

Олександр А. Темченко

## ОЦІНЮВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ ВІДКРИТОЇ ГІРНИЧОЇ ТЕХНОЛОГІЇ З ПОЗИЦІЇ ЕНЕРГОЄМНОСТІ

*У статті обґрунтовано об'єктивну необхідність використання запропонованих критеріїв і розробленої економіко-математичної моделі з метою формування комплексів організаційно-технічних заходів з енергозбереження при застосуванні відкритої розробки залізрудних родовищ з урахуванням забезпечення раціональної енергоємності технологічних процесів та надійності роботи гірничотранспортного обладнання в кар'єрах. Розроблено науково-методичний підхід щодо формування енергетичної складової відкритої гірничої технології в контексті проведення енергетичного оцінювання варіантів впровадження енергозберігаючих заходів на основі встановлення енергоємності технологічних процесів видобутку і переробки залізрудної сировини з урахуванням отримання інтегрального ефекту.*

*Ключові слова:* енергоємність; енергозберігаючі заходи; відкрита гірнича технологія.  
*Форм. 12. Рис. 1. Табл. 2. Літ. 12.*

Александр А. Темченко

## ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ОТКРЫТОЙ ГОРНОЙ ТЕХНОЛОГИИ С ПОЗИЦИИ ЭНЕРГОЁМКОСТИ

*В статье обоснована объективная необходимость использования предложенных критериев и разработанной экономико-математической модели с целью формирования комплексов организационно-технических мероприятий по энергосбережению при применении открытой разработки железорудных месторождений с учетом обеспечения рациональной энергоёмкости технологических процессов и надёжности работы горнотранспортного оборудования в карьерах. Разработан научно-методический подход к формированию энергетической составляющей открытой горной технологии в контексте проведения энергетической оценки вариантов внедрения энергосберегающих мероприятий на основе установления энергоёмкости технологических процессов добычи и переработки железорудного сырья с учетом получения интегрального эффекта.*

*Ключевые слова:* энергоёмкость; энергосберегающие меры; открытая горная технология.

Oleksandr A. Temchenko<sup>1</sup>

## EFFICIENCY ESTIMATION FOR OPEN-CAST MINING TECHNOLOGY FROM THE POSITION OF ENERGY INTENSITY

*The article grounds the objective need for applying the suggested by the author criteria and the presented economic-mathematical model for the implementation of organizational and technical measures on energy saving during open-cast mining, taking into account the rational energy intensity of all technological processes and the security of mining equipment performance in cast mines. A new scientific methodological approach is suggested for the formation of energy component in open-cast mining technology in the context of carrying out the estimation of energy-saving activities basing on the determination of energy intensity of all technological processes in mining and processing of iron ore raw material and taking into account the potential integral effect of these measures.*

*Keywords:* energy intensity; energy-saving measures; open-cast mining.

**Постановка проблеми.** Відкрита гірнича технологія (ВГТ) характеризується значною енергоємністю. Так, на сучасному гірничо-збагачувальному

---

<sup>1</sup> Kryvyi Rih National University, Ukraine.

комбінаті, що перероблює до 30 млн т сирової руди на рік, сумарна встановлена потужність електрообладнання технологічних механізмів складає 300 МВт, річне споживання електроенергії сягає до 2 млрд кВт • год., а в окремих випадках і більше [10]. Питомі витрати електроенергії на видобуток та збагачення руди на різних підприємствах залізорудної галузі промисловості вже на початку ХХІ ст. досягли 70–150 кВт • год./т [6]. Тому в складних умовах дефіциту паливно-енергетичних ресурсів та збільшення їх вартості особливої актуальності набуває оцінка енергетичної складової конкурентоспроможності застосування відкритої гірничої технології (ВГТ) при розробці родовищ корисних копалин.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Енергетичний підхід до оцінки ефективності окремих технологічних процесів і устаткування на гірничо-збагачувальних комбінатах загалом розглядається в дослідженнях багатьох відомих вітчизняних та закордонних вчених зокрема, Ю.І. Аністратова [1], Б.Р. Ракішева [7], І.О. Тангаєва [8], А.Г. Темченка [9] та інших.

**Невирішені раніше частини загальної проблеми.** Разом з тим, проблемі визначення рівня енергоспоживання при подальшому застосуванні ВГТ на прикінцевих етапах доопрацювання залізорудних родовищ з позиції забезпечення конкурентоспроможності приділено недостатньої уваги. При цьому індивідуальні показники енергоемності технологічних процесів необхідно ув'язувати з кінцевими результатами діяльності вітчизняних гірничих підприємств з урахуванням їхніх обмежених фінансових можливостей.

**Метою дослідження** є розробка методичних підходів до оцінки енергоемності технологічних процесів для підвищення ефективності подальшого застосування ВГТ.

**Основні результати дослідження.** Для енергетичної оцінки окремих одиниць устаткування і технологічних процесів використовують питомі витрати енергоспоживання [1; 9]. Відомо, що єдиною фізичною величиною, яка характеризує будь-який вид енергії, є джоуль (Дж). Тому енергія, що використовується в різних технологічних процесах, може бути приведена до єдиної розмірності. Для економічної оцінки процесів енергозбереження необхідно знати кількість енергії, яка споживається на підприємстві, та її ціну. Дані про ціни основних видів енергії гірничо-збагачувального виробництва та їх споживання наведені в табл. 1 (станом на початок 2000-х років). Маючи дані про співвідношення енергетичних величин та цін, можна зробити висновки про ефективність використання енергії у певному варіанті застосування ВГТ.

Енергоемність технологічних процесів пропонується оцінювати показниками питомих енерговитрат у енергетичному еквіваленті [1]. Дослідження показали, що ряд об'єктивних факторів (ускладнення гірничо-геологічних умов, зниження якісних показників мінеральної сировини, зростання глибини розробки родовищ корисних копалин) у поєднанні з суб'єктивними (низький технічний стан та високий рівень спрацювання технологічного обладнання, нерівномірний графік навантаження, скорочені ремонтні терміни) привели до підвищення рівня питомих енерговитрат технологічного обладнання, що значно перевищують нормативні показники.

Таблиця 1. Співвідношення енергетичних величин та цін основних видів енергії\*

№	Вид енергії	Співвідношення Дж/од. енергії	Співвідношення грн/од. енергії	Співвідношення грн./МДж
1	Електрична	$3,6 \cdot 10^6$ Дж/кВт-год	0,02–0,05 грн/кВт-год	0,005–0,012 грн/МДж
2	Хімічна (вибухові речовини)	$4,2 \cdot 10^6$ Дж/кг	0,08–0,6 грн/кг	0,02–0,14 грн/МДж
3	Теплова (дизельне паливо)	$42 \cdot 10^6$ Дж/кг	0,05–0,23 грн/кг	0,0012–0,055 грн/МДж

\* складено за даними [9].

Вирішення поставленого завдання щодо управління енергоспоживанням можливе шляхом підвищення енергетичної ефективності гірничого виробництва: виявлення технологічних, технічних та організаційних факторів, що суттєво впливають на показники енергоємності окремих ланок технологічних процесів гірничого виробництва та розробку конкретних заходів з економії енергії; обґрунтування інноваційних рішень та їх реалізація в умовах діючого виробництва. З урахуванням вищезазначеного нами розроблені економіко-математичні моделі формування енергоощадної ВГТ, кожна з яких дозволяє одночасно здійснювати розрахунки щодо оновлення устаткування підприємства, формувати графіки заміни одного типу устаткування іншим й оцінювати їхню ефективність. В якості критерію оптимальності графіків відновлення й заміни гірничих машин пропонується використовувати чисту приведену вартість (net present value – NPV) як суму приведених вартостей усіх грошових витрат і доходів при реалізації конкретного варіанта заміни устаткування. NPV інвестиційного проекту визначає максимальну суму, що може використати гірниче підприємство на заміну устаткування без погіршення свого фінансового становища. Критерій формалізується у такий спосіб:

$$NPV = \frac{\sum_t (D_t - C_t)}{(1+E)^t} \rightarrow \max, \quad (1)$$

де  $D_t$  – дохід від реалізації товарної продукції у  $t$ -ому періоді, грн;

$$D_t = Q_t \times \gamma_t \times \zeta_t, \text{ грн}, \quad (2)$$

де  $Q_t$  – обсяг руди, що видобувається у кар'єрі у  $t$ -ому періоді, т;  $\gamma_t$  – вихід концентрату з 1 т руди, відн. од.;  $\zeta_t$  – ціна однієї тони концентрату, грн;  $C_t$  – експлуатаційні витрати (з урахуванням енергетичних витрат) гірничого підприємства при використанні устаткування, що вибуває та вводиться знову, за певний проміжок часу, приведені до одного моменту оцінки – початку заміни, грн;

$$C_t = \sum_{t=1}^T \left[ C_{1t} Q_{1t} (N_1 - \sum_{t=1}^T k_1^{\text{виб}} X_{1t}) - S_{1t}^{\text{зан}} X_{1t} R_{1t} + N_1^{\text{сн}} (S_{1t}^{\text{зан}} - S_{1t}^{\text{лік}}) R_{1t} + \right. \\ \left. + C_{2t} Q_{2t} (\sum_{t=1}^T k_t^{\text{вб}} X_{2t} + K_{2t} X_{2t} R_{2t}) (1/(1+E))^{t-1} \right], \quad (3)$$

де  $C_{1t}$ ,  $C_{2t}$  – собівартість одиниці продукції в  $t$ -ому періоді відповідно при використанні старого й нового устаткування, грн/од.;  $Q_{1t}$ ,  $Q_{2t}$  – річна продук-

тивність відповідно старого й нового устаткування, од.; перший показник забезпечує виробництво заданих обсягів продукції на початок заміни, другий – на кінець;  $N_1$  – кількість устаткування у інвентарному парку, од.;  $k_t^{BB}$ ,  $k_t^{VIB}$  – коефіцієнти, що враховують зниження річної продуктивності відповідно при введенні нового й виведенні спрацьованого устаткування протягом періоду  $t$ ;  $S_{1t}^{зал}$ ,  $S_{2t}^{лік}$  – відповідно залишкова й ліквідаційна вартість устаткування, що підлягає заміні у  $t$ -ий період, тис. грн;  $N_{1t}^{сн}$  – кількість устаткування, що підлягає списанню в результаті повного спрацювання, од.;  $K_{2t}$  – капітальні витрати на придбання одиниці нового устаткування, тис. грн;  $R_{1t}$  та  $R_{2t}$  – річна норма амортизаційних відрахувань для старого і нового устаткування відповідно до застосовуваної на підприємстві методики нарахування амортизації, відн. од.;  $E$  – коефіцієнт дисконтування витрат при приведенні до одного моменту оцінки.

Керовані змінні:  $X_{1t}$  – кількість експлуатованого устаткування, що підлягає списуванню у  $t$ -ий рік відповідно до графіка заміни, од.;  $X_{2t}$  – кількість устаткування, що вводиться, у  $t$ -ому році, що разом з виведеним забезпечує виробництво заданих обсягів залізородної продукції, од.

Відмінними рисами розробленого критерію є те, що він комплексно враховує експлуатаційні витрати на виробництво продукції, витрати на придбання нового устаткування, енергетичні витрати, можливість зміни обсягів виробництва в часі, зниження продуктивності устаткування зі збільшенням строку експлуатації, а також дисконтування грошових потоків. При одночасній заміні всього гірничо-транспортного устаткування в кар'єрі до керованої зміни додається ще один індекс по типу гірничих машин. На формування оптимального графіка відновлення й заміни устаткування впливають такі обмеження:

1. Сумарна кількість устаткування, що підлягає заміні, не повинна перевищувати його кількості в інвентарному парку:

$$\sum X_{1t} \leq N_1, \text{ од.} \quad (4)$$

2. Сумарна кількість устаткування, що вводиться, має забезпечувати виробництво заданих обсягів продукції на кінець періоду  $T$

$$\sum X_{2t} \geq N_2, \text{ од.} \quad (5)$$

3. Сумарна продуктивність інвентарного парку, що складає з різнотипного гірничого устаткування, повинна забезпечувати щорічне виробництво продукції відповідно до графіка наростання обсягів ( $V_t$ )

$$Q_{1t}(N_1 - \sum k_1^{VIB} X_{1t}) + Q_{2t} \sum k_1^{BB} X_{2t} = V_t. \quad (6)$$

4. Кількість устаткування, що вводиться щорічно, не має перевищувати можливого розміру партії поставок ( $N_2^{пост}$ )

$$\sum X_{2t} \leq N_2^{пост}. \quad (7)$$

5. Кількість устаткування, що вибуває не повинна бути менше тієї кількості, що підлягає обов'язковому списанню через повне спрацювання

$$\sum X_{1t} \leq N_2^{сн}. \quad (8)$$

6. Технологічні обмеження, що визначають ефективність роботи устаткування на суміжних технологічних процесах:

а) місткість кузова автосамоскида ( $V_a$ ) повинна бути в певному співвідношенні з ємністю ковша екскаватора ( $E_k$ )

$$5E_k \leq V_a \leq 7E_k; \quad (9)$$

б) бурові станки повинні забезпечити підготовку підірваної гірничої маси для виймально-навантажувальних робіт

$$\sum Q_{t,be} \geq V_t. \quad (10)$$

Розроблені економіко-математичні моделі технічного переозброєння з урахуванням енергоємності устаткування ВГТ є універсальними і відносяться до класу завдань лінійного програмування. Тому вони можуть реалізовуватися за допомогою стандартного програмного забезпечення. За результатами реалізації розробленої економіко-математичної моделі з'являється можливість формування безлічі організаційно-технічних заходів з енергозбереження у конкретному варіанті застосування ВГТ. Це вимагає розробки відповідного методичного забезпечення, що дозволяє враховувати вплив майбутніх умов розвитку гірничо-металургійного комплексу та економіки в цілому, а також соціальні й екологічні фактори [4]. В основу енергозберігаючих заходів поставлено завдання, що передбачає визначення найкращого організаційно-технічного заходу з енергозбереження за наступними базовими економічними показниками. Відомий підхід до оптимізації енергоспоживання гірничого виробництва виходить з принципу

$$\sum E = (e_B + e_P + e_e + e_T + e_{под}) \rightarrow \min, \quad (11)$$

де  $\sum E$  – загальні питомі витрати енергії на одиницю кінцевого продукту, кДж/т;  $e_B$ ,  $e_P$ ,  $e_e$ ,  $e_T$ ,  $e_{под}$  – відповідно приведені питомі витрати енергії на буріння, підривання, екскавацію, транспортування та подрібнення руди, кДж/т.

Аналіз показує, що в цьому критерії не враховуються витрати на впровадження енергозберігаючих заходів та відсутній зв'язок з кінцевими результатами роботи гірничозбагачувального підприємства. Для оцінки енергетичної складової ВГТ нами запропоновано показник енергорентабельності у якості критерія ефективного використання енергії в усіх технологічних процесах, усіма одиницями гірничотранспортного устаткування:

$$\sum E = \Pi / \Delta B (e_B + e_P + e_e + e_T + e_{под}) \rightarrow \min, \quad (12)$$

де  $\Pi$  – прибуток гірничого підприємства від реалізації товарної продукції, тис. грн;  $\Delta B$  – додаткові витрати на впровадження енергозберігаючих технологічних та організаційно-технічних заходів, спрямованих на зменшення питомих витрат енергоресурсів при подальшому застосуванні ВГТ, тис. грн/т.

При цьому чисельник представлено у вигляді показника інтегрального ефекту, що представляє собою різницю дисконтованих за розрахунковий період часу оцінок результатів (доходів) і витрат, тобто різницю сукупного доходу й усіх видів витрат за цей період.

Таким чином, використання запропонованих критеріїв і розробленої економіко-математичної моделі дозволяють формувати комплекси організаційно-технічних заходів з енергозбереження при застосуванні відкритої розробки залізородних родовищ з урахуванням забезпечення раціональної енергоємності технологічних процесів. При цьому важливою складовою цього процесу є визначення енергоємності технологічних процесів ВГТ [3; 5].

При формуванні організаційно-технічних заходів з енергозбереження необхідно враховувати надійність технологічних схем роботи гірничотранспортного комплексу, виходячи з того, що інтенсифікація технологічних режимів у досить важких умовах роботи на кар'єрах не дозволяє навіть за ідеальних умов експлуатації та обслуговування забезпечити безвідмовну роботу основних видів обладнання. Вихід з ладу окремих видів обладнання призводить до перевантажень обладнання, невиконання плану, створює складнощі в управлінні. Окрім того, особливої актуальності набуває вирішення завдання визначення факторів, які впливають на експлуатаційну надійність технологічних схем з установленням відповідних закономірностей, виявленням «вузьких» місць з метою обґрунтованого планування терміну служби і резерву гірничого обладнання, планування технічного обслуговування, планово-попереджувальних та капітальних ремонтів, обґрунтування потреби у запасних частинах, енергозбереження та нормування енергоресурсів.

З метою визначення показників надійності у відповідності з відомою методикою [2; 12] для умов кар'єру ПАТ «ІнГЗК» була оброблена вихідна інформація та розраховані показники надійності наступних виробничих процесів: буріння, екскавація, транспортування автосамоскидами та конвейєрами і крупне дроблення руди при застосуванні циклічно-потоккової технології. Узагальнюючі показники надійності гірничотранспортного обладнання та технологічних схем їх роботи за період 2009–2013 рр. наведено в табл. 2.

**Таблиця 2. Узагальнюючі показники надійності гірничотранспортного обладнання на кар'єрі ПАТ «ІнГЗК» за 2009–2013 роки, авторська розробка**

№	Тип обладнання	Середнє значення ймовірності безвідмовної роботи, P(t)
1	Бурові верстати типу СБШ	0,56
2	Екскаватори типу ЕКГ	0,41
3	Автосамоскиди типу «БілаЗ»	0,858
4	Конвейєрний тракт: «Східний» «Західний»	0,712 0,853

Наведена в табл. 2 інформація свідчить про те, що найнижча надійність (ймовірність безвідмовної роботи) характерна для процесу екскавації, середня величина показника надійності якого за вказаний період складає лише 0,41. Аналіз експлуатаційних даних виявив, що в загальній структурі потоку відмов екскаваторів частка відмов механічного устаткування становить приблизно 50%, значну частину з яких (30%) займають відмови металокопункцій. Останнє пов'язане з тим, що в металокопункціях особливу небезпеку представляють собою зварні з'єднання, в яких найбільш інтенсивно виникають і

розвиваються тріщини. Найвагомим фактором у даній проблемі є якість підривної підготовки гірських порід до екскавації, кількісною мірою якої є, як правило, середній діаметр куска у розвалі або вихід негабариту. Встановлено, що дані показники функціонально пов'язані між собою (рис. 1).



Рис. 1. Залежність виходу негабарита від середнього діаметра куска гірничої маси, авторська розробка

Виконані виміри гранулометричного складу підірваної гірничої маси у кар'єрі ПАТ «ІнГЗК» за останні 5 років показують, що середній діаметр куска складає 400–450 мм. Основним фактором впливу на тріщиноутворення у металокопункціях екскаваторів є наявність випадкових перевантажень, що виникають внаслідок зіткнення ковша з некондиційними кусками (55%), шарами зруйнованих порід з низьким коефіцієнтом розпушення (25%).

Збільшення середнього діаметра куска у розвалі ( $d_{сер}$ ) з 0,3 до 0,5 м збільшує ріст тріщин у 3–3,5 рази, а при зміні коефіцієнта розпушення за шарами розвалу з 1,1 до 1,5 збільшує в 4,2 рази. Зменшення середнього діаметра куска підірваної гірничої маси в 1,5 рази збільшує в 2,5 рази необхідний обсяг породи, що екскавується, для перетворення стандартного тріщиноподібного дефекту на тріщину. Кількість циклів навантажень металокопункції екскаваторів при зростанні енергоємності при її збільшенні в 2,5 рази збільшується в середньому в 1,7 рази, що свідчить про перехід до роботи від вибою ( $d_{сер} = 0,3$  м) до неякісно підготовленого ( $d_{сер} = 0,5$  м). Раніше проведеними дослідженнями [11], виконаними для умов кар'єра ПАТ «ІнГЗК», встановлено вплив якості подрібнення порід вибухом на напруження в основних вузлах екскаватора при роботі у важкому вибою ( $d_{сер} = 400$  мм) в 3,55–4,57 рази вище, ніж при роботі в якісному вибою ( $d_{сер} = 180$  мм). Отримані залежності доцільно враховувати при плануванні термінів і обсягів робіт у конкретних умовах гірничого виробництва на окремому родовищі, а також при розробці організаційно-технічних заходів з енергозбереження на окремих етапах видобутку і переробки залізородної сировини на гірничорудному підприємстві.

Таким чином, запропонована методика оцінювання енергоємності технологічних процесів та надійності застосування комплексів гірничотранспортного обладнання може бути використана задля підвищення ефективності

подальшого застосування відкритої гірничої технології та забезпечення її конкурентоспроможності.

**Висновки.** На підставі проведених досліджень встановлено, що формування енергетичної складової відкритої гірничої технології необхідно здійснювати шляхом оцінювання варіантів впровадження енергозберігаючих заходів на основі встановлення енергоємності окремих технологічних процесів видобутку і переробки залізорудної сировини з урахуванням надійності роботи комплексів гірничотранспортного обладнання на глибоких кар'єрах та отримання інтегрального ефекту.

1. *Анистратов Ю.И.* Технологические потоки на карьерах (Энергетическая теория открытых горных работ). – М.: Глобус, 2005. – 304 с.
2. *Голинкевич Т.А.* Прикладная теория надежности: Учебник для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 1985. – 167 с.
3. *Дядечкин Н.И., Шиповский Г.В.* Взрывное разрушение сильно обводненных породных массивов на Ингулецком ГОКе // Горный журнал. – 2009. – №2. – С. 37–39.
4. *Козьмина З.Ю., Бродов Ю.М., Домников А.Ю. и др.* Оценка экономической эффективности модернизации энергетического оборудования // Электрические станции. – 2003. – №12. – С. 22–26.
5. *Максимов С.В., Темченко О.А., Темченко Г.В.* Передумови впровадження енергозберігаючих заходів в процесі видобутку і переробки залізорудної сировини // Вісник КТУ. – 2012. – №32. – С. 250–255.
6. *Михайлов А.М., Темченко А.Г.* Снижение энергоёмкости горного производства путем оптимизации производственных мощностей ГОКов Кривбасса // Науковий вісник НГА України. – 2000. – №5. – С. 88–91.
7. *Ракишев Б.Р.* Энергоёмкость механического разрушения горных пород. – Алматы: Баспагер, 1998. – 210 с.
8. *Тангаев И.А.* Энергоёмкость процессов добычи и переработки полезных ископаемых. – М.: Недра, 1986. – 231 с.
9. *Темченко А.Г.* Научные основы оценки и выбора энергосберегающих технологий открытой разработки железорудных месторождений: Дис... докт. техн. наук: спец. 05.15.03 – Открытые горные работы / НГУ. – Днепропетровск, 2001. – 355 с.
10. *Цымбал В.А., Богатырев К.Н., Тычина А.В., Коваленко Н.М., Куц Е.А.* Энергетическое обеспечение Полтавского ГОКа и пути экономии энергоресурсов // Горный журнал. – 2010. – №6. – С. 34–36.
11. *Шапурин А.В.* Расчёты параметров буровзрывных работ. – К.: УМК ВО, 1990. – 64 с.
12. *Шендеров А.И., Емельянов О.А., Один И.М.* Надежность и производительность горно-транспортного оборудования. – М.: Недра, 1976. – 247 с.

Стаття надійшла до редакції 23.03.2015.