР (швидкість детонації  $Vd = 2000-8000$  м/с; обсяг виділення вибухових газів  $Q_г = 20-70$  м<sup>3</sup> на 1,0 кг ВР; температура вибуху  $t = 200-700$ °C). В їх комплексі руйнівна спроможність ВР оцінюється за так званим показником *Роботоздатність ВР*

$$\begin{aligned} W &= KC_0 d_{np}; \quad a = 0,02(C_0 + 20)W; \\ q_{вр} &= K_n (0,25\pi d_{np}^2 \rho_{вр}) / aW\gamma_p, \\ d_{ср} &= 0,04 \exp(-0,066 d_{np} n^{0,42}) f^{(1,04-0,1q_{вр})} \\ \eta &= 100 \left\{ 1 - \exp \left[ -\varepsilon \left( \frac{d_{ср}}{d_{к}} - 0,2 + \left| \frac{d_{ср}}{d_{к}} - 0,2 \right| \right)^\beta \right] \right\} \end{aligned} \quad (4)$$

де  $K$  – коефіцієнт, що враховує вплив на величину  $W$  певних умов відбивання руди окрім  $f$  і  $A_{вр}$ , дол.од.;  $a$  – відстань між зарядами (свердловинами у масиві), за якою утворюється сітка свердловин у добувному блоці, м;  $K_n$  – коефіцієнт недозаряду свердловини, част.од.;  $\gamma_p$  – об'ємна вага руди, т/м<sup>3</sup>;  $\varepsilon, \beta$  – емпіричні коефіцієнти, які залежать від прийнятого розміру кондиційного куска  $\varepsilon = 9,11 d_{к} \exp(-11,1 d_{к}), \beta = 1,2 + 1,5 d_{к}$ .

З отриманих величин базових параметрів БВР розраховується цілий комплекс технологічних параметрів БВР і їх економічні

*Авр*. Величина *Авр* для кожного їх виду визначається на заводі виробнику методом проби Трауцля. Для того щоб можна було вибрати конкретний вид ВР з їх великого асортименту для конкретних умов використовується *Метод еталону Авр*, тобто співставлення руйнівної дії конкретної ВР з величиною цього параметра  $A_e$  у ВР, взятої за еталон (*Амоніт №6 ЖВ*). Руйнівну дію еталонного ВР з відомою величиною  $A_e$  визначають експериментальним шляхом, а потім за певною функцією розраховують величину так званого *Приведеного діаметра заряду  $d_{np}$* , яка визначає відмінності у руйнівній дії різних ВР. Розраховується величина  $d_{np}$  за такою формулою:

$$d_{np} = d_e (A_{вр} / A_e)^{0,33} \cdot (\rho_{вр} / \rho_e)^{0,5}, \quad (3)$$

де  $\rho_{вр}, \rho_e$  щільність заряджання застосованої ВР і еталонної;  $d_e$  – діаметр колонкового заряду еталонної ВР.

Саме діаметр  $d_{np}$  приймається за еквівалент потужності вибуху ВР відмінної від еталонної ВР. За цим, з визначеної  $C_0$  розраховуються всі базові параметри БВР і технічні та економічні результати відбивання руди.

результати, що описано далі.

3. *Методичний підхід до визначення оптимальних параметрів процесу за критеріями забезпечення його економічної ефективності.* Кількість комбінацій, які можуть утворювати величини  $dз$  і *Авр* при розрахунку за вище описаною методикою параметрів БВР є значною. Наприклад, на даний час промисловість випускає 42 типорозміри бурових доліт [16], видів ВР налічується 50 [11]. Таким чином при вирішенні цієї задачі необхідно розрахувати, проаналізувати і визначити прогнози економічні результати

[17] використання 2100 варіантів їх комбінацій. Зрозуміло, що вирішити таку задачу можна тільки при використанні комп'ютерної техніки і програмного забезпечення.

Розв'язання вказаної задачі ускладняється ще й тим, що між параметрами технічних рішень і економічними результатами їх застосування відсутній жорсткий функціональний зв'язок. Так, наприклад, різні види ВР окрім неоднакової величини  $A_{вр}$  мають і різну ціну  $C_{вр}$ . При цьому, між  $A_{вр}$  і  $C_{вр}$  має місце зв'язок, який носить характер тренду (загальної тенденції), а не точної функціональної залежності. Це призводить до ситуації, коли, наприклад, застосування ВР з більшою  $A_{вр}$  і вищою  $C_{вр}$  зовсім не означає, що зростання ціни буде супроводжуватись і пропорційним або випереджаючим зростанням величин  $V_{вр}$ , а може бути і зовсім навпаки. Тобто, економічний ефект від результату застосування більш потужної ВР може не перевищити обсягу фінансових витрат його придбання. Відповідно, заміна ВР з одного виду на інший з більшим значенням  $A_{вр}$ , ще не є гарантією отримання позитивного економічного ефекту у конкретних умовах. Крім того, необхідно враховувати і тендерний характер закупівель ресурсів для виконання БВР, у тому числі і ВР. Ціни на них можуть бути договірними і варіюватись у дуже великих межах. Відповідно і закупівельні ціни не сильно пов'язані з руйнівними характеристиками ВР, хоча загальна тенденція (тренд) має місце. Все це відноситься і до інших елементів та засобів виконання БВР. Встановити конкретні економічні результати відбивання руди за таких умов можна тільки шляхом економіко-математичного моделювання (ЕММ) кожного конкретного рішення з виконання БВР, з яких необхідно вибрати проектне рішення за певними критеріями економічної ефективності руйнування руди вибухом. На основі викладеної теорії з вибору оптимальних проектних рішень виконання БВР автори розробили алгоритм пошуку оптимальних рішень з виконання БВР за підходом, описаним вище. Спрощена блок-схема роботи цієї системи наведена на рис. 1.

Послідовність дій за цим алгоритмом полягає у наступному. Першим кроком алгоритму (блок 1) є введення даних про гірничотехнічні і економічні умови відбивання руди

у конкретному добувному блоці і запуск програми виконання. Далі всі дії програми виконуються автоматично. За введеними даними система зчитує із баз даних БД1 (блок 2) інформацію про характеристики бурових доліт (Д) і з БД2 (3) і дані про характеристики видів ВР (В). З цих даних формуються перша комбінація рішень Д1В1. Після цього послідовно (блоки 4, 5, 6, 7) виконується розрахунок величин базових параметрів БВР, тобто величин  $W, a, q_{вр}, \eta$ . На основі цих даних розраховуються інші похідні параметри БВР (8) технологічного і технічного характеру для даного варіанта комбінації рішень Д1В1.

Наступним кроком є виконання ЕММ (9) для даної комбінації величин параметрів Д і В, за яким визначаються прогнозні обсяги всіх видів БВР, розраховується необхідна кількість засобів механізації і обладнання за необхідними обсягами виконання БВР, визначаються амортизаційні відрахування, розраховуються витрати виробничих ресурсів на виконання БВР, обсяги витрат фінансових коштів і очікувана собівартість  $C_k$  залізородного концентрату (як головного видку залізородної продукції), та обсяг його отримання  $Q_k$  з обсягу відбитої рудної маси  $Q_k$ . Визначається  $C_k$  з такої функції:

$$C_k = \frac{3_{oi} + E3_{ki} + \sum_{j=1}^N K_{ji} B_{ji}}{0,01 Q_{рм} C_{Фек} / C_{Феji}}, \quad (5)$$

де  $3_{oi}$  – обсяг оборотних фінансових коштів, необхідний для виконання БВР у конкретному добувному блоці при даному варіанті комбінації параметрів Д і В;  $3_{ki}$  – обсяг капітальних вкладень у виконання БВР, як що для їх здійснення необхідний певний обсяг гірничокапітальних робіт (проведення капітальних виробок, комунікаційних об'єктів, зведення капітальних будівельних споруд тощо);  $E$  – прийнята на даному гірничодобувному підприємстві величина коефіцієнта ефективності капітальних вкладень;  $B_{ji}$  – вартість засобів механізації робіт і обладнання  $j$ , які будуть задіяні для виконання БВР у даному добувному блоці при даній комбінації параметрів  $D_j$  і  $V_j$ , при різних величинах  $D_j$  і  $V_j$ , їх види і вартість можуть бути різними і мати різну ціну;  $K_{ji}$  – норми амортизації різних видів машин і технологічного обладнання, прийняті на підприєм-

стві;  $Q_{рмі}$  – вага відбитої рудної маси при даній комбінації значень параметрів  $D_j V_j i$ , тис.т;  $C_{Fек}$  – необхідна якість концентрату

(вміст металу), %;  $C_{Fеj}$  – отримання якості рудної маси після її відбивання, %.

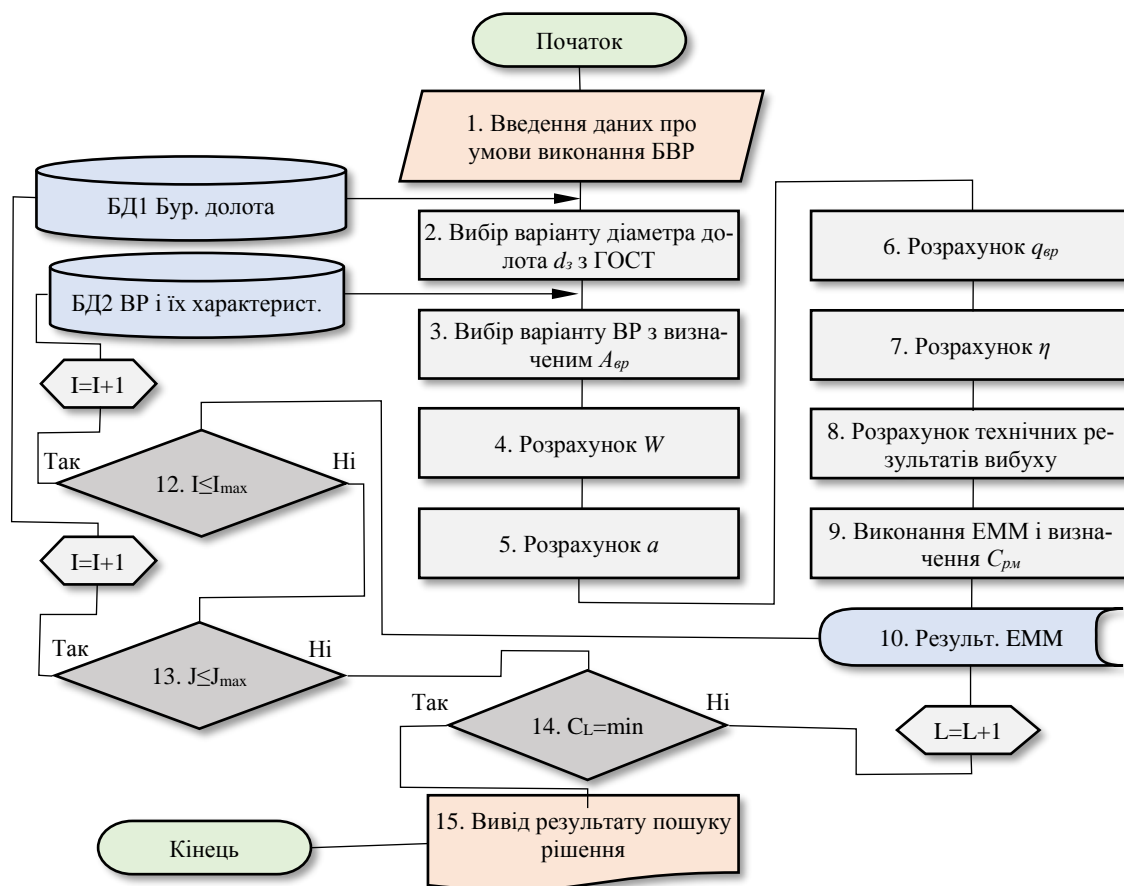


Рис. 1. Блок-схема алгоритму пошуку оптимального рішення з параметрів БВР

Необхідно зауважити, що величина  $Q_{рмі}$  і  $C_{Fеi}$  при відбиванні руди суттєво впливають на прогнозну собівартість залізородного концентрату у зв'язку із такими обставинами. При здійсненні масового вибуху завжди виникають неминучі втрати руди, до 5–6% від обсягу запасу добувального блока. Тобто, в результаті відбивання отримується рудної маси менше за її запас у блоці. У той же час обсяг фінансових витрат на відпрацювання запасу у блоці розраховується виходячи необхідного обсягу гірничих робіт для підготовки і виймання всього його запасу, адже втрати руди не є цілеспрямованими, а у своїй значній частині вони носять стохастичний характер, але прогнозовані.

Це відповідно збільшує собівартість виймання рудної маси і як наслідок збільшує собівартість концентрату. Ще одним негативним фактором для економіки розробки є

те, що при відбиванні руди виникає засмічення рудної маси пустими породами, до 3–5%. Це зменшує концентрацію заліза у рудній масі, що потребує додаткових фінансових витрат на вилучення гематиту і приводить до підвищення собівартості концентрату. Все це враховує економіко-математична модель, яка розроблена авторами.

Результати розрахунків технічних параметрів БВР і результатів ЕММ у послідовності їх отримання запам'ятовуються у оперативній пам'яті комп'ютера (10). Після цього починається формування наступного варіанту комбінації рішень Д1В2. Це виконують блоки 12, 13 і цикл всіх описаних розрахунків повторюється (2–13). Такі розрахунки продовжуються до тих пір, поки блоки (12, 13) визначать, що всі варіанти комбінацій  $D_n V_n$  вичерпано, тобто досягнуто Д42В50.

За результатами комбінаторних розрахунків здійснюється визначення комбінації



$D_i V_i$ , яка відповідає умові мінімальної собівартості залізородного концентрату за процесом відбивання руди  $S_k = \min$ , його визначення здійснює блок 14.

Після встановлення оптимального рішення, результати вибору і всі розраховані параметри БВР та економічні результати відбивання руди за цим рішенням, роздруковуються (блок 15) для підготовки паспорту масового вибуху. На цьому система завершує роботу.

Описана автоматизована система пройшла цикл лабораторних випробувань і на даний час проводяться роботи з її випробувань у промислових умовах та адаптації до відбивання залізних руд в умовах конкретних кар'єрів, які мають свої специфічні особливості.

Подальшим напрямом досліджень і розробок авторів стосовно розвитку цієї системи є її адаптація до умов виконання БВР при відбиванні запасів некондиційних руд, які за своїми якісними характеристиками відповідають вимогам до промислових запасів, але за специфікою залягання їх покладів відносяться до категорії *Некондиційні руди*. При видобутку цього виду руд виникають суттєві проблеми із собівартістю їх відбивання. Для мінімізації цієї собівартості необхідна особливо ретельна оптимізація параметрів БВР.

**Висновки.** За результатами виконаної роботи можна зробити такі висновки:

1. Одним з найбільш відповідальних і масштабних технологічних процесів при розробці залізородних родовищ є відбивання руди. На даний час цей процес здійснюється буро-вибуховим способом методом масового вибуху. Для його здійснення необхідно виконати значний за обсягами комплекс буро-вибухових робіт різних видів. Виконання БВР є технологічно складним, небезпечним, відповідальним процесом і до його результатів ставляться жорсткі вимоги. Необхідність дотримання цих вимог потребує виконання БВР з певними параметрами, відповідно до яких вибирається: технологія, засоби механізації, обладнання, матеріали і організовується їх виконання та забезпечення. Це ж визначає економічні результати і ефективність виконання БВР.

2. Обсяг фінансових витрат на відбивання руди, які постійно зростають з підвищенням глибини розробки, залежить від конкретних гірничотехнічних умов її здійснення, технологічних, технічних та параметричних рішень з виконання БВР.

3. Суттєво знизити фінансові витрати на здійснення відбивання руди можна шляхом вибору таких рішень з параметрів БВР, які за їх характеристиками і впливом на технічні і економічні результати відбивання у найбільш повній мірі відповідають конкретним умовам розробки, які є різними у різних добувних блоках навіть у межах одного кар'єру. Це, у свою чергу, визначається обґрунтованістю рішень з виконання БВР за обладнанням, матеріалами і обсягами їх витрат.

4. За вище викладеним авторами були проведені дослідження і за їх результатами удосконалена методика визначення параметрів БВР у плані підвищення точності розрахунків і визначення їх економічних результатів та розроблена комп'ютерна система вибору параметрів БВР, яка для конкретних умов відбивання руд дозволяє визначити їх оптимальні значення.

5. Розроблена система реалізує пошуковий метод визначення оптимальних параметрів БВР. В ній застосований комбінаторний підхід до визначення оптимального рішення шляхом виконання варіаційного економіко-математичного моделювання БВР при формуванні комбінацій величин їх параметрів і прогнозування технічних і економічних результатів виконання. З накопленої сукупності результатів моделювання визначається оптимальна комбінація значень параметрів БВР за мінімізацією собівартості залізородного концентрату.

6. Розроблена автоматизована система пройшла цикл лабораторних випробувань і на даний час проводяться роботи з її промислових випробувань з адаптацією до умов відбивання залізних руд на конкретних кар'єрах гірничодобувних підприємств.

7. Напрямок подальших робіт за даною розробкою полягає у адаптації розробленої автоматизованої системи до умов відбивання некондиційних залізних руд, які мають специфічні умови залягання і параметри покладів.



## Література

1. Попов С. О. Стан і перспективи розвитку залізорудної промисловості України. Збірник наукових праць / С. О. Попов, Є. К. Бабець, В. О. Колосов, Г. І. Рудько. – Кривий Ріг : НІГРІ ДВНЗ «КНУ», 2015. – №55. – С. 12–36.
2. Кутузов Б. Н. Взрывные работы в горном деле и промышленности / Б. Н. Кутузов // В кн.: Методы ведения взрывных работ. – М. : Горная книга, 2008. – 512 с.
3. Шаповал В. А. Економіка гірничого підприємства / В. А. Шаповал, О. В. Горпинич; М-во освіти і науки України, Нац. гірн. ун-т. – Дніпро : НГУ, 2017. – 204 с.
4. Караєва Н. В. Еколого-економічна оптимізація виробництва: інформаційна підтримка прийняття рішень / Н. В. Караєва. – К. : НТУУ «КПІ», 2016. – 115 с.
5. НАОП 1.2.90-5.08-92 «Инструкция по организации и ведению массовых взрывов скважинных зарядов на открытых горных работах». Кривой Рог: «Укррудпром», 1992. – 12 с.
6. НПАОП 0.00-1.67-13 «Технічні правила ведення вибухових робіт на денній поверхні» [Електронний ресурс]. – URL : <https://dnaop.com/html/32392/doc>
7. Нормы времени на проектирование [Электронный ресурс]. – URL : [http://proekt.by/obshie\\_voprosi\\_byuro\\_gipov-b58.0/normi\\_srokov\\_proektirovaniya-t13001.0.html/](http://proekt.by/obshie_voprosi_byuro_gipov-b58.0/normi_srokov_proektirovaniya-t13001.0.html/).
8. Лукичев С. В. Программные средства проектирования карьерных массовых взрывов и моделирование их результатов / С. В. Лукичев, А. В. Корниенко // Горная промышленность. – №6. – 2005. – С. 32–35.
9. Рыбников К. А. Введение в комбинаторный анализ / К. А. Рыбников. – М. : МГУ, 2016. – 312 с.
10. Шапурин А. В. О влиянии диаметра заряда на эффективность открытых горных работ / А. В. Шапурин, А. С. Левуцкий, В. П. Темный // Разработка рудных месторождений: сборник научных трудов. – 2010. – №93. – С. 23–27.
11. Дубнов Л. В. Промышленные взрывчатые вещества / Л. В. Дубнов, Н. С. Бахаревиц, А. И. Романов. – М. : Недра, 1988.
12. Методи порівняльної оцінки альтернативних варіантів рішень [Електронний ресурс]. – URL : [https://stud.com.ua/43979/politologiya/metodi\\_porivnyalnoyi\\_otsinki\\_alternativnih\\_variativ\\_rishen/](https://stud.com.ua/43979/politologiya/metodi_porivnyalnoyi_otsinki_alternativnih_variativ_rishen/).
13. Капленко Ю. П. Усовершенствовать существующие и разработать новые методические положения по определению параметров взрывной отбойки руд. тема № 1-266-81 / Ю. П. Капленко. – Кривой Рог : КГРИ, 1982. – 177 с.
14. Шапурин О. В. Дослідження взаємозв'язків між властивостями гірських порід, їх енергонасичення при підриванні і кускуватістю у розвалі / О. В. Шапурин, В. М. Серебреніков, Є. М. Швець // Вісник Криворізького національного університету: зб. наук. праць. – 2012. – № 30. – С. 18–23.
15. Классификация горных пород по крепости f (шкала проф. М. М. Протодьяконова). – [Электронный ресурс]. – URL : <http://rosmining.ru/wp-content/uploads/>.

16. Міждержавний стандарт «Долота шарошечні», технічні умови – [Електронний ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200034051/>.

17. Грабовецький Б. Є. Планування та економічне прогнозування / Б. Є. Грабовецький. – Вінниця : ВНТУ, 2013. – 66 с.

## References

1. Popov, S.O., Babets, Ye.K., Kolosov, V.O., & Rudko, H.I. (2015). Stan i perspektyvy rozvytku zalizorudnoi promyslovosti Ukrainy. Proceedings from Zbirnyk nau-kovykh prats Kryvyu Rih: NIHRI, DVNZ «KNU», (55), 12-36.
2. Kutuzov, B.N. (2008). Vzryvnye raboty v gornom dele i promyshlennosti. Metody vedeniya vzryvnykh rabot. Moskva: Gornaya kniga.
3. Shapoval, V.A., & Horpynych, O.V. (2017). Ekonomika hirnychoho pidpriemstva. Ministerstvo osvity i nauky Ukrainy, Natsionalnyy hirnychy uni-versytet. Dnipro: NHU.
4. Karaieva, N.V. (2016). Ekoloho-ekonomichna optymizatsiia vyrobnytstva: informatsiyna pidtrymka pryyniatia rishen. Kyiv: NTU «KPI».
5. «Instruktsiya po organizatsii i vedeniyu massovykh vzryvov skvazhnykh zaryadov na otkrytykh gornykh robotakh». (1992). NAOП 1.2.90-5.08-92. Krivoy Rog: «Ukrudprom».
6. «Tekhnichni pravyla vedennia vybukhovyykh robit na denniy poverkhni». NPAOP 0.00-1.67-13. Retrieved from <https://dnaop.com/html/32392/doc>.
7. «Normy vremeni na proektirovanie». Retrieved from [http://proekt.by/obshie\\_voprosi\\_byuro\\_gipov-b58.0/normi\\_srokov\\_proektirovaniya-t13001.0.html/](http://proekt.by/obshie_voprosi_byuro_gipov-b58.0/normi_srokov_proektirovaniya-t13001.0.html/).
8. Lukichev, S.V., & Kornienko, A.V. (2005). Programmnye sredstva proektirovaniya kariernykh massovykh vzryvov i modelirovanie ikh rezultatov. Gornaya promyshlennost, (6), 32-35.
9. Rybnikov, K.A. (2016). Vvedenie v kombinatornyy analiz. Moskva: MGU.
10. Shapurin, A.V., Levutskiy, A.S., & Temnyy, V.P. (2010). O vliyaniy diametra zaryada na effektivnost otkrytykh gornykh robot. Proceedings from «Razrabotka rudnykh mestorozhdeniy». Sbornik nauchnykh trudov. (93), 23-27.
11. Dubnov, L.V., Bakharevich, N.S., & Romanov, A.I. (1988). Promyshlennye vzryvchatye veshchestva. Moskva: Nedra.
12. «Metody porivnialnoi otsinky alternatyvnykh variantiv rishen». Retrieved from [https://stud.com.ua/43979/politologiya/metodi\\_porivnyalnoyi\\_otsinki\\_alternativnih\\_variativ\\_rishen/](https://stud.com.ua/43979/politologiya/metodi_porivnyalnoyi_otsinki_alternativnih_variativ_rishen/).
13. Kaplenko, Yu.P. (1982). Usovershenstvovat sushchestvuyushchie i razrabotat novye metodicheskie polozheniya po opredeleniyu parametrov vzryvnoy otboyki rud. Tema № 1-266-81. Krivoy Rog: KGRI.
14. Shapurin, O.V., Serebrenikov, V.M., & Shvets, Ye.M. (2012). Doslidzhennia vzaemoviazkiv mizh vlastyostiamy hirskykh porid, yikh enerhonasychnennia pry pidryvanni i kuskuvatistiu u rozvali. Visnyk Kryvorizkoho natsionalnoho universytetu. Zbirnyk nau-kovykh prats. (30), 18-23.
15. Klassifikatsiya gornykh porod po kreposti f (shkala professora M.M. Protodiakonova). Retrieved from

## КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ОТРАЖЕНИЯ ЖЕЛЕЗНЫХ РУД ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ БУРОВЗРЫВНЫХ РАБОТ ПО КРИТЕРИЮ ИХ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ

*С. А. Попов, д. т. н., профессор, Криворожский национальный университет,  
А. В. Романенко, д. т. н., профессор, Ингулецкий горно-обогатительный комбинат,  
Д. В. Колосовский, аспирант, И. В. Ковницька, А. К. Могила, студент,  
Криворожский национальный университет*

**Методология исследования.** Результаты работы получены за счет применения методов: аналитической обработки литературных источников, корреляционного анализа данных, экономико-математического моделирования, алгоритмизации и экономического анализа процессов.

**Результаты.** Проанализированы существующие методики определения параметров буровзрывных работ при отражении железных руд и выявлены их недостатки. Исследована наиболее приемлемая методика определения этих параметров, определены экономические аспекты ее расчетных параметров. Установлена зависимость между коэффициентом прочности горных пород и величиной линии наименьшего сопротивления, которая является базовым параметром для определяются результативности процесса отражения руд и экономической эффективности. Разработан подход комбинаторного экономико-математического моделирования буро-взрывных работ и алгоритм поиска решений по параметрам буро-взрывных работ, который позволяет определить оптимальную комбинацию их величин для конкретных горно-технических и экономических условий разработки железорудных месторождений. Разработана компьютерная система для осуществления экономико-математического моделирования буро-взрывных работ и определения их оптимальных параметров при проектировании процесса отбивания железных руд.

**Новизна.** Получена новая формализованная зависимость между основной физико-механической характеристикой горных пород и показателем (линия наименьшего сопротивления), который регламентирует параметры буро-взрывных работ, которые определяют необходимые объемы выполнения необходимых работ, а также объемы затрат материальных, трудовых и финансовых ресурсов для отражения руды. Впервые разработан алгоритм поиска оптимального решения из параметров буро-взрывных работ по критерию минимизации себестоимости основного продукта горнодобывающих предприятия – железорудного концентрата за процессом отражения руды.

**Практическая значимость.** На основе результатов выполненного исследования и теоретических основ подхода к оптимизационному экономико-математическому моделированию процесса отбивания железных руд разработана автоматизированная система для такого моделирования и практической параметризации буро-взрывных работ при подготовке паспортов массовых взрывов на железо-рудных горнодобывающих предприятиях.

**Ключевые слова:** компьютерное моделирование, отражения железных руд, оптимальные параметры, буро-взрывные работ, экономическая эффективность.

## COMPUTER MODELING OF THE PROCESS OF BREAKING DOWN IRON ORES TO DETERMINE THE OPTIMAL PARAMETERS OF DRILLING AND BLASTING OPERATIONS ACCORDING TO THE CRITERIA OF THEIR ECONOMIC EFFICIENCY

*S. O. Popov, Dr. Tech. Sc., Professor, Kryvyi Rih National University,  
O. V. Romanenko, Dr. Tech. Sc., Professor, Ingulets Mining and Processing Plant,  
D. V. Kolosovsky, Post-graduate student, I. V. Kovnytska, Bachelor student, A. K. Mogil, Bachelor student, Kryvyi Rih National University*

**Methods.** The results are obtained through the use of the following methods: analysis of literature sources, correlation analysis of data, economic and mathematical modeling, algorithmization and economic analysis of processes.

**Results.** The existing methods of determining the parameters of drilling and blasting operations in the breaking down iron ores are analyzed and their shortcomings are revealed. The most acceptable method of determining these parameters are studied, significant economic aspects of its calculated parameters are determined. The relationship between the strength coefficient of rocks and the value of the line of least resistance is established, which is the basic parameter for determining the effectiveness of the process of breaking down the ore and its economic efficiency. There is designed an approach of combinatorial economic and mathematical modeling of drilling and blasting operations and an algorithm for finding solutions from the parameters of drilling and blasting operations, which allows to determine the optimal combination of their values for specific mining and economic conditions of iron ore deposits. A computer system has been developed for economic and mathematical modeling of drilling and blasting operations and determination of their optimal parameters in the design of ore-breaking process.

**Novelty.** There is determined a new formalized relationship between the main physical and mechanical characteristics of rocks and the indicator (line of least resistance), which regulates the parameters of drilling and blasting, which determine the required amount of work required, as well as the cost of material, labor and financial resources for ore mining. For the first time, an algorithm was developed to find the optimal solution for the parameters of drilling and blasting operations by the criterion of minimizing the cost of the main product of the mining enterprise - iron ore concentrate in the process of ore-breaking.

**Practical value.** Based on the results of research and theoretical foundations of the approach to optimization of economic and mathematical modeling of iron ore breaking process, an automated system is developed for such modeling and practical parameterization of drilling and blasting operations in the preparation of passports of mass explosions at iron ore mining enterprises.

**Keywords:** computer modeling, breaking down iron ores, optimal parameters, drilling and blasting works, economic efficiency.

*Надійшла до редакції 12.04.21 р.*