

ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»
Гірничо-металургійний факультет
Кафедра гірничої справи

«Допущено до захисту»

Гарант ОПП

Григор'єв Ігор Євгенійович

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня магістра

за підсумками виконання

освітньо-професійної програми

«Технології відкритої розробки родовищ»

за спеціальністю 184 Гірництво

на тему «Енергетичний підхід як альтернативний критерій оцінки
проектних рішень відкритих родовищ корисних копалин»

Керівник роботи

Григор'єв Юліан Ігорович

Наставник від бази практики

Скрипніченко Дмитро Віталійович

Кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

Здобувач

Щербина Сергій Геннадійович

Підсумкова оцінка за атестацію			
--------------------------------	--	--	--

Голова ЕК

Запоріжжя 2025

восточном направлении»; РП «ПАО «ИнГОК». Комплексный проект поэтапного развития горных работ и переработки минерального сырья до конца отработки»; статті з наукових журналів та збірників, присвячені транспортуванню гірничої маси та оцінці проектних рішень. Навчальна, методична література з спеціальних дисциплін та дипломування, науково-дослідницькі роботи з тематики технічного рівня екскаваторів та відритої розробки родовищ, науково-технічні літературні джерела, технологічні інструкції.

4. Зміст пояснювальної записки:

Анотація. Зміст. Вступ. 1. Аналіз теоретичних основ щодо оцінки проектних рішень. 2. Аналіз сучасного стану відкритих гірничих робіт кар'єру прат «ІНГЗК». 3. Дослідження динаміки параметрів енергоємності транспортування гірничої маси в умовах глибоких кар'єрів. 4. Енергетична оцінка транспортування гірничої маси в кар'єрі прат «ІНГЗК». Висновки та рекомендації. Список використаної літератури.

Перелік графічного (демонстраційного) матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень): критерії техніко-економічної оцінки проектних рішень, Показники роботи технологічного автотранспорту ПрАТ «ІНГЗК», Динаміка транспортної роботи залежно від глибини кар'єру до 585 м з урахуванням кута нахилу бортів, Теоретична енергоємність переміщення гірничої маси ΔE_p у межах контурів кар'єру на поверхню, Питома енергоємність видобутку та передачі енергії до рушійної системи транспортного засобу енергосиловою установкою, Відношення повної енергоємності транспортування з урахуванням теплоти згоряння первинного палива за різними видами транспорту, Висновки і рекомендації.

5. Консультанти по роботі, із зазначенням розділів роботи, що їх стосуються

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта
1	Григор'єв Ю.І., доцент кафедри ГС
2	Григор'єв Ю.І., доцент кафедри ГС
3	Григор'єв Ю.І., доцент кафедри ГС
4	Григор'єв Ю.І., доцент кафедри ГС

7. Дата видачі завдання 31.05.2024

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи
1	Збір вихідних даних роботи обладнання кар'єру Інгулецького ГЗК	02.12 - 27.12.24
2	Підготовка матеріалів до теоретичного розділу	15.12 - 31.12.24
3	Підготовка матеріалів до дослідницького розділу	01.01-15.01.25
4	Підготовка матеріалів технологічного і економічного розділу.	15.01-31.01.25
5	Охорона праці	01.02-04.02.25

Здобувач

Щербина Сергій Геннадійович

Керівник роботи

Григор'єв Юліан Ігорович

АНОТАЦІЯ

Щербина Сергій Геннадійович.

Енергетичний підхід як альтернативний критерій оцінки проектних рішень відкритих родовищ корисних копалин.

Кваліфікаційна праця на правах рукопису.

Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня магістра за спеціальністю 184 Гірництво, ОПП «Технології відкритої розробки родовищ» – ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА», Запоріжжя, 2025.

Об'єкт дослідження – процес транспортування гірничої маси в умовах глибоких кар'єрів.

Предмет дослідження – процес прийняття проектних рішень щодо розвитку транспортної схеми глибоких кар'єрів

Мета роботи: Підвищити точність прийняття проектних рішень щодо розвитку транспортної схеми кар'єру ПРАТ «Інгулецький ГЗК» шляхом теоретичного обґрунтування енергетичної оцінки як альтернативного критерію.

У першому розділі виконано аналіз теоретичних основ щодо оцінки проектних рішень в гірничій справі, наведено загальні відомості про основні і альтернативні критерії оцінки, а особливий акцент зроблено на енергетичних витратах.

У другому розділі проаналізовано сучасний стан відкритих гірничих робіт Інгулецького кар'єру. Розглянуто загальну організацію структури підприємства, вивчено геологічну будову родовища, проаналізовано сучасний стан гірничих робіт і парку технологічного устаткування, в тому числі досліджено показники його роботи.

У третьому розділі проведено дослідження динаміки параметрів енергоємності транспортування гірничої маси в умовах глибоких

кар'єрів, розглянуто залежності головних параметрів кар'єру і показників енерговитрат при транспортуванні гірничої маси.

У четвертому розділі виконано власне оцінку видів транспорту і транспортної схеми в Інгулецькому кар'єрі загалом, на основі чого розроблені рекомендації по подальшому розвитку системи транспортування.

Основні результати та їхнє практичне значення:

Дослідження показали, що комбіновані схеми транспортування (автомобільно-конвейерні або автомобільно-залізничні) можуть значно знизити питомі енерговитрати за рахунок скорочення загальної відстані перевезення та ефективнішого використання енергоресурсів.

Запропоновано застосування енергетичного критерію як альтернативного підходу для оцінки проектних рішень у відкритій розробці родовищ. Це дозволяє порівнювати варіанти транспортних схем з урахуванням їхніх енерговитрат, а не лише економічних параметрів.

Визначено закономірності зміни енергоемності транспортування у залежності від глибини кар'єру, ухилу бортів та вибору транспортної системи. Показано, що комбіновані транспортні схеми знижують енерговитрати порівняно з виключно автомобільним транспортом.

Розраховано повні енерговитрати на транспортування гірничої маси при різних схемах транспорту для Інгулецького кар'єру. Встановлено, що найбільш енергоефективними є комбіновані автомобільно-конвейерні системи, які дозволяють мінімізувати висоту підйому та витрати на паливно-енергетичні ресурси.

Отримані результати можуть бути використані при проектуванні та модернізації гірничо-транспортних систем на підприємствах, що займаються відкритою розробкою корисних копалин. Запропонований

підхід дозволяє не лише знизити енерговитрати, а й підвищити загальну економічну ефективність підприємства.

Обсяг роботи: 82 сторінки.

Кількість ілюстрацій: 11.

Кількість таблиць: 5.

Кількість джерел у списку літератури: 32.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: критерій оцінки, енергоємність, транспортна схема, глибокий кар'єр, технологічне обладнання.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	12
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ТЕОРЕТИЧНИХ ОСНОВ ЩОДО ОЦІНКИ ПРОЄКТНИХ РІШЕНЬ.....	14
1.1 Загальні поняття про прийняття проєктних рішень	14
1.2 Аналіз існуючих критеріїв прийняття проєктних рішень	19
1.3 Критерій мінімуму енергетичних витрат як альтернативний критерій оцінки проєктних рішень	25
РОЗДІЛ 2. АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ВІДКРИТИХ ГІРНИЧИХ РОБІТ КАР'ЄРУ ПРАТ «ІНГЗК».....	32
2.1 Аналіз структури підприємства ПрАТ «ІНГЗК» та геологічної будови Інгулецького родовища	32
2.2 Аналіз сучасного стану гірничих робіт і парку технологічного обладнання	41
2.3 Аналіз показників роботи гірничого обладнання кар'єру ПрАТ	43
РОЗДІЛ 3. ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІКИ ПАРАМЕТРІВ ЕНЕРГОЄМНОСТІ ТРАНСПОРТУВАННЯ ГІРНИЧОЇ МАСИ В УМОВАХ ГЛИБОКИХ КАР'ЄРІВ.....	48
РОЗДІЛ 4. ЕНЕРГЕТИЧНА ОЦІНКА ТРАНСПОРТУВАННЯ ГІРНИЧОЇ МАСИ В КАР'ЄРІ ПРАТ «ІНГЗК».....	74
ВИСНОВКИ І РЕКОМЕНДАЦІЇ.....	77
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....	79

ВСТУП

Відкриті гірничі роботи відіграють провідну роль в забезпеченні світової економіки мінерально-сировинними ресурсами. На території України, яка є однією з провідних країн Європи за обсягами гірничодобувного сектору, видобуток корисних копалин відкритим способом охоплює численні родовища залізної, марганцевої руди, а також нерудної сировини. Цей вид видобутку, порівняно з підземним, характеризується високою продуктивністю, більшою безпекою праці та можливістю застосування крупногабаритної техніки, що дає змогу забезпечувати стабільне постачання мінеральних ресурсів як для вітчизняних, так і для міжнародних споживачів. При цьому в умовах глобалізації та зростання конкуренції роль відкритої розробки постійно посилюється, адже від ефективності гірничих робіт значною мірою залежить економічний розвиток держави й потенціал експорту продукції гірничорудних підприємств.

Разом із тим, протягом останніх десятиліть галузь відкритих гірничих робіт стикається зі зростаючими викликами, пов'язаними з поступовим поглибленням кар'єрів і ускладненням гірничо-геологічних умов. На глибоких горизонтах відпрацювання родовищ ускладнюється через збільшення обсягів розкривних робіт, необхідність будівництва більш протяжних внутрішньокар'єрних комунікацій, нарощування ємності дренажних систем тощо. Усе це призводить до різкого зростання витрат на придбання та експлуатацію техніки (екскаваторно-транспортних комплексів, буропідливних систем), посилює техногенний вплив на довкілля та знижує загальну рентабельність видобутку. Крім того, поглиблення кар'єрів вимагає детальнішого геотехнічного моніторингу і дотримання строгих вимог безпеки, що додатково ускладнює процес прийняття проєктних рішень.

У таких умовах традиційні критерії оцінки проєктних рішень, зосереджені переважно на фінансових чи суто техніко-економічних

показниках (такі як собівартість, NPV, IRR), уже не завжди достатньо відображають складність та реальні ризики відкритої розробки глибоких родовищ. Постає необхідність впровадження альтернативних критеріїв, котрі здатні враховувати низку додаткових факторів: енергоємність операцій, ресурсомісткість технологічних схем, динаміку зміни гірничо-геологічних умов. Саме орієнтація на такі критерії, зокрема на мінімізацію енергетичних витрат, дозволяє підвищити точність і обґрунтованість проєктних рішень, оптимізувати взаємодію між технологічними процесами та краще прогнозувати довгострокову ефективність гірничого підприємства. Збалансована інтеграція енергетичного підходу в загальну систему проєктування кар'єру відкриває можливість не лише зменшити негативний вплив гірничих робіт на загальну економіку підприємства, а й надає додаткові інструменти для підвищення конкурентоспроможності вітчизняної гірничорудної промисловості на світовому ринку.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ТЕОРЕТИЧНИХ ОСНОВ ЩОДО ОЦІНКИ ПРОЄКТНИХ РІШЕНЬ

1.1 Загальні поняття про прийняття проєктних рішень

Прийняття проєктних рішень – це процес обґрунтування і вибору оптимального варіанта дій серед кількох можливих для досягнення поставлених цілей з урахуванням технічних, економічних, екологічних та інших критеріїв. У гірничій справі цей процес має критичне значення через складність і багатофакторність розробки родовищ корисних копалин, а також через значні капітальні вкладення та довгострокові наслідки прийнятих рішень.

Згідно з працями українських і закордонних авторів [1, 2] процес прийняття проєктних рішень включає наступні ключові етапи:

1. Формування цілей проєкту. Визначення кінцевих результатів, яких необхідно досягти.
2. Аналіз вхідних даних. Оцінка геологічних, технічних, екологічних та економічних параметрів, що впливають на реалізацію проєкту.
3. Розробка альтернатив. Формування кількох можливих рішень для досягнення мети.
4. Оцінка альтернатив. Використання критеріїв (економічних, енергетичних, екологічних тощо) для порівняння варіантів.
5. Прийняття рішення. Вибір оптимального варіанта.
6. Моніторинг і контроль реалізації. Оцінка виконання рішення в реальних умовах і коригування плану в разі необхідності.

Загальні поняття про прийняття проєктних рішень у гірничій справі тісно пов'язані з теорією прийняття рішень, яка розглядає способи вибору оптимального варіанта дій у ситуаціях, що характеризуються багатьма критеріями та змінними вихідними умовами. У контексті відкритих гірничих робіт цей процес має високу складність, оскільки

технологічні, економічні та виробничі параметри системи вимагають узгодженого врахування для отримання максимально можливої ефективності розкриття та видобутку корисних копалин. Згідно з працями українських і закордонних дослідників [1-3], алгоритм прийняття рішень базується на поетапному аналізі: від визначення завдань та збору початкових даних до розроблення альтернатив, їх оцінки та вибору найкращої з точки зору заданого критерію чи системи критеріїв. При цьому сучасні підходи наголошують на важливості багатофакторного врахування умов функціонування гірничого підприємства, зокрема динаміки гірничих робіт, параметрів технологічного обладнання та особливостей гірничого масиву.

Теорія прийняття рішень пропонує кілька методологічних парадигм. Класичний або раціональний підхід, розвинутий у працях [4], ґрунтується на повній визначеності та максимізації корисності або мінімізації витрат, коли обсяги та структура даних є вичерпними. У реальних умовах відкритих гірничих робіт рідко існує повна визначеність через можливі зміни кон'юнктури ринку, гірничо-геологічні особливості родовища, коливання енергоносіїв тощо. Тому багато авторів [5, 6] пропонують імовірнісні або багатокритеріальні моделі прийняття рішень, які враховують стохастичність вхідних параметрів. Застосування методів теорії ігор, імовірнісного моделювання та багатокритеріального аналізу дозволяє точніше оцінити ризики та розробити гнучкі стратегії розвитку гірничих робіт.

Значення обраного критерію оцінки в багатьох працях визнається визначальним фактором у досягненні високого рівня ефективності виробничих процесів. Тривалий час у гірничій галузі перевагу віддавали критеріям суто економічного характеру, таким як показники рентабельності чи фінансової привабливості. Проте розвиток відкритих гірничих робіт вимагає врахування інших аспектів, зокрема

енергетичних витрат, що істотно впливають на кінцеву собівартість процесів навантаження, транспортування та розкривних робіт [3].

Ще однією особливістю складних систем відкритих гірничих робіт є їхня поліструктурність, адже до комплексу розробки належать взаємопов'язані підсистеми: буропідривні, навантажувально-транспортні й допоміжні операції. Кожна з цих підсистем характеризується власними параметрами та специфікою організації, що ускладнює процес прийняття рішень. У науковій літературі [2] неодноразово наголошується на застосуванні системного підходу, коли оцінка проектних рішень виконується не ізольовано, а з урахуванням впливу кожної підсистеми на загальну продуктивність і витратність. Такий підхід потребує застосування сучасних інформаційних технологій, зокрема комп'ютерного моделювання й оптимізаційних алгоритмів, здатних обробляти великі обсяги даних та виконувати аналіз різноманітних сценаріїв розвитку гірничих робіт.

Важливість правильного критерію оцінки полягає не лише у виборі оптимального варіанта з огляду на поточні умови, а й у забезпеченні достатньої гнучкості системи до можливих змін. Для відкритих гірничих робіт така гнучкість стає вирішальною, адже протягом тривалого періоду експлуатації родовища можуть істотно змінюватися характеристики корисної копалини, ступінь ускладнення гірничих умов та динаміка ринкових чинників. Тому автори [5] рекомендують формувати критерії так, аби вони могли відображати як поточний стан, так і перспективи змін у системі, а також мати певний запас адаптивності, що дає змогу коригувати проектні рішення на різних етапах реалізації.

Процес прийняття рішень у складних системах, до яких і відносяться відкриті гірничі роботи, може бути структурований відповідно до різних підходів, які враховують специфіку технологічних,

економічних та організаційних умов функціонування системи. Зокрема, у науковій літературі виділяють кілька основних підходів: детермінований, стохастичний, адаптивний та інтерактивний [7, 8].

Детермінований підхід передбачає, що всі вихідні дані відомі, а умови виконання завдань є постійними. У цьому випадку використовується математична оптимізація для пошуку найкращого варіанту. Наприклад, цей підхід застосовується у виборі маршруту транспортування породи в межах кар'єру, де враховуються тільки відстані та технічні характеристики обладнання [8].

Стохастичний підхід орієнтований на врахування невизначеностей і ймовірнісних змін у системі, таких як зміни вмісту корисного компонента чи продуктивності обладнання. Методологія цього підходу часто базується на моделюванні можливих сценаріїв і використанні ймовірнісних функцій для оцінки ризиків [9].

Адаптивний підхід фокусується на здатності системи змінювати параметри роботи в реальному часі залежно від змін зовнішніх умов. Наприклад, у відкритих гірничих роботах адаптивність проявляється у динамічному регулюванні співвідношення руди та породи залежно від зміни кон'юнктури ринку [10].

Інтерактивний підхід спрямований на врахування взаємодії між елементами системи, включаючи людей, обладнання та інформаційні потоки. Цей підхід часто використовує методи багатокритеріального аналізу, які дозволяють узгодити інтереси різних учасників процесу [11].

Кожен із цих підходів має свої переваги та обмеження, але їхня комбінація дозволяє створити універсальні інструменти для прийняття рішень у складних системах відкритих гірничих робіт.

У світовій практиці багато компаній використовують інноваційні підходи до прийняття рішень у складних гірничих системах, спираючись на сучасні технології та наукові досягнення. Наприклад, компанія Rio

Tinto активно застосовує автоматизовані системи для моніторингу та оптимізації виробничих процесів. Їхня стратегія базується на впровадженні інтелектуальних систем аналізу даних, які дозволяють приймати рішення в режимі реального часу, мінімізуючи витрати та збільшуючи продуктивність [2].

Компанія BHP впроваджує стохастичне моделювання для прогнозування ризиків, пов'язаних із геологічними невизначеностями. Зокрема, вони використовують методи геостатистики для планування видобутку, що дозволяє враховувати варіативність рудних покладів і знижувати рівень операційних ризиків [3, 12-14].

Іншою успішною практикою є використання багатокритеріальних моделей у компанії Anglo American. Вони застосовують підходи, що поєднують економічні, технічні та логістичні параметри для оцінки ефективності різних варіантів розробки родовищ. Такий підхід забезпечує підвищену гнучкість і дозволяє адаптуватися до змін зовнішнього середовища [15, 16].

Загалом, аналіз найкращих практик міжнародних компаній свідчить, що успіх у прийнятті рішень у гірничій справі залежить від інтеграції сучасних технологій, адаптивних моделей і комплексного врахування багатокритеріальних факторів.

Отже, у контексті гірничої промисловості та зокрема відкритих гірничих робіт, теорія прийняття рішень набуває додаткової складності через поліструктурність виробничих процесів і низку ризиків, пов'язаних із невизначеністю. Оптимальний вибір часто потребує застосування багатокритеріальних та ймовірнісних підходів, які дають змогу синтезувати дані з різних джерел і комплексно враховувати енергоємність, затрати на розкривні роботи, технічні характеристики устаткування та інші фактори. У підсумку правильне визначення й використання оцінного критерію слугує підґрунтям для ухвалення

стратегічно виважених рішень, що сприятимуть підвищенню ефективності та надійності гірничого виробництва.

1.2 Аналіз існуючих критеріїв прийняття проєктних рішень

Прийняття проєктних рішень у гірничій галузі має базуватися на об'єктивних і чітко визначених критеріях, що забезпечують комплексну оцінку ефективності й перспективності впроваджуваних рішень. Одним із ключових джерел, які регламентують проєктну діяльність у відкритих гірничих роботах, є Норми технологічного проєктування (НТП) [17]. У цих Нормах зазначено принципові вимоги та показники, яких слід дотримуватися під час розроблення технологічних схем, вибору гірничого обладнання та визначення параметрів кар'єру. Вони узгоджують технічні рішення з галузевими стандартами й відображають досвід функціонування діючих підприємств, зокрема регламентують структуру технологічних процесів, допустимі рівні виробничих навантажень і типові проєктні параметри.

Поряд із НТП, у науковій і практичній літературі [2, 4] виокремлюють кілька груп критеріїв, що застосовуються при обґрунтуванні та виборі оптимальних проєктних рішень у гірничодобувній промисловості. Їх можна розділити на техніко-економічні, технологічні та фінансові. Техніко-економічні критерії традиційно відіграють провідну роль у процесі проєктування, адже вони дають змогу комплексно оцінити співвідношення між витратами на реалізацію проєкту та очікуваними виробничими показниками. До них належать показники продуктивності, витрати на одиницю продукції, коефіцієнти використання машинного парку тощо. Залежно від масштабів виробництва та геологічних умов родовища, показники

можуть адаптуватися або деталізуватися, відображаючи структуру процесів видобутку та транспортування.

Технологічні критерії безпосередньо стосуються оптимальності технологічної схеми, вибору обладнання і параметрів гірничо-транспортної системи. Наприклад, при проектуванні кар'єру важливо враховувати питому продуктивність виймально-навантажувальної техніки, максимальну ефективну висоту вибою, допустимі кути укосу бортів і раціональну мережу автодоріг [17].

$$P = \frac{W}{T} \quad (1.1)$$

де P — продуктивність роботи устаткування (екскаватора, бурового верстата, самоскида тощо), т/год або м³/год;

W — загальна маса (або об'єм) породи чи корисної копалини, оброблена протягом часу T , т або м³;

T — фактичний час роботи устаткування, год.

На етапі опрацювання варіантів технологічних схем аналізується сумісність типів гірничих машин, а також забезпечення безперервності процесу при різних режимах навантаження [2]. До числа технологічних критеріїв може входити час проходження транспорту, пропускна здатність фронту робіт, а також сумісність вибраної технології зі специфікою гірничого масиву та виду корисної копалини [6].

Фінансові критерії зазвичай зводяться до таких традиційних показників, як чиста приведена вартість (NPV), внутрішня норма дохідності (IRR), дисконтований період окупності, обсяг інвестицій та собівартість продукції [9].

Чиста приведена вартість є одним із найважливіших критеріїв, які застосовують для прийняття інвестиційних рішень у гірничій промисловості та багатьох інших галузях [4-6, 17]. Ідея NPV полягає в

тому, що гроші, отримані або витрачені в майбутньому, мають бути приведені до теперішнього моменту за допомогою ставки дисконту. Такий підхід дає змогу врахувати зміну вартості грошей у часі та ризики, пов'язані з віддаленими надходженнями від проекту.

$$NPV = \sum_{t=1}^T \frac{CF_t}{(1+r)^t} \quad (1.2)$$

де NPV — чиста приведена вартість проекту;

CF_t — грошовий потік (Cash Flow) у період t , грн;

r — ставка дисконту (discount rate);

T — загальна кількість періодів (наприклад, років), за які здійснюється розрахунок.

Проект вважається доцільним, якщо $NPV > 0$. Це означає, що сумарний дисконтований грошовий потік перевищує початкові та поточні витрати з урахуванням альтернативної вартості капіталу. У гірничій справі NPV застосовується для оцінки економічної ефективності видобутку корисних копалин у кар'єрах: враховуються витрати на розкривні роботи, придбання та утримання техніки, а також імовірні доходи від реалізації продукції (руди, концентрату тощо) [17].

Переваги критерію включають врахування часової вартості грошей, можливість інтегрувати різні сценарії та ризики через зміну ставки дисконту або окремих грошових потоків, універсальність застосування: критерій NPV підходить як для короткострокових, так і для довгострокових проектів.

В той же час має місце залежність від точної оцінки ставки дисконту: при некоректному виборі r результат може бути викривленим. Критерій не показує безпосередньо строку окупності проекту (запізнюється з індикацією ризиків, якщо основний дохід припадає на

пізні періоди). Найголовніша проблема полягає в уразливості до значних змін в оцінці початкових витрат або ціни реалізації корисної копалини.

Внутрішня норма дохідності вважається альтернативним до NPV критерієм, що показує ефективність проекту у вигляді відсотка (ставки дисконту). За IRR визначають, яку максимально допустиму вартість капіталу може витримати проект, аби залишатися беззбитковим [17].

$$\text{IRR } r: \sum_{t=1}^T \frac{CF_t}{(1+r)^t} = 0 \quad (1.3)$$

Якщо $\text{IRR} > \text{WACC}$ (середньозважена вартість капіталу), то проект варто реалізовувати, адже він принесе доходність, вищу за витрати на залучення капіталу. У гірничих проєктах IRR надає зручний поріг для швидкої оцінки інвестиційних можливостей, особливо коли планується залучати кредити чи інші зовнішні джерела фінансування.

Переваги:

1. Зручність для порівняння різних проєктів: IRR виражається у відсотках і легко інтерпретується.
2. Дає уявлення про “запас міцності” проєкту щодо коливань вартості капіталу.
3. Широко використовується в інвестиційному аналізі та банківській практиці.

Недоліки:

1. Можливість існування кількох значень IRR (за наявності нестандартних потоків коштів, де знаки грошових потоків змінюються більше одного разу).

2. Не враховує масштабність проекту: два різні проекти можуть мати однакову IRR, але суттєво відрізняться за сумою початкових інвестицій і NPV.

3. Може бути недостатньо інформативним у порівнянні з NPV, якщо головним завданням є максимізація абсолютного прибутку.

Дисконтований період окупності визначає, скільки часу потрібно проекту, аби сумарні наведені доходи покрили всі інвестиції з урахуванням ставки дисконту [9, 16, 17]. Це важливо для гірничих підприємств, оскільки вони часто характеризуються великими початковими затратами та значним тимчасовим розривом до отримання перших суттєвих доходів.

Дисконтований період окупності (1.4) визначає, скільки часу потрібно проекту, аби сумарні наведені доходи покрили всі інвестиції з урахуванням ставки дисконту [9, 16]. Це важливо для гірничих підприємств, оскільки вони часто характеризуються великими початковими затратами та значним тимчасовим розривом до отримання перших суттєвих доходів.

$$DPP = \min \left\{ t \mid \sum_{\tau=1}^t \frac{CF_{\tau}}{(1+r)^{\tau}} \geq 0 \right\} \quad (1.4)$$

Чим менший дисконтований період окупності, тим швидше проект поверне вкладені кошти з поправкою на зміну вартості грошей у часі. У гірничих проектах це дає змогу врахувати ризики, пов'язані з довгою експлуатацією родовища чи з можливими змінами цін на корисні копалини протягом тривалого періоду [17].

Переваги:

1. Наглядно показує мінімальний горизонт планування, необхідний для повернення вкладених коштів.

2. Дозволяє оцінювати ризики, пов'язані з тривалістю інвестиційного циклу.

3. Добре підходить для проектів із високою невизначеністю в довгостроковій перспективі.

Недоліки:

1. Не враховує надходжень, отриманих після настання окупності (може ігнорувати вигоди, що настають пізніше).

2. Спрямований лише на критерій часу, а не на максимізацію суми прибутку (на відміну від NPV).

3. Залежить від точності прогнозів грошових потоків і ставки дисконту, що буває проблематичним при швидкозмінних умовах.

Таким чином, критерії NPV, IRR та DPP у сукупності дають комплексне уявлення про інвестиційну привабливість і ступінь ризику гірничого проекту. NPV забезпечує оцінку абсолютної вартості проекту з урахуванням дисконтованих потоків коштів; IRR дозволяє швидко порівняти дохідність проекту із витратами на капітал; DPP визначає часові рамки, коли інвестиції повертаються. У гірничій галузі, де значні фінансові вкладення поєднуються з тривалими термінами реалізації, використання цих показників у комплексі сприяє більш зваженому й надійному обґрунтуванню проектних рішень.

Хоча вони дають узагальнену грошову оцінку проектних рішень, їхнє застосування слід доповнювати врахуванням технологічних особливостей і виробничих характеристик, щоб уникнути однобічності й підвищити загальну надійність аналізу. У багатьох випадках фінансові критерії не відображають специфічних вимог до виробництва або ризиків, які можуть виникати в процесі відкритих гірничих робіт [16]. Проте застосування фінансових індикаторів залишається обов'язковим під час оцінки інвестиційної привабливості проекту, особливо на етапі його погодження з потенційними інвесторами чи банками.

Таким чином, критерії прийняття проектних рішень у гірничій галузі можна охарактеризувати як багатовимірні й взаємопов'язані, де Норми технологічного проектування [17] задають обов'язковий стандарт, а додаткові техніко-економічні, технологічні й фінансові критерії дозволяють деталізувати й адаптувати проект до конкретних умов. Комплексний підхід із використанням кількох груп критеріїв підвищує обґрунтованість рішень, сприяє ефективнішому плануванню ресурсів та знижує ризики недосягнення проектних показників, що засвідчують і сучасні міжнародні дослідження [2, 4, 6].

Зростання складності гірничих систем та коливання вартості ресурсів змушують переосмислити критерії оцінки проектних рішень. Традиційні фінансові показники (NPV, IRR тощо) хоч і дають узагальнене уявлення про економічну ефективність, однак не завжди відображають фактичну ресурсомісткість та продуктивність виробництва з погляду натуральних показників. У відкритих гірничих роботах важливо враховувати реальні витрати енергії, води, вибухових речовин та інших допоміжних матеріалів у розрахунку на тону видобутої сировини чи об'єм гірничої маси. Подібні критерії, виражені у натуральних одиницях (наприклад, кВт·год/т, л/т, м³/т), дають змогу точніше порівнювати різні технологічні схеми й визначати шляхи для оптимізації операційних процесів. Саме такий підхід сприяє раціональному використанню ресурсів, мінімізації втрат та підвищенню загальної стійкості гірничого підприємства в умовах динамічного ринку.

1.3. Критерій мінімуму енергетичних витрат як альтернативний критерій оцінки проектних рішень

Енергетичні методи оцінки проектних рішень виступають одним із найоб'єктивніших і водночас універсальних інструментів для

неупередженої оцінки технологічних та технічних аспектів, пов'язаних із застосуванням конкретної схеми розкриття в умовах відкритих гірничих робіт, адже вони дають змогу врахувати як кількісні, так і якісні показники витрат енергії при організації виробничих процесів. Важливо підкреслити, що зазначений науково-практичний підхід є доволі універсальним і вже давно знаходить застосування у різноманітних галузях людської діяльності, включно з машинобудуванням, енергетикою та іншими сферами, де пріоритетами стають ефективність і раціональне використання ресурсів.

У контексті гірничої науки одним із фахівців, хто послідовно впровадив і розвинув енергетичний підхід для специфічних умов відкритих гірничих робіт, був професор Ю.І. Аністратов [18]. На підставі всебічних теоретичних узагальнень та експериментальних досліджень він дійшов висновку, що саме енергетичний підхід відіграє вирішальну роль у процесі формування методології вибору оптимальних засобів комплексної механізації виробничих потоків у конкретному середовищі. Особливо це актуально як при реконструкції діючих кар'єрів з урахуванням зміни експлуатаційних параметрів, так і при проєктуванні нових кар'єрів, де завдання підвищення ефективності видобувних робіт нерозривно пов'язане із питаннями мінімізації загальних витрат енергії.

Використання енергетичного підходу дає змогу врахувати не лише особливості конструкції й технічні параметри обладнання, а й цілу низку природних та технологічних факторів, які відіграють вагомую роль у визначенні раціональної схеми розкриття. До природних чинників слід віднести фізико-механічні характеристики гірських порід, що зумовлюють навантаження на техніку й вибір методу розкривних робіт, а також кліматичні особливості конкретного регіону, топографічну будову місцевості й гідрологічні умови, які безпосередньо впливають на стійкість укосів і можливість водовідливу. У свою чергу, до технологічної

складової належать специфіка протікання виробничих операцій на кар'єрі, вибір відповідних систем розробки і схем розкриття, а також визначення оптимальних робочих параметрів гірничого та транспортного обладнання з метою узгодження продуктивності та економічної доцільності.

Таким чином, енергетичні методи дозволяють розглядати процеси відкритого видобутку корисних копалин у широкій системній перспективі, поєднуючи аналітичний підхід до оцінки витрат енергії з урахуванням природних і антропогенних обмежень. Саме такий комплексний аналіз, заснований на науково обґрунтованих методологіях, дає змогу розробити і впровадити ефективні схеми розкриття та обрати найбільш економічні й продуктивні технічні рішення, що врешті-решт підвищує конкурентоспроможність і стабільність роботи гірничих підприємств у довгостроковій перспективі.

Фундаментальна фізична концепція енергетичного підходу полягає в тому, що будь-який технологічний процес, який здійснюється в умовах відкритих гірничих робіт, може бути охарактеризований і кількісно оцінений за показником витрат певного виду енергії. Іншими словами, енергетичний аналіз охоплює не лише втрати та споживання енергії безпосередньо робочими органами гірничих машин (екскаваторними ковшами, відвалоутворювальними системами тощо), а й враховує взаємодію цих робочих органів з гірською породою, яка є об'єктом розробки. Внаслідок такої взаємодії породний масив зазнає якісних і кількісних змін, які можна простежити та оцінити з позиції енергетичних витрат.

У працях професора Ю.І. Аністратова підкреслено, що «витрата енергії залежить від технологічного процесу і зумовлюється властивостями гірської породи, її станом, а також ступенем зміни якості та стану в процесі впливу на гірську породу» [18]. У цьому контексті до

зміни якості належить перехід гірської маси з монолітного (масивного) стану в роздрібнений (розпушений), що відбувається під час операцій із руйнування масиву та виконання виймально-навантажувальних робіт. Зміна стану, своєю чергою, може бути проілюстрована процесом вертикального переміщення гірської породи, коли її початкове розташування суттєво відрізняється від кінцевого.

Слід зазначити, що низка фізичних характеристик гірської маси є динамічними, адже під впливом зовнішніх факторів та технологічних операцій вони зазнають трансформацій. Так, після розпушення масиву змінюється зв'язність гірської маси, а зі спливом часу й за наявності злежування зростає опір зануренню робочого органа (наприклад, екскаваторного ковша). Такі зміни можуть бути спричинені також температурними коливаннями та іншими кліматичними умовами, що накладає додаткові вимоги до параметрів гірничотранспортного обладнання й режимів його експлуатації. Крім того, низка властивостей гірської маси обумовлена особливостями застосованих технологічних рішень чи якістю виконання робіт на попередніх етапах: показовим прикладом є гранулометричний склад, ступінь розпушеності породи тощо, які можуть суттєво впливати на подальший вибір засобів навантаження та транспортування.

З огляду на це, професор Ю.І. Аністратов увів поняття технологічного енергопоглинання як «частини енергії, що витрачається на здійснення гірничих робіт і поглинається гірською породою під час зміни її стану в процесі виробництва» [18]. Такий підхід дає змогу не лише кількісно визначити енергетичні витрати, але й системно простежити, як саме енергія трансформується та в яких конкретних технологічних ланках вона втрачається чи поглинається. Розуміння цих механізмів є визначальним для удосконалення технологічних процесів, оскільки дає змогу розробити рекомендації щодо раціонального вибору

гірничого обладнання, оптимізації параметрів робочих циклів та поліпшення суміжних операцій, зокрема з урахуванням впливу природних і кліматичних чинників.

Частина енергії, що спрямовується на подолання опору гірської породи в перебігу різних технологічних операцій відкритих гірничих робіт, істотно відрізняється від фактичних енергетичних витрат, які враховують коефіцієнт корисної дії гірничих машин та суміжного обладнання [19]. Така витрата, власне, і є технологічним енергопоглинанням, котре може бути попередньо визначене за допомогою аналітичних розрахунків і покладене в основу підходу до вибору комплексної механізації кар'єрних технологічних потоків.

Слід відзначити, що формула загального питомого енергопоглинання для технологічного потоку включає послідовне підсумовування всіх витрат енергії, які виникають при виконанні буро-вибухових робіт, процесів екскавації гірського масиву, транспортуванні корисної копалини та породи усередині кар'єру, а також під час операцій відвалоутворення розкривних порід. У результаті така сукупна оцінка дає змогу визначити сумарну енергоємність основних стадій гірничого циклу та, відповідно, спростити порівняльний аналіз різних технологічних рішень.

Однак остаточний вибір варіанта комплексної механізації технологічного потоку (і, відповідно, облаштування кар'єру загалом) базується, як правило, не тільки на енергетичних показниках, а й на економічних міркуваннях. Зокрема, один із ключових критеріїв порівняння конкурентних схем організації робіт становить собівартість видобутку корисної копалини в реальних умовах експлуатації. У цьому сенсі енергетичний метод оцінки, розроблений професором Ю.І. Аністратовим, дозволяє більш системно та об'єктивно проаналізувати ресурси, необхідні для здійснення буро-вибухових,

екскаваційних, транспортних і відвальних операцій. Проте однієї лише оцінки енергопоглинання при вирішенні питання способу розкриття виявляється замало, адже це дає змогу розглянути переважно технологію виконання виробничих процесів, не охоплюючи ширшого контексту всієї технології відкритих гірничих робіт.

Для розуміння такої різниці доцільно звернутися до термінології. Технологія відкритої розробки корисних копалин розглядається як дві взаємопов'язані компоненти. Перша — це технологія виробничих процесів, яка охоплює способи організації та механізації основних і допоміжних робіт, зокрема комплексні рішення з видобутку, транспортування та складування корисної копалини чи розкривної породи. Друга — це власне технологія відкритих гірничих робіт, яку, згідно з визначенням [20], слід розуміти як «сукупність у часі й просторі кар'єру підготовчих, розкривних і видобувних операцій, включно зі способами прокладання гірничих виробок, схемами розвитку гірничих робіт у кар'єрі, способами розкриття та системами розробки». Зокрема, системи розробки описують порядок виконання розкривних і видобувних операцій, враховуючи їхню послідовність, обсяг і глибину.

Оскільки комплексна механізація виступає лише однією зі складових частин такої розширеної технологічної системи, кількісна оцінка енергетичних витрат виключно цієї складової не може відображати всю сукупність процесів, притаманних відкритим гірничим роботам. Іншими словами, навіть якщо показники енергопоглинання виявляться прийнятними з позиції виробничої технології, це ще не гарантує оптимального способу розкриття або високої загальної ефективності. Тому для досягнення об'єктивного результату насамперед слід зважати на цілісний набір техніко-економічних та експлуатаційних параметрів, а також на природно-кліматичні умови й геотехнологічні особливості кар'єру.

Отже, передумовою обґрунтованого вибору оптимальної технології відкритої розробки є послідовне визначення двох взаємопов'язаних напрямів: технології виробничих процесів та технології відкритих гірничих робіт. Перший напрям дає уявлення про організацію та механізацію основних операцій, а другий — про просторово-часову структуру робіт у межах кар'єру, включно зі способами розкриття та методами систем розробки. Лише інтегрований підхід, що розпочинається з аналізу енергоємності всіх базових процесів (буро-вибухові роботи, екскавація, транспортування, відвалоутворення), забезпечує можливість об'єктивно визначити загальну ефективність обраної технології. Такий системний погляд допомагає запобігти необґрунтованим втратам, мінімізувати собівартість видобутку та забезпечити стабільну роботу кар'єру впродовж усього експлуатаційного циклу.

РОЗДІЛ 2. АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ВІДКРИТИХ ГІРНИЧИХ РОБИТ КАР'ЄРУ ПРАТ «ІНГЗК»

2.1 Аналіз структури підприємства ПрАТ «ІнГЗК» та геологічної будови Інгулецького родовища

У найпівденнішій зоні Криворізького басейну, орієнтовно за тридцять кілометрів від центральної частини міста Кривий Ріг у південному напрямку, розташоване Інгулецьке родовище, що вирізняється переважним заляганням магнетитових залізистих кварцитів. Формування його геологічної структури здійснюється завдяки поєднанню архейських гранітів і мігматитів, а також різних метаморфічних порід криворізької серії, які належать до нижнього протерозою. Основу докембрійського комплексу вкривають багат шарові поклади глин, пісків, мергелів і вапняків палеогенового та неогенового періодів, а також четвертинні суглинки, чия сукупна товща може досягати приблизно сорока метрів. Ключовим мінерально-сировинним ресурсом цього родовища є магнетитові залізисті кварцити, які виступають вихідною базою для одержання різноманітних залізорудних агломераційних концентратів. Зокрема, виробляють магнетитовий залізорудний агломераційний концентрат із середнім вмістом заліза близько 63,7% та масовою часткою вологи 10,5%, а також магнетитовий залізорудний агломераційний концентрат типу МФД-1, де показник вмісту заліза перевищує 66,5%, а рівень вологи зберігається на позначці 10,5%. Вся номенклатура продукції, що випускається комбінатом, спрямовується на задоволення потреб металургійних підприємств усередині держави та, водночас, реалізується на зовнішніх ринках завдяки активному експорту [21-24].

У проміжку часу між 1961 та 1966 роками Інгулецький гірничозбагачувальний комбінат було введено в експлуатацію,

заклавши тим самим основу першої черги будівництва з річною потужністю приблизно 18 мільйонів тонн сирової руди. Цей етап став важливим початком у формуванні масштабної гірничодобувної інфраструктури, що зумовило розвиток виробничих потужностей для забезпечення активного видобутку та збагачення сировини [21-24].

У період між 1967 і 1970 роками відбулася реконструкція та розширення комбінату, які належали до другої черги будівництва, і дозволили довести його фактичну продуктивність до 30 мільйонів тонн сирової руди за рік. Наступним кроком у прогресі комбінату стало введення в дію третьої черги в 1975 році, що підвищило обсяги переробки сирової руди до 36,4 мільйона тонн на рік, а також дало змогу щорічно випускати приблизно 15,5 мільйона тонн готового концентрату [21-24].

У 1986 році, наказом №126 від 17.01.1986 року Міністерства чорної металургії СРСР, було затверджено проєкт першої черги розкриття та освоєння нижніх горизонтів кар'єру з тимчасовим коригуванням показників річної переробки руди до 34,5 мільйона тонн, а також зі зменшенням річного випуску концентрату до 14,1 мільйона тонн. Проте подальші зміни в економічному середовищі та ситуації на світовому ринку залізорудної продукції протягом 90-х років спонукали до перегляду початкових проєктних розрахунків і до зниження загальних обсягів виробництва концентрату.

На основі сформульованого технічного завдання, фахівцями інституту «Кривбаспроект» було розроблено «Комплексний проєкт реконструкції комбінату на період до 2010 року» (узагальнений комплексний висновок №21 ЦС «Укрінвестекспертизи» від 05.07.2001р.), що передбачав зменшення обсягів щорічного видобутку руди до 25 мільйонів тонн і випуску концентрату до 10 мільйонів тонн. У межах згаданого плану реконструкції передбачалося впровадження

низки локальних субпроектів, спрямованих на модернізацію технологічних процесів, підвищення ресурсозбереження та комплексне освоєння запасів родовища з метою підтримки належного рівня виробничої ефективності комбінату.

Починаючи з раних 2000-х років, зростання попиту на залізорудну сировину знову змінило ситуацію на ринку, зумовивши потребу у збільшенні обсягів випуску. У зв'язку з цим, у 2013 році Міністерство промислової політики України погодило річну потужність комбінату на рівні 14 мільйонів тонн концентрату. Вже у 2014 році ДП «Кривбаспроект» отримало завдання на розробку «Комплексного проекту поетапного розвитку гірничих робіт і переробки мінеральної сировини до кінця відпрацювання Інгулецького родовища». Згодом процес розроблення та узгодження цього масштабного проекту було успішно завершено, завдяки чому вдалося отримати позитивний висновок №256-2010/ЦБ (00-00055-09) Державної комплексної експертизи, а також відповідні дозволи та експертні висновки від профільних інспекцій.

Упродовж 2010–2012 років, з метою стабільного забезпечення кар'єру річною продуктивністю на рівні приблизно 38 мільйонів тонн руди, фахівці ДП «Кривбаспроект» на замовлення підприємства розробили робочий проект «Розширення кар'єру ВАТ «ІнГЗК» у південно-східному напрямку». У межах зазначеної розробки планується провести розширення кар'єру в бік південного сходу без потреби у відступі залізничного полотна на горизонті +40 метрів, причому всі технологічні заходи мають узгоджуватися з положеннями «Комплексного проекту поетапного розвитку гірничих робіт...». Одночасно передбачається продовжити гірничі роботи глибше позначки –390 метрів у південній ділянці кар'єру. Згаданий робочий проект отримав схвальну оцінку ДП «Укрдержбудекспертиза» (експертний

висновок №00-1651-15/ПБ від 31.10.2012 року) й був офіційно затверджений наказом №1333 по підприємству від 10.12.2012 року.

Паралельно з цим, спеціалістами ДП «ДПІ «Кривбаспроект» було виконано техніко-економічне обґрунтування «Визначення перспективних меж та продуктивності кар'єру ПАТ «ІНГЗК», покликане допомогти ухвалити подальшу стратегію розвитку підприємства й забезпечити якнайтриваліше використання родовища. У рамках цього ТЕО увага приділялася підтриманню потужностей виробництва комбінату та збереженню функціонування містоутворюючого підприємства, адже такі заходи мають ключове значення для економічного й соціального добробуту регіону [21].

З урахуванням потреб поточного року, планові показники, що стосуються обсягів видобутку руди та проведення розкривних робіт, було відкориговано з огляду на підвищення вмісту магнітного заліза в добутій руді: спочатку його планували на рівні 24,0%, та зрештою уточнили до 24,75%. Така оптимізація дає змогу досягти річної виробничої програми з випуску концентрату, не зменшуючи планового коефіцієнта розкриття (0,602 куб. м на тонну) [21].

Комплексна структура комбінату містить кілька ключових виробничих одиниць. По-перше, це кар'єр, призначений для видобування магнетитових залізистих кварцитів і сформований із виробничих екскаваторних дільниць, бурової дільниці, підрозділів з ремонту електрообладнання та шихтування руди, загальноцехової дільниці, маркшейдерської та геологічної служб, а також служби, що відповідає за контроль процесів зсуву гірських порід у межах кар'єру й на відвалах. Другою важливою складовою є цех технологічного автотранспорту, де зосереджені дві великовантажні автоколони самоскидів із вантажопідйомністю 130–136 тонн, ще одна автоколони для менших самоскидів вантажопідйомністю 30–45 тонн, колони

спеціальної автотехніки, дорожня дільниця для будівництва та ремонту внутрішньокар'єрних шляхів, а також дільниця тракторної техніки.

Подальшим елементом виробничого ланцюга є дробильна фабрика, що реалізує чотиристадійну систему дроблення та оснащена дробарками ККД-1500/180, КРД-700/100, КСД-2200/400 і КМД-2200/600 від виробників УЗТМ та НКМЗ. Уся ця технічна інфраструктура функціонує на циклічно-поточній технологічній основі. При цьому руда після дроблення до фракції 25–0 мм відправляється на рудозбагачувальну фабрику РЗФ-1, а матеріал розміром 400–0 мм спрямовується на РЗФ-2.

Рудозбагачувальна фабрика №1 спеціалізується на випуску концентрату, використовуючи трьохстадійну схему кульового подрібнення, розділену на 10 секцій, при цьому дрібно подрібнену руду завчасно збагачують за технологією сухої магнітної сепарації (СМС). Рудозбагачувальна фабрика №2 випускає концентрат ММС, застосовуючи двостадійний метод повного рудного самоподрібнення, а в її структурі діє виробнича дільниця, призначена для магніто-флотаційного збагачення концентрату. З метою вдосконалення якісних параметрів готової продукції концентрат ММС додатково проходить магніто-флотаційну обробку, внаслідок чого вміст заліза у ньому перевищує 66,5% (відповідно до затвердженої технологічної інструкції). Фабрика обладнана різноманітною технікою: флотомашини типу РИФ, контактний чан КЧ-30, насоси моделей LCC-R300, LCC-R200, LCC-M300, дешламатори МД-9, вакуум-фільтри ДОО-100 та згущувач СЦ 18 [23].

Завершальну ланку комплексу становить цех технічної води та шламового господарства (ЦТВШГ), покликаний забезпечити процес збагачення руди водними ресурсами та здійснювати гідравлічний транспорт і відвантаження відходів. Тут експлуатуються пульпонасосні

станції (ПНС), обладнані землесосними агрегатами марки 2ГРТ 8000/71 виробництва «Уралгідромаш», а також агрегатами високої продуктивності американського виробництва, зокрема LHD-49 та HHD-76. Усі ці машини та установки сукупно дають змогу оптимізувати процеси переробки руди й утилізації відходів, гарантують сталість технологічного циклу та підтримують високий рівень виробничої діяльності комбінату.

Залізничний цех виконує функцію транспортування розкривних порід за межі кар'єру, зокрема ділянка кар'єрного залізничного транспорту відповідає за організацію та контроль вивозки матеріалу, а також за вивантаження готового концентрату зі спеціально облаштованих складів і його відправку на станцію «Інгулець-Новий», що виступає складником зовнішньої транспортної мережі. Узгоджений та безперебійний процес роботи комбінату досягається завдяки належній взаємодії декількох допоміжних підрозділів, серед яких варто виділити автотранспортний цех, що забезпечує рухомий склад і технічний супровід, цех підготовки виробництва, цех мереж і підстанцій, який обслуговує електро- й енергозабезпечення, цех технологічної диспетчеризації та цех автоматизації технологічних процесів. Окрім цього, в структуру підприємства входить центральна комплексна лабораторія, яка здійснює контроль якості продукції та проводить низку дослідницьких заходів, а також низка інших допоміжних служб, покликаних підтримувати основні виробничі цикли на високому рівні.

Інгулецьке родовище магнетитових кварцитів простягається в межах крайньої південної частини Криворізького басейну та за своїм розташуванням належить до Лихманівського (Інгулецького) залізрудного району. Згідно з геологічними даними, зазначене родовище знаходиться в центральній зоні замкового вигину

Лихманівської синкліналі, охоплюючи також і північне продовження її східного крила (див. рис. 2.1).



Рис. 2.1. Положення Інгулецького родовища в межах Криворізького басейну [23].

Якщо рухатися далі на північ, у напрямку стику з основною частиною Криворізької структури, а саме з Південним залізородним

районом Кривбасу, можна простежити поступове переходження Інгулецького родовища в родовища багатих (дисперсногематит-мартитових) залізних руд та в кілька дрібніших залізородних ділянок, що утворюють Лихманівську залізородну смугу.

В адміністративному плані це родовище віднесене до Інгулецького району міста Кривий Ріг Дніпропетровської області. Його промислове освоєння та систематичний видобуток розпочався ще в 1961 році, коли Інгулецький гірничозбагачувальний комбінат заклав перші виробничі підрозділи й запустив процес переробки магнетитових кварцитів. За будовою залізородна товща родовища входить до складу витягнутої в південно-північному напрямку смуги метаморфічних гірських порід, яку можна спостерігати з боку західного схилу річки Інгулець. Сумарна довжина цього родовища сягає приблизно 5,3 кілометра, а його ширина варіюється в діапазоні від половини кілометра до 1,3 кілометра, що визначає просторову конфігурацію та масштабність розроблюваної території.

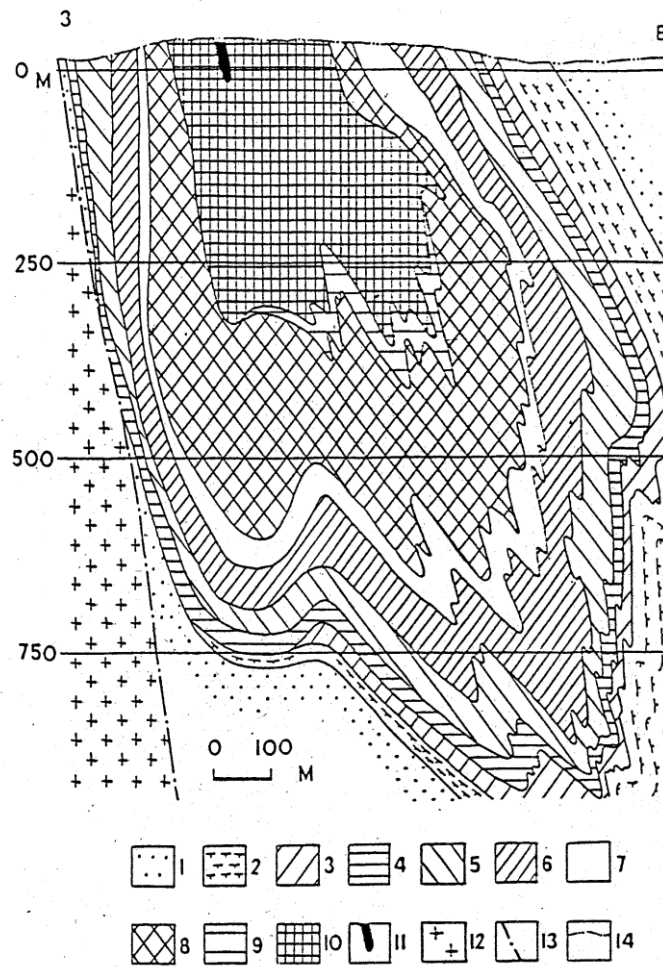


Рис. 2.2. Схематичний геологічний розріз Інгупецького родовища: 1-кварцити слюдисті PR_1sk_1 ; 2-сланці талькові PR_1sk_3 ; 3-сланці амфібол-біотитові PR_1sx^{1s} ; 4- кварцити магнетит-силікатні PR_1sx^{1f} ; 5- сланці амфібол-біотитові PR_1sx^{2s} ; 6- кварцити магнетитові і силікат-магнетитові PR_1sx^{2f} ; 7-сланці амфібол-біотитові PR_1sx^{3s-4s} ; 8-кварцити гематит-магнетитові і магнетитові PR_1sx^{4f} ; 9-кварцити з сланцями PR_1sx^{5s} ; 10- кварцити і джеспіліти PR_1sx^{5f} ; 11-багаті руди PR_1sx-gd ; 12-граніти і мігматити; 13 - розривні порушення; 14 - ерозійний зріз нижньопротерозойських порід [23]

2.2 Аналіз сучасного стану гірничих робіт і парку технологічного обладнання

Гірничі роботи в межах кар'єру просуваються в напрямку на північ, одночасно поглиблюючись і формуючи кінцеві обриси західного, східного та південного бортів. При цьому вже зараз східний борт частково виходить на остаточний контур приблизно до глибини -300 м, західний оформлюється в межах горизонту -180 м, а південний сягає значень близько -285 м. Така конфігурація обумовлена загальним напрямком посування гірничих робіт, а також вимогами до стабільності укосів, що визначаються розташуванням рудних тіл і структурними особливостями порід [21].

Відпрацювання горизонтів у більшості випадків виконується поперечними заходками, котрі покривають усю ширину рудоносного поля. Згідно з технологічними параметрами експлуатованого обладнання, а також беручи до уваги фізико-механічні характеристики гірських порід і накопичений досвід роботи на нині діючому кар'єрі, висоту уступів у пухких відкладах (наносах) встановлено в межах 12–14 м, а в скельних породах – 15 м. Окрім того, на проектному контурі в межах твердих порід передбачено можливість формування здвоєних уступів загальною висотою приблизно 30 м [21].

Оптимальна ширина робочих площадок, що влаштовуються як на рудних уступах, так і на розкривних уступах у скельних породах, розраховується з урахуванням кількості рядів свердловин, одночасно підриваних, а також з огляду на потенційний розвал гірської маси й потребу в безпечній розстановці технологічного обладнання. Як правило, вона становить від 40 до 60 м, однак проектні рішення встановлюють, що мінімально допустима ширина як робочих площадок, так і транспортних берм не повинна опускатися нижче відмітки 30 м.

Такий підхід дає змогу поєднати ефективність ведення гірничих робіт із дотриманням необхідних норм безпеки й забезпечити безперешкодний рух великовантажної техніки.

Для здійснення екскавації гірської маси в кар'єрі переважно експлуатують екскаватори ЕКГ виробництва Іжорського заводу (ЗАТ «ІРО Трейдинг») із місткістю ковша на рівні 8–12 куб. м. Допоміжну функцію з навантаження виконує фронтальний навантажувач моделі САТ-993К, а додаткову продуктивність забезпечують гідравлічні екскаватори бренду Hitachi, зокрема Hitachi-2500 і Hitachi-3600. Для проходження складних ділянок зі скельними породами застосовуються бурові верстати шарошечного типу УСБШ-250А, розроблені Криворізьким заводом гірничого машинобудування. Сумарні розрахунки щодо кількості цього основного гірничотранспортного устаткування, необхідного для досягнення передбачених на 2015 рік виробничих показників, наведено в окремих таблицях пояснювальної записки [21].

Із метою модернізації діючого технологічного гірничотранспортного парку, що частково вичерпав свій експлуатаційний ресурс, а також для успішного виконання планових завдань та підтримання робочої потужності комбінату, було розроблено спеціальну інвестиційну програму. Вона спрямована на проведення капітальних ремонтів, заміну зношеного обладнання й придбання нових одиниць техніки протягом наступного року, що забезпечить оновлення технічної бази та підвищить ефективність виробничих процесів [21].

Залізничне сполучення підприємства на початок 2022 року характеризувалося загальною протяжністю колій у розмірі 195,9 кілометра, з яких електрифікованих магістралей нараховувалося 127,5 кілометра. На цю ж дату локомотивно-вагонний парк було укомплектовано декількома типами тягового й вантажного обладнання. Зокрема, у розпорядженні підприємства перебувало 10 тепловозів

2ТЭ10, 4 тепловози ТЭМ2, а також 22 тягові агрегати ОПЭ1АМ. Серед вагонного складу наявні різні моделі для транспортування вантажів: 1 цистерна, 28 платформ, 18 хопер-дозаторів і 239 вагонів-самоскидів. Така організація залізничного транспорту дає змогу ефективно оперувати матеріальними потоками й забезпечувати необхідний рівень логістичної підтримки всіх виробничих процесів [3].

Таким чином, хоча в структурі парку гірничо-транспортного обладнання мають місце застарілі одиниці, загальна вікова структура обладнання досить рівномірна, що говорить про своєчасне списання і придбання технологічного обладнання.

2.3. Аналіз показників роботи гірничого обладнання кар'єру ПрАТ «ІнГЗК»

Аналіз технологічного обладнання кар'єру включає вивчення як кількісних, так і якісних параметрів роботи основних та допоміжних машин і механізмів, які забезпечують увесь цикл гірничих робіт – від розкриття порід до транспортування та переробки видобутої руди. Розглядаючи наведені дані щодо екскаваторів, бурових верстатів, залізничного та автотранспорту, важливо відзначити, що виробнича ефективність кожного елемента устаткування прямо впливає на загальні показники кар'єру [21].

Аналіз показників роботи технологічного обладнання кар'єру передбачає комплексне вивчення його продуктивності, надійності, енергоефективності та дотримання встановлених норм безпеки й екологічних вимог. На практиці це означає, що для кожного типу обладнання визначається низка кількісних та якісних параметрів, які дають змогу оцінити, наскільки повноцінно він реалізує потенціал, закладений виробником, і як устаткування інтегрується в загальний виробничий процес. Наприклад, екскаватори ЕКГ із ковшем місткістю 8–

12 м³ характеризуються головним чином обсягом гірської маси, котра виймається за одиницю часу (тонни або кубічні метри на годину), а також коефіцієнтом використання, який дає змогу з'ясувати, наскільки довго обладнання працює без простоїв і аварійних зупинок. Зі свого боку, гідравлічні екскаватори, такі як Hitachi-2500 чи Hitachi-3600, продемонструють дещо відмінну динаміку й параметри ефективності, зокрема менший час на цикл копання й вивантаження, кращу маневровість і підвищену гнучкість у роботі з різною твердістю порід [21].

Значну увагу також приділяють аналізу бурових верстатів, зокрема шарошечним УСБШ-250А. Для них оцінюється швидкість і рівномірність буріння, що безпосередньо впливає на подальшу організацію вибухових робіт і ступінь фрагментації гірської маси. Крім того, важливими є показники витрат паливно-мастильних матеріалів, обсяг ремонту бурових інструментів і ступінь зношеності основних конструктивних елементів, що зумовлюють витрати часу на обслуговування й позапланові зупинки. Схожий підхід застосовується під час розгляду фронтального навантажувача, для якого визначальною є тривалість повного робочого циклу: завантаження, транспортування, розвантаження та повернення на початкову позицію [21].

У залізничному господарстві й автотранспортному комплексі головними параметрами аналізу є протяжність колій, кількість задіяного рухомого складу, реальна пропускна спроможність, а також обсяги перевезеного вантажу за зміну або добу. Технічна готовність локомотивів і вагонів, час перебування їх у ремонті та відсоток порожнього пробігу виступають критеріями, які безпосередньо впливають на собівартість логістичних операцій і ритмічність роботи кар'єру загалом. Аналогічно й автотранспорт оцінюють за такими ознаками, як час одного завантажувально-розвантажувального циклу,

витрати пального на тонно-кілометр, а також загальний пробіг без відмов. Основні показники обладнання наведені у таблицях 2.1, 2.2.

Таблиця 2.1 – Показники роботи технологічного автотранспорту ПрАТ «ІНГЗК» за 2021р. (фактичні) та очікувані за 2022р [3].

№ за/п	Показники	2021р. (факт)	2022р. (очік.)	2022р. до 2021р.	
				+,-	%
1	Середньосписочна чисельність автомобілів всього, шт.	67,1	67,6	0,5	100,7
	в т.ч. а/с вантажопід. 120-136т	53,1	53,6	0,5	100,9
2	Обсяг перевезень, млн.тонн	72,9	71,6	-1,3	98,3
3	Середня відстань транспортування, км	3,189	3,462	0,273	108,6
4	Вантажообіг, тис.ткм	232,4	247,9	15,5	106,7
5	Середня тривалість роботи, час	20,12	19,90	-0,22	98,9
6	Коефіцієнти: технічної готовності	0,86	0,833	-0,03	96,9
	використання парку	0,808	0,786	-0,02	97,3
	використання пробігу	0,469	0,47	0,00	99,4
	використання вантажопідйомності	0,962	0,953	-0,01	99,0
7	Відпрацьовано машинозмін, всього	32 377	33 081	704	102,2
	в т.ч. а/с вантажопід. 120-136т	29 166	30 015	849	102,9
8	Виробка на 1 машинозмину всього, тонн	2 251	2 165	-86	96,2
	в т.ч. а/с вантажопід. 120-136т	2 455	2 340	-115	95,3
9	Виробка на 1 середньосписочний автомобіль всього, тонн	1 086 180	1 059 458	-26 723	97,5
	в т.ч. а/с вантажопід. 120-136т	1 348 482	1 310 204	-38 278	97,2
10	Виробка на 1 середньосписочний автомобіль всього, ткм	3 463 671	3 667 672	204 001	105,9
	в т.ч. а/с вантажопід. 120-136т	4 267 265	4 515 166	247 901	105,8
11	Витрати палива автосамоскидами вантажопідйомністю 120-136т, г/ ткм	93,7	92,8	-0,90	99,0

Додатково значущим аспектом є інвестиційна програма з оновлення основних фондів. Чим старіше обладнання, тим більші ризики позапланових простоїв, вищі витрати на ремонт і менша продуктивність. Планова заміна зношених вузлів чи придбання нових одиниць техніки не лише підвищує коефіцієнт використання обладнання за часом, а й дозволяє знизити загальні витрати енергії й витримати встановлені екологічні обмеження.

Таблиця 2.2 – Очікувані показники роботи залізничного транспорту ПАТ «ІНГЗК» за 2021р. та планові на 2022р [21].

№ п/п	Показники	2021р. (факт)	2022р. (очік.)	2022р. до 2021р.	2021р. (факт)
Обсяги перевезень залізничним транспортом					
1	Обсяг перевезень вантажу, всього, млн.т	54,3	56,2	+1,9	53,2
	у т.ч.- електротягою	38,4	40,3	+1,9	37,8
	- тепловозами	15,9	15,9	-0,0	15,4
	Гірничої маси, млн.т	38,4	40,3	+1,9	37,8
	у т.ч.- електротягою	38,4	40,3	+1,9	37,8
	- тепловозами	0	0	+0,0	0
2	Вантажообіг, млн.ткм	538,3	568,1	+29,8	544,7
	у т.ч.- електротягою	445,1	474,7	+29,6	454,0
	- тепловозами	93,2	93,4	+0,2	90,7
	Гірничої маси, млн.ткм	445,1	474,7	+29,6	454,0
	у т.ч.- електротягою	445,1	474,7	+29,6	454,0
	- тепловозами	0	0	+0,0	0
7	Витрати дизпалива, т	1 640,7	1 651,4	10,69	1 667,4
8	Витрати масла для дизелів, т	51,282	54,132	2,850	59,163
9	Питома витрата пального, кг/10 тис.ткм:				
	- зовнішнє коло	139,0	139,3	0,3	139,3
	- кар'єр	0	0	0	0

У такий спосіб підприємство може оптимізувати всю ланку гірничих робіт, починаючи від добування гірської маси, закінчуючи транспортуванням і переробкою руди.

Критеріями оцінювання, які найчастіше згадують у гірничодобувній практиці, вважають продуктивність (тонн/зміну або куб.м/год), коефіцієнт технічної готовності (відношення часу в роботі до загального календарного часу), рівень споживання паливно-енергетичних ресурсів на одиницю продукції та витрати на утримання й ремонт. Такі показники дають змогу отримати розгорнуту картину ефективності кожної операційної ланки кар'єру й приймати виважені рішення щодо

раціоналізації технологічних процесів. Утім, не менш істотною є безпека експлуатації, що охоплює стан запобіжних систем, зручність для оператора та загальний контроль за рівнем шуму, викидів і пилу. У сучасних умовах усе більшої ваги набувають також екологічні стандарти, які визначають припустимі рівні забруднення та регулюють умови утилізації відходів.

Варто зауважити, що попри значний набір класичних показників (продуктивність, собівартість, надійність, коефіцієнт використання), у низці випадків доцільно вдаватися до альтернативних критеріїв оцінки. Серед них особливої уваги заслуговує показник мінімуму спожитої енергії у перерахунку на кінцеву одиницю продукції, адже зосередження саме на енергоефективності часто відкриває додаткові резерви зниження витрат, зменшення шкідливих викидів і підвищення загальної стабільності виробництва. Такий підхід дозволяє з нових позицій поглянути на оптимізацію гірничих робіт і сприяє розвитку конкурентоспроможних технологій у гірничодобувній галузі.

РОЗДІЛ 3. ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІКИ ПАРАМЕТРІВ ЕНЕРГОЄМНОСТІ ТРАНСПОРТУВАННЯ ГІРНИЧОЇ МАСИ В УМОВАХ ГЛИБОКИХ КАР'ЄРІВ

Значна частина родовищ корисних копалин, які розробляються відкритим способом, обладнується автомобільними транспортними з'їздами, що проходять на всю глибину кар'єру, при цьому комбіновані транспортні рішення не знаходять свого застосування. Така організація транспортної системи переважно зумовлена необхідністю підтримання високих темпів зниження рівня гірничих робіт, що забезпечується завдяки багатоетапною структурою розробки. Зазвичай це передбачає до 5–6 етапів, на кожному з яких борти кар'єру розширюються на всю висоту. Така схема виключає можливість застосування більш економічно вигідних, хоча й капіталомістких, транспортних систем, зокрема конвеєрних ліній чи залізничних колій. Водночас ефективно освоєння цих родовищ із максимально повним залученням запасів залишається нагальним завданням, що вимагає подальших досліджень і вдосконалення технологічних рішень [25].

Обсяг гірничої маси, що залягає в межах контуру кар'єру, є залежним від його глибини та площі в плані. При цьому спостерігається закономірне зростання загального обсягу із поглибленням, яке має параболічний характер (рис. 3.1).

Однак розподіл об'ємів породи між горизонтами є нерівномірним: із збільшенням глибини обсяг кожного нижчого горизонту поступово зменшується, тоді як довжина транспортного маршруту та висота підйому гірничої маси до поверхні постійно зростають [19].

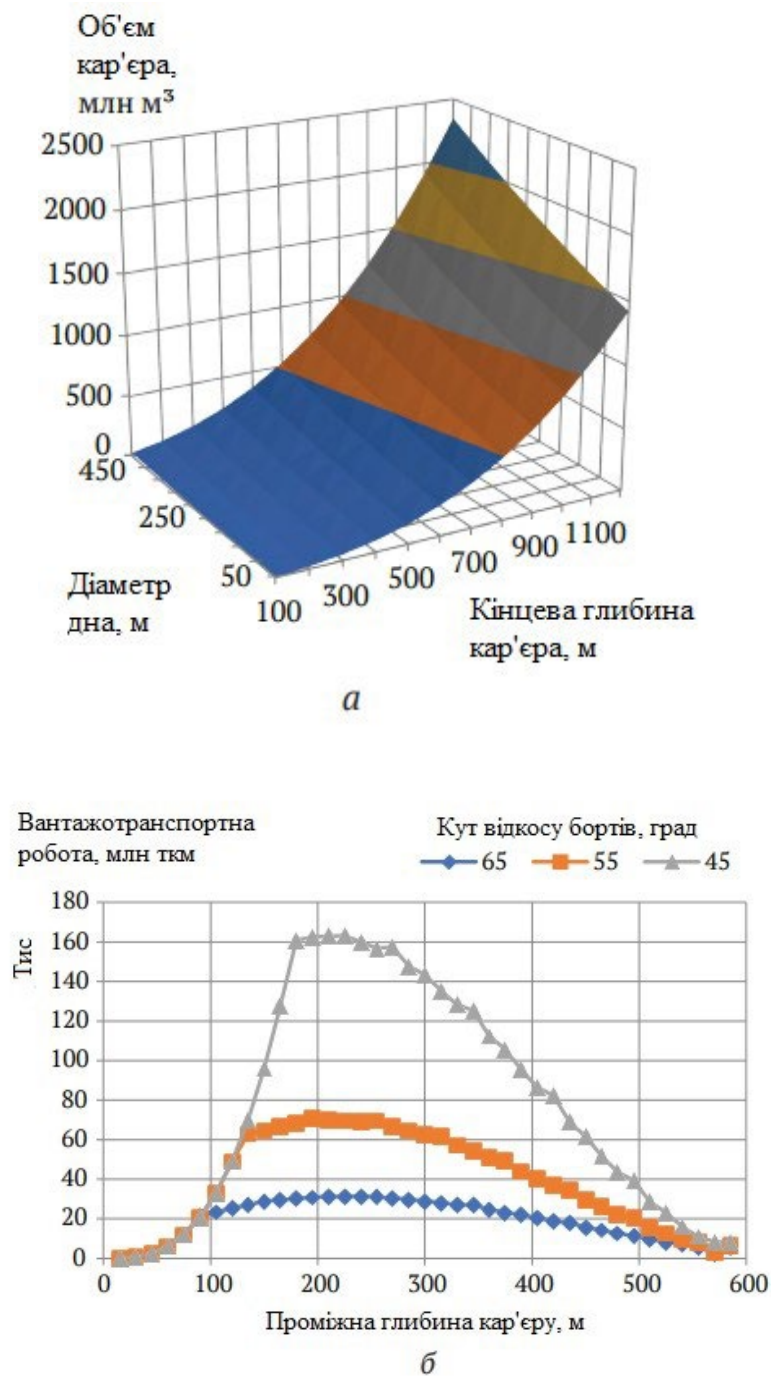


Рис. 3.1. Зв'язок між об'ємом гірничої маси та транспортною роботою в межах кар'єру округлої форми з урахуванням параметрів дна, глибини та кута нахилу бортів: а – графічна залежність об'єму гірничої маси від геометричних характеристик кар'єру; б – динаміка транспортної роботи залежно від глибини кар'єру за умови кінцевої глибини 585 м.

Сукупні обсяги транспортних робіт, що здійснюються у процесі експлуатації глибоких кар'єрів округлої форми, характеризуються складною залежністю, що спочатку демонструє зростання, а потім спадання. Це зумовлено зміною просторового розподілу гірничої маси та збільшенням відстані її транспортування із глибиною кар'єру. Наприклад, на рис. 3.1, б представлено графік, який побудовано без урахування вирівнювання обсягів видобутку між роками. З нього видно, що максимальні значення та інтенсивність змін тонно-кілометрової роботи значною мірою залежать від кутів нахилу бортів кар'єру. Зокрема, зі збільшенням цих кутів відбувається зменшення площі горизонтальних перетинів, що дозволяє скоротити обсяг транспортування породи. Однак це також призводить до зростання енерговитрат на підйом маси до поверхні через збільшення висоти підйому.

Методи оптимізації форми бортів кар'єру, спрямовані на забезпечення значних кутів нахилу, передбачають вдосконалення параметрів транспортних комунікацій у кінцевому контурі:

- створення вузьких транспортних берм, що досягається, зокрема, шляхом організації односмугових автомобільних доріг із чітким поділом руху завантажених та порожніх транспортних засобів. Такий підхід дозволяє мінімізувати займану площу без шкоди для ефективності транспортних операцій;

- проектування транспортних шляхів із підвищеним ухилом, що сприяє зменшенню потреби у значних просторових ресурсах для облаштування доріг та підвищує їхню функціональність у складних умовах розробки кар'єру;

- впровадження спеціалізованих транспортних засобів, які розташовуються безпосередньо на уступах і не вимагають створення транспортних берм. До таких рішень належать крутонахилені конвеєри,

скіпові підйомники, вантажні канатні дороги та інші види механізмів, що дозволяють значно знизити обсяги розкривних робіт та збільшити ефективність роботи кар'єру.

Для проведення порівняльного аналізу різних схем розкриття родовищ корисних копалин, які розробляються відкритим способом, за умов використання різних транспортних систем необхідно визначити універсальний критерій, що забезпечить об'єктивність оцінки. Вибір такого критерію є ключовим для оцінки техніко-економічної ефективності, оскільки він дозволяє враховувати вплив основних параметрів, зокрема глибини кар'єру, типу транспорту та конфігурації гірничих робіт.

Одним із найперспективніших підходів у цьому напрямі є використання енергоємності транспортування гірничої маси як основного критерію. Енергоємність, яка відображає сумарні витрати енергії на переміщення всього об'єму породи з кар'єру на поверхню, дозволяє інтегрально оцінювати ефективність різних схем транспорту та конфігурацій кар'єру. Такий підхід уже довів свою практичну цінність і наукову універсальність, що підтверджується низкою попередніх досліджень [19, 20, 25]. У цих роботах енергоємність розглядалася як важливий показник для оцінки процесів відкритих гірничих робіт та роботи гірничих машин, що підкреслює її значення як інструменту для системного аналізу.

Особливої уваги варто приділити тому факту, що проблематика енергоефективності зберігає свою актуальність протягом останніх двох десятиліть. Підвищення енергоефективності у сфері гірничих робіт є важливим завданням, яке дозволяє не лише знизити витрати на транспортування, але й мінімізувати загальні енергетичні витрати. Це, у свою чергу, сприяє раціональному використанню природних і технічних

ресурсів, зменшенню екологічного впливу та підвищенню економічної ефективності гірничодобувних підприємств.

У статті [19] розглядається питання енергоефективності обладнання, що використовується на відкритих вугільних розрізах. Дослідження аналізує технічні характеристики техніки та визначає можливості для зниження витрат енергії, підкреслюючи важливість раціонального підбору обладнання для підвищення економічної ефективності.

Матеріал [20] присвячений аналізу енергоефективності транспортних систем, зокрема використання внутрішньокар'єрних дробильних установок. У роботі наголошується на тому, що такі системи дозволяють суттєво зменшити енергоспоживання завдяки скороченню відстаней перевезення породи та зменшенню кількості транспортних операцій.

Стаття [26] досліджує питання впровадження інтелектуальних систем управління енергоефективністю у відкритих кар'єрах. У роботі порівнюються різні алгоритми прогнозування енергоспоживання, що дозволяє розробити більш оптимальні стратегії управління енергоресурсами.

У матеріалі [27] розглядаються шляхи підвищення енергоефективності шляхом зниження енергоспоживання автосамоскидів, які працюють у відкритих кар'єрах. Зокрема, дослідження фокусується на технічних характеристиках автосамоскидів і способах оптимізації їх роботи для скорочення витрат пального.

Стаття [28] описує інтегровану модель управління вугільним розрізом, спрямовану на покращення рішень щодо енергоспоживання. У роботі акцентується увага на комплексному підході до аналізу енергоефективності всіх етапів гірничого виробництва, що дозволяє розробляти стратегії для її оптимізації.

Матеріал [29] аналізує способи підвищення енергоефективності при транспортуванні сипучих матеріалів у відкритих кар'єрах. Зокрема, в роботі розглядаються сучасні рішення для оптимізації транспортних систем, які забезпечують економію енергоресурсів і підвищення продуктивності.

З огляду на вищезазначене, доцільно поєднати узагальнений підхід до оцінки транспортних систем у цілому з аналізом енергоефективності окремих видів транспортних засобів. Такий комплексний підхід дозволить визначити оптимальні рішення для підвищення енергоефективності гірничого транспорту та забезпечення економічної раціональності процесів видобутку.

Наступним важливим аспектом дослідження є визначення закономірностей змін відносної енергоємності транспортування гірничої маси з кар'єру на поверхню залежно від параметрів кар'єру. Це включає аналіз впливу глибини кар'єру, кутів нахилу бортів, а також площі дна на енергетичні витрати транспортних систем. Виявлення таких залежностей сприяє розробці оптимальних рішень для зниження витрат енергії.

Крім того, особлива увага має приділятися оцінці енергоємності транспортування гірничої маси за використання різних видів транспорту, зокрема при розкритті робочої зони кар'єру автомобільним транспортом. Такий підхід дозволяє визначити ефективність окремих видів транспорту та їхню здатність адаптуватися до специфічних умов експлуатації.

Зазвичай транспортування гірничої маси з робочої зони кар'єру на поверхню розглядається на кількох ієрархічних рівнях. Такий підхід забезпечує комплексність і системність аналізу. На кожному рівні враховуються ключові показники енергоспоживання, просторові параметри кар'єру, а також специфіка використання різних

транспортних систем. Результати цього аналізу створюють основу для розробки інтегрованих підходів до оптимізації транспортування, які враховують як технічні, так і економічні аспекти.

Таблиця 3.1 – Ієрархічні рівні дослідження енергоємності транспортування

Рівень розгляду енергоємності		Вираз для оцінки	Значимість
1	Енергоємність переміщення в одиницях потенційної енергії з урахуванням об'ємів рознесення бортів під розміщення транспортних комунікацій	$\frac{\Delta E_p}{\Delta E_{p0}}$	Вплив розносу бортів кар'єру для розміщення транспортних комунікацій з урахуванням їх параметрів на сумарну енергоємність (зазвичай основний вплив на сумарну енергоємність)
2	Енергоємність переміщення в одиницях фізичної роботи консервативних сил та зовнішніх дисипативних сил	$\frac{A_{d(T1)}}{A_{d(T2)}} = \frac{\Delta E_{p(T1)} + A_{d(T1)}}{\Delta E_{p(E2)} + A_{d(T2)}}$	При порівнянні видів транспорту: поряд із впливом параметрів транспортних комунікацій враховується енергоефективність рушія конкретного виду транспорту
3	Енергоємність переміщення з урахуванням показників енергоносія	$\frac{Q}{E_{p0}} = \frac{\{(\Delta E)_p + A_d\}q}{\Delta E_{p0}}$	1. Для конкретного виду транспорту: пошук оптимальної форми бортів кар'єру у проміжних та кінцевих положеннях, визначення раціональних параметрів розкривних виробок

			(ухилу та ширини транспортних берм тощо)
		$\frac{Q_{(T1)}}{Q_{(T2)}} = \frac{\{\Delta E\}_{p(T1)} + A_{d(T1)}q_{r1}}{(\Delta E_{p(T2)} + A_{d(T2)})q_{r2}}$	2. При порівнянні видів транспорту: вибір енергоефективного виду транспорту з урахуванням показників енергоносія (теплота згоряння палива, ККД генерації та передачі електроенергії тощо) та ККД енергосилової установки транспортних засобів

Примітки: де ΔE_p , ΔE_{p0} - енергоємність підйому гірничої маси (різниця потенційних енергій на поверхні кар'єру та в точці залягання) відповідно для кар'єра з транспортними комунікаціями (ΔE_p) та базового вироблення (ΔE_{p0}); A_d - робота на подолання дисипативних сил при переміщенні гірничої маси; T_1 , T_2 відповідно вид/модифікація транспорту 1 та 2; Q -повні енерговитрати на переміщення гірничої маси; а питома енергоємність вироблення та підведення до рушія транспортного засобу одиниці енергії енергосиловою установкою (наприклад, нижча теплотворна здатність палива з урахуванням ККД двигуна внутрішнього згоряння та трансмісії).

Дослідження, спрямоване на виявлення загальних закономірностей у геометрії кар'єрів, потребує використання спрощених підходів до розрахунків об'єму гірської маси. Для досягнення цієї мети запропоновано моделювати масив в межах контуру кар'єру як перевернутий усічений конус. Основний параметр, що впливає на геометрію такої моделі, – це середній кут укосу бортів кар'єру, який забезпечує стійкість гірського масиву.

При пошуку найбільш раціональних схем розкриття родовища та вибору оптимальної транспортної системи постала необхідність розробки ідеалізованої геометричної моделі кар'єру. У цьому контексті розглядається кар'єр без транспортних берм, у якому на бортах залишаються виключно берми безпеки. Кути укосів у такій моделі підібрані відповідно до граничних стійких значень, характерних для конкретних гірничотехнічних умов. Умовно ця модель отримала назву «базова». Вона служить основою для подальшого аналізу і порівняння геометричних характеристик кар'єру з реальними конструктивними рішеннями.

У ході дослідження було побудовано серію тривимірних моделей кар'єрів, у яких кути укосів бортів змінювалися у межах 35° , 45° , 55° та 65° . У межах кінцевих контурів цих моделей розташовували транспортні берми, геометрія яких відповідала параметрам типових транспортних засобів.

Ширина берм очищення в усіх моделях була прийнята постійною – 15 м, що відповідає стандартам безпеки та технологічним вимогам. У той же час ширина транспортних берм змінювалася залежно від типорозміру автосамоскидів і параметрів кар'єру. Було розглянуто два основних діапазони:

- Малі кар'єри: ширина транспортних берм складала 24,5 м, що відповідає використанню автосамоскидів із вантажопідйомністю 60–90 тонн. Ці параметри характерні для кар'єрів із меншою глибиною та обмеженими просторовими розмірами.

- Великі кар'єри: ширина транспортних берм становила 34 м, що забезпечує роботу автосамоскидів із вантажопідйомністю 130–160 тонн. Такі берми розраховані для обслуговування кар'єрів з більшою глибиною і виробничою потужністю.

Результати числового моделювання, представлені на рис. 3.2, демонструють, що додавання транспортних берм у вигляді спіральних з'їздів суттєво впливає на геометрію кар'єру. Зокрема, це призводить до зменшення кутів укосів бортів кар'єру. Ступінь зміни залежить від початкового базового кута укосу:

- Для кар'єрів із малими кутами укосів (35° – 45°) зменшення становить 2 – 3° .
- Для кар'єрів із великими кутами укосів (55° – 65°) зміни сягають 5 – 7° .

Зменшення кутів укосів бортів пов'язане з необхідністю забезпечення достатньої ширини для розміщення транспортної інфраструктури, що зумовлює перерозподіл об'ємів гірської маси в межах контуру кар'єру. Таким чином, впровадження транспортних берм створює додаткові обмеження на проектування геометрії кар'єру, що потребує врахування під час оптимізації технологічних схем видобутку.

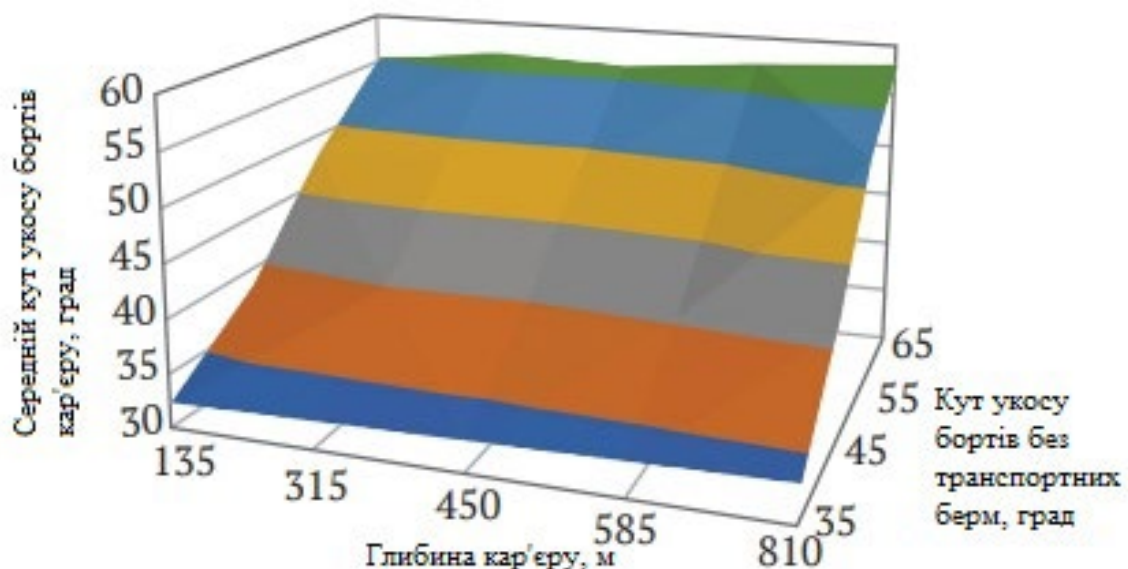


Рис. 3.2. Зміна кута укосу бортів округлого кар'єра під час розміщення на них транспортних берм під спіральні автомобільні з'їзди

У результаті аналізу отриманих даних були встановлені залежності між кутом нахилу бортів кар'єру та його глибиною, а також базовим кутом нахилу борту (див. табл. 3.2). Ці залежності стали основою для подальших розрахунків, що дозволило врахувати вплив геометричних параметрів кар'єру на енергоефективність транспортування породи. Отримані результати є ключовим елементом у розробці моделей, спрямованих на оптимізацію параметрів кар'єру та вдосконалення технологічних рішень.

Таблиця 3.2 - Залежності між кутом нахилу бортів кар'єру та його глибиною, а також базовим кутом нахилу борту

Параметри	Базовий кут відкосу бортів			
	35°	45°	55°	65°
Залежність кута відкосу від глибини кар'єру y	$0,0017H_k+32,17$ 8	$0,0034H_k+38,31$ 5	$0,0062H_k+45,89$ 7	$0,005H_k+58,57$ 1
Достовірність R^2	0,9866	0,785	0,7445	0,8747

Для врахування різноманіття кар'єрів за критерієм стійкості бортів були прийняті такі значення кутів нахилу для базових виїмок: 35°, 45°, 55° та 65°. Ці параметри забезпечують адекватне відображення умов експлуатації кар'єрів різної глибини та геометрії.

Теоретична енергоємність транспортування визначається як енергія, що витрачається на підйом усієї гірничої маси в межах контурів кар'єру. Ця енергія характеризується зміною потенційної енергії кожного елементарного об'єму між положенням у масиві та на поверхні. Розрахунки проводяться пошарово, оскільки горизонтальне

переміщення, згідно з прийнятими припущеннями, не впливає на зміну енергоємності (рис. 3.3).

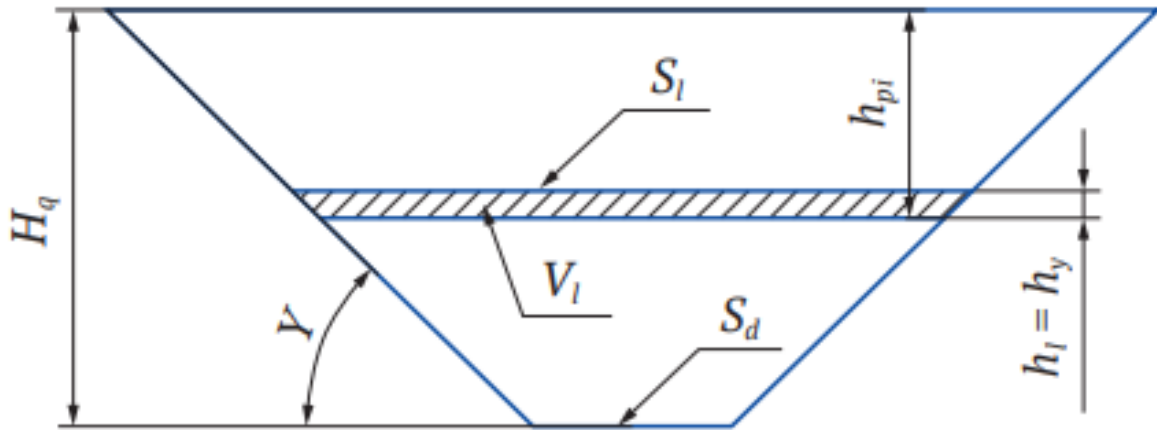


Рис. 3.3. Схема визначення обсягів виїмкових шарів у контурах кар'єру: S_1 – площа шару, m^2 ; S_d – площа дна, m^2 ; V_1 – обсяг шару, m^3 , h_1 – висота шару; h_y – висота уступу; h_{pi} – висота від верхньої позначки кар'єру до нижньої позначки шару; γ – кут нахилу борту, град; H_q – висота кар'єру

Відповідно, енергоємність транспортування гірничої маси з контурів кар'єру визначається:

$$S_1 = S_d + 2\sqrt{\pi S_d H_k} ctg\gamma - 2\sqrt{\pi S_d h_{pi}} ctg\gamma + \pi H_k^2 ctg^2\gamma - 2\pi H_k h_{pi} ctg^2\gamma + \pi h_{pi}^2 ctg^2\gamma \quad (3.1)$$

S_d – площа дна кар'єру, m^2 ; γ – середній кут відкосу бортів кар'єру, град; H_k – кінцева глибина кар'єру, м.

Відповідно, формулу визначення E_p – можна записати так:

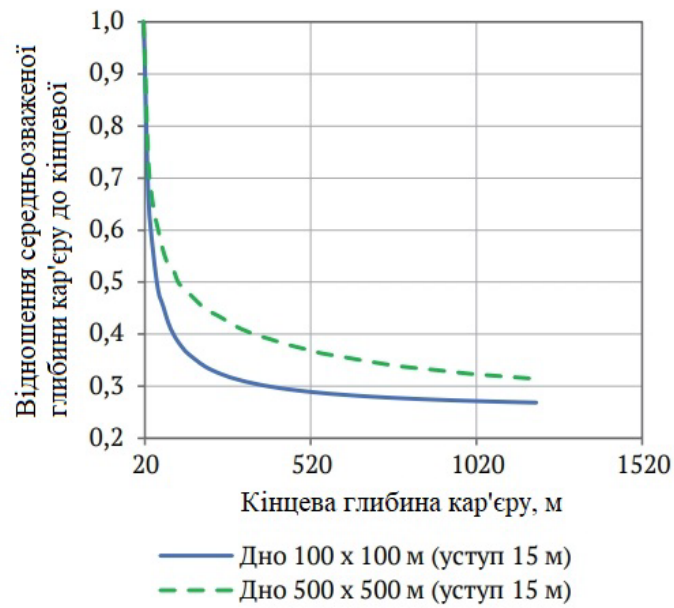
$$\Delta E_p = \int_0^{H_k} \rho g (S_d + 2\sqrt{\pi S_d H_k} ctg\gamma - 2\sqrt{\pi S_d h_{pi}} ctg\gamma + \pi H_k^2 ctg^2\gamma - 2\pi H_k h_{pi} ctg^2\gamma + \pi h_{pi}^2 ctg^2\gamma) dh_{pi} \quad (3.2)$$

Після всіх перетворень та інтегрування формула має наступний вигляд:

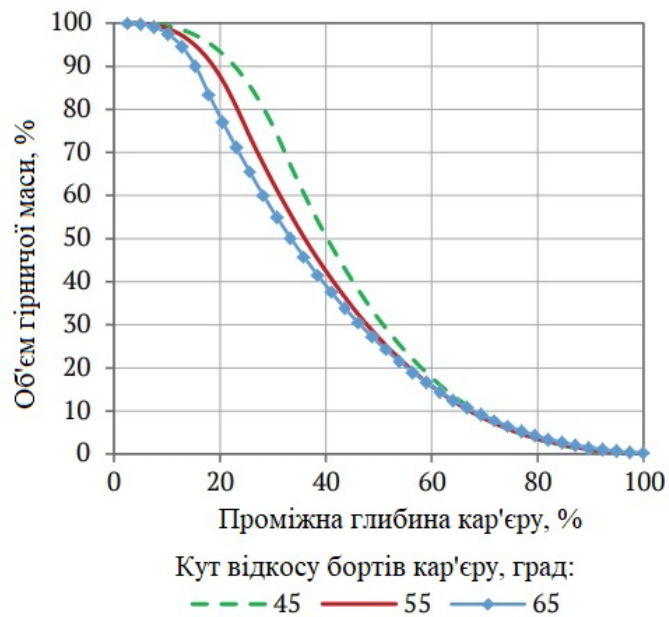
$$\Delta E_p = \rho g \left(\frac{\pi c t g^2 \gamma}{12} H_k^4 + \frac{\sqrt{\pi S_d c t g \gamma}}{3} H_k^3 + \frac{S_d}{2} H_k^2 \right) \quad (3.3)$$

Як було підкреслено раніше, визначальними чинниками у формуванні енергоємності процесів переміщення гірничої маси у межах кар'єрного простору є, з одного боку, просторовий розподіл обсягів породи в межах контуру кар'єру, а з другого боку — прогресивне збільшення витрат енергії на транспортування гірничої маси при поглибленні гірничих робіт. З огляду на це, для належного аналізу динаміки енергоємності за умови зміни конструктивних і параметричних характеристик кар'єру необхідно чітко оцінити вплив тих чи інших змін на положення так званого «центру мас» усього обсягу гірничої маси в межах контуру розробки.

Як свідчать дані, наведені на рис. 3.4, а, за умов, коли діаметр дна кар'єру становить 100 м, значення середньозваженої висоти підйому гірничої маси в процесах транспортування стабілізується приблизно на рівні 26–28% від загальної кінцевої глибини кар'єру, якщо остання перевищує 500–600 м. Натомість для кар'єрів з меншою кінцевою глибиною (порядку 200 м або менше) середньозважена висота підйому гірничої маси різко збільшується і, по суті, наближається до абсолютної глибини кар'єру.



а



б

Рис. 3.4. Закономірності зміни положення «центру мас» обсягу гірничої маси в межах контурів кар'єру залежно від його параметрів: а – співвідношення середньозваженої (за обсягом порід) глибини кар'єру до кінцевої глибини кар'єру; б – зворотний кумулятивний графік зміни обсягу гірничої маси в межах контурів кар'єру залежно від глибини.

Така поведінка пояснюється тим, що при відносно невеликих глибинах кар'єру основний обсяг породи зосереджується у нижніх горизонтах, що, відповідно, зумовлює істотне підвищення енерговитрат під час підйому гірничої маси на поверхню.

Подальше збільшення діаметра дна кар'єру викликає помітне зміщення граничної зони стабілізації висоти підйому гірничої маси у бік більших кінцевих глибин. Іншими словами, зі зростанням площі дна кар'єру та, відповідно, розширенням його просторової конфігурації, необхідна висота транспортування матеріалу переходить у фазу відносної стабілізації лише на значніших глибинах. Це можна пояснити тим, що збільшення ширини дна забезпечує більш рівномірний розподіл гірської породи по усіх просторових зонах кар'єру, зменшуючи відносні витрати енергії на підйом маси з нижніх рівнів.

Додатковий вплив на положення середньозваженої висоти підйому справляє кут нахилу бортів кар'єру. За даними рис. 3.4, б, зі зростанням кута нахилу бортів збільшується глибина, на якій розташовується центр ваги основної маси породи, тобто середньозважена висота підйому зміщується глибше в кар'єр. Цей ефект зумовлений тим, що крутіші борти зменшують площу верхніх горизонтів і водночас «ущільнюють» обсяг гірничої маси у нижніх зонах, що, врешті-решт, вимагає більшого вкладення енергії на транспортування породи з глибоких горизонтів до поверхні. Таким чином, із загостренням кута нахилу бортів кар'єру пропорційно зростає енергоємність видобувних робіт, пов'язаних із підйомом матеріалу на поверхню.

Розрахунки показали, що енергоємність переміщення гірничої маси, яка базується на різниці потенціальної енергії (див. табл. 3.1), є інтегральним показником, що відображає гірничо-геологічні умови та загальну схему розкриття родовища. Аналіз отриманих даних свідчить

про те, що зі збільшенням глибини кар'єру енергоємність транспортування зростає подібно до збільшення обсягу кар'єрного простору. Однак, як показали результати дослідження, темпи зростання енергоємності є вищими через підвищення енергозатрат на переміщення гірничої маси з глибших горизонтів.

На основі графічної залежності, наведеної на рис. 3.5, можна зробити висновок, що збільшення кутів нахилу бортів кар'єру призводить до закономірного зменшення обсягів породи, яка потребує транспортування. Це, у свою чергу, сприяє зниженню загальних енергетичних витрат на підйом гірничої маси. Водночас розширення діаметра дна кар'єру, навпаки, зумовлює зростання обсягів видобутої породи, що спричиняє підвищення сумарних енергозатрат на її транспортування.

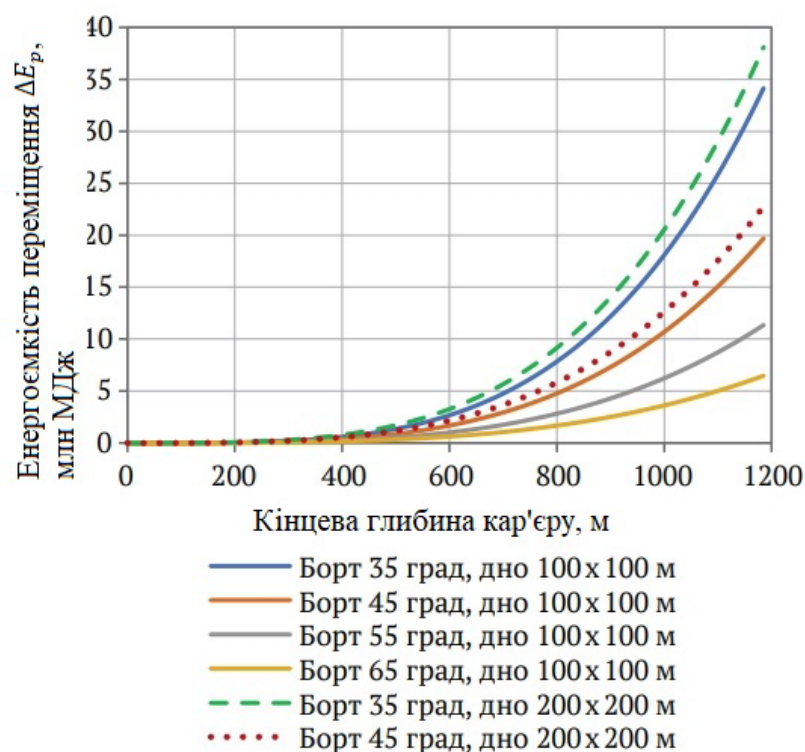


Рис. 3.5. Теоретична енергоємність переміщення гірничої маси ΔE_p у межах контурів кар'єру на поверхню

Таким чином, взаємозв'язок між геометричними параметрами кар'єру та енергоемністю переміщення гірничої маси вказує на необхідність оптимізації кута нахилу бортів і діаметра дна для зменшення витрат енергії при транспортуванні. Особливу увагу слід приділити глибоким кар'єрам, де темпи зростання енергозатрат є найбільш інтенсивними, що потребує розробки спеціальних заходів щодо зниження транспортних витрат на великих глибинах.

Ефективним інструментом для порівняльного аналізу різних схем розкриття кар'єру є показник відносної енергоемності. Вона визначається як відношення енергоемності переміщення загального обсягу гірничої маси для кар'єру з певною схемою розкриття (ΔE_p) до енергоемності, що відповідає кар'єру без застосування розкривних виробок (ΔE_{p0}). Використання цього показника дозволяє кількісно оцінити вплив розкривних робіт на обсяг гірничої маси, що підлягає переміщенню, а також на просторовий розподіл маси у межах кар'єру за глибиною.

Застосування відносної енергоемності як аналітичного показника дозволяє детально оцінити економічну доцільність різних схем розкриття, оскільки вона відображає сукупний вплив геометричних параметрів кар'єру та технологічних особливостей транспортної системи. Зокрема, цей показник дає змогу враховувати вплив транспортних виробок на розширення контурів кар'єру, що може значно змінити баланс обсягів гірничої маси на різних горизонтах.

Як свідчать результати розрахунків, представлені на рис. 3.6, залежність відносної енергоемності від кінцевої глибини кар'єру має чітко виражені максимуми. Ці пікові значення відповідають глибинам, на яких негативний вплив розташування транспортних берм на загальні параметри кар'єру є найбільш суттєвим. Збільшення кількості та розмірів транспортних берм веде до значного розносу бортів кар'єру,

що, у свою чергу, призводить до підвищення загальних енерговитрат на переміщення гірничої маси.

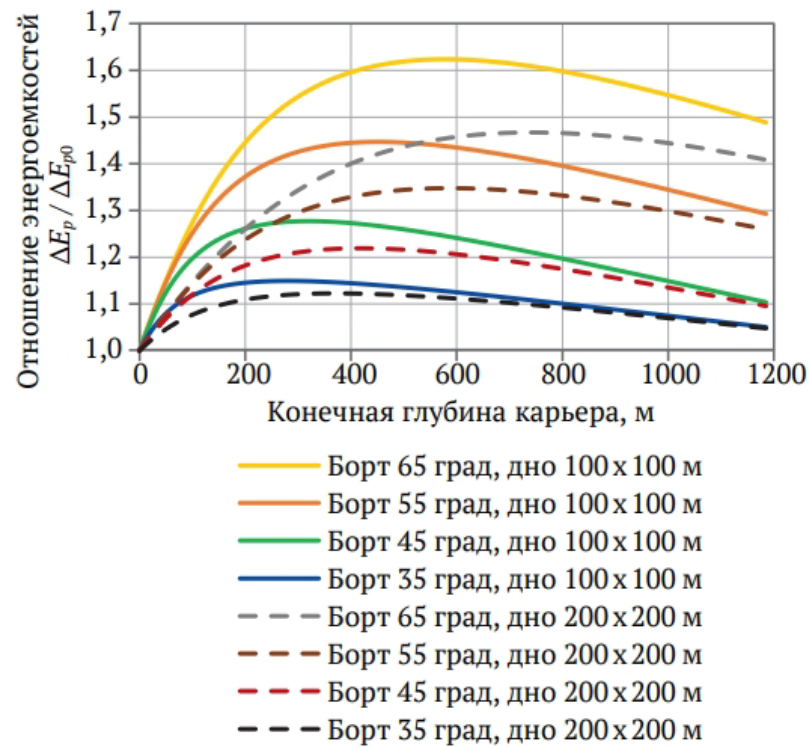


Рис. 3.6. Залежність відносної теоретичної енергоемності переміщення гірничої маси з кар'єру від глибини за різних параметрів кар'єру

Виявлена закономірність зміни відносної енергоемності переміщення гірничої маси є цілком «природною», оскільки безпосередньо впливає із геометричних особливостей кар'єрного простору. Саме тому кар'єри, що потрапляють до цієї групи, повинні підлягати обов'язковій оптимізації з метою підвищення ефективності гірничотранспортних робіт. Зменшення відносної енергоемності із подальшим збільшенням глибини пояснюється тим, що частка впливу розширення контурів кар'єру в загальному геометричному об'ємі зменшується. Водночас із ростом глибини спостерігається менш

виражене зниження кутів нахилу бортів, оскільки транспортні берми розподіляються по дедалі більшому периметру кар'єру.

Подібний ефект простежується і при збільшенні розмірів дна кар'єру: у цьому випадку відносна енергоємність знижується внаслідок більш рівномірного розподілу обсягів гірничої маси в межах розробки та зменшення середньої висоти підйому матеріалу.

Аналіз даних, представлених на рис. 3.7, свідчить про те, що зі збільшенням кутів нахилу бортів кар'єру, прийнятих у дослідженні як гранично стійкі, відносна енергоємність транспортування гірничої маси зростає незалежно від глибини кар'єру.

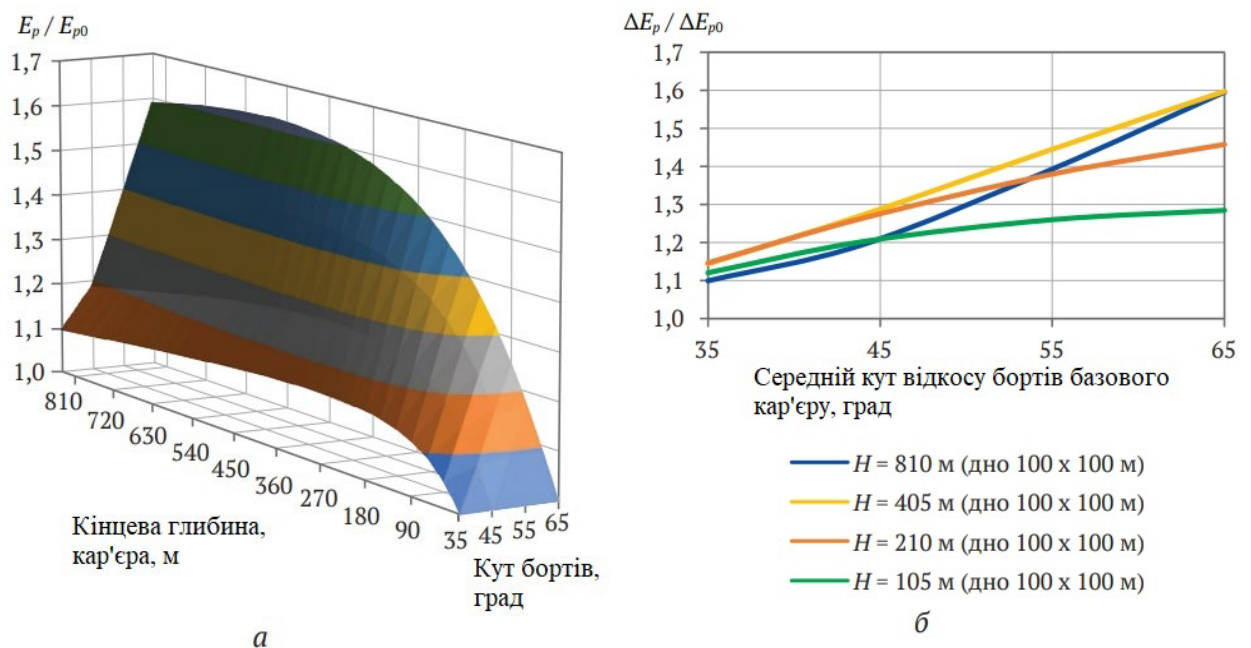


Рис. 3.7. Залежність відносної енергоємності переміщення гірничої маси ($\Delta E_p / \Delta E_{p0}$) від середнього кута нахилу бортів базового кар'єру (без урахування транспортних берм): а – узагальнений тривимірний графік, що відображає загальні закономірності; б – графічні залежності для окремих значень глибини кар'єру.

Проте характер цього зростання змінюється залежно від діапазону глибин:

- При невеликих глибинах темпи зростання відносної енергоємності є помірними та зменшуються в міру поглиблення кар'єру. Це пояснюється тим, що на невеликих глибинах обсяги гірничої маси розподіляються більш рівномірно, а транспортні витрати залишаються відносно сталими.

- У межах глибин від 400 до 500 м спостерігається майже лінійна залежність, що свідчить про стабільність темпів зростання енергоємності за рахунок збільшення довжини транспортних шляхів та висоти підйому маси.

- При подальшому поглибленні кар'єру графік набуває параболічної форми, що пояснюється нелінійним зростанням транспортних витрат через перерозподіл обсягів породи між горизонтами та зростанням відстані транспортування.

Таким чином, встановлені закономірності обумовлені взаємозв'язаними змінами в об'ємі кар'єрного простору та адаптацією транспортних маршрутів до нових умов. Важливо зазначити, що підвищення крутизни бортів потребує ретельного підходу до планування транспортної системи з метою запобігання надмірному зростанню енергоємності переміщення гірничої маси.

Значний вплив на рівень відносної енергоємності переміщення гірничої маси має діаметр дна кар'єру. При збільшенні діаметра дна відносна енергоємність загалом знижується порівняно з кар'єрами, що мають менший діаметр дна (рис. 3.8). Це зумовлено тим, що розширення нижньої частини кар'єру сприяє більш рівномірному розподілу гірничої маси та зменшенню середньої висоти її підйому, що, у свою чергу, дозволяє знизити загальні витрати енергії на транспортування.

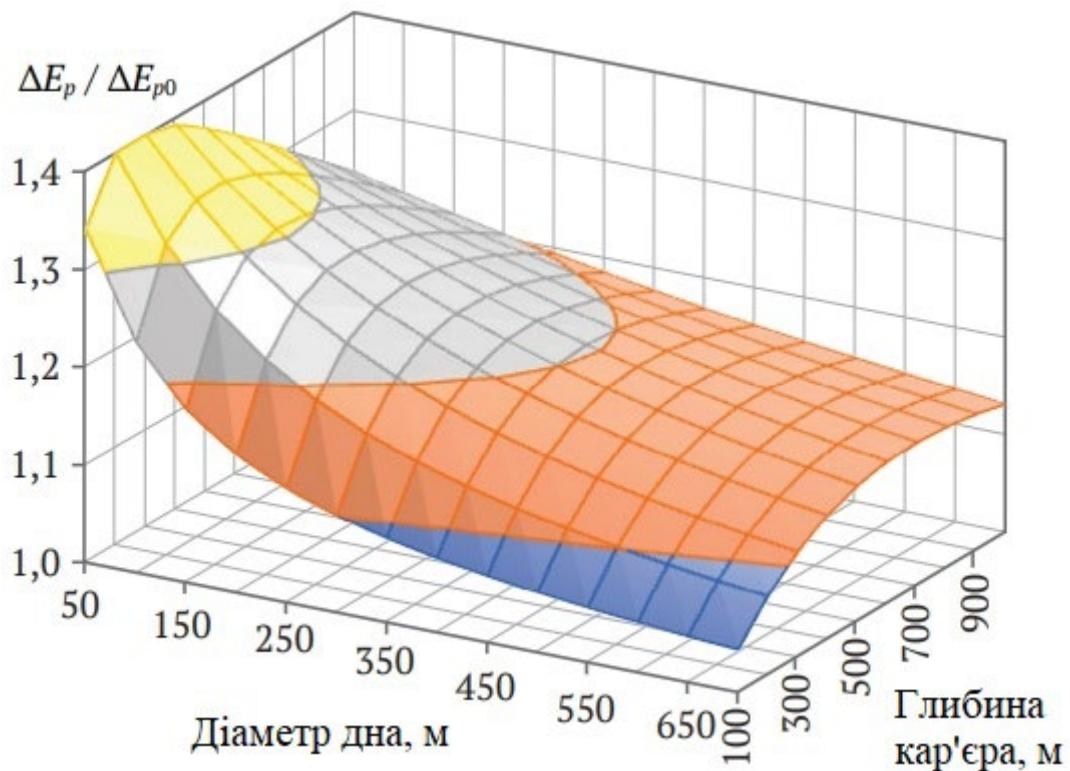


Рис. 3.8. Залежність відносної енергоємності переміщення гірничої маси ($\Delta E_p / \Delta E_{p0}$) від глибини кар'єру та діаметра його дна для базового варіанта кар'єру зі середнім кутом нахилу бортів 45° .

Аналіз розрахунків свідчить, що у кар'єрах із малими розмірами дна максимум енергоємності транспортування гірничої маси спостерігається на глибинах від 100 до 500 м. У разі збільшення діаметра дна цей максимум зміщується в бік глибших горизонтів, досягаючи значень у діапазоні 500–900 м. Це свідчить про те, що найбільш значний негативний ефект, спричинений необхідністю розширення бортів кар'єру для облаштування транспортних шляхів, проявляється у кар'єрах із відносно невеликими розмірами дна в межах 50–100 м при глибинах до 500 м. У таких умовах розташування транспортних комунікацій на бортах кар'єру суттєво впливає на зростання загальних енергозатрат, що потребує ретельного аналізу

вибору оптимальної схеми розкриття та адаптації транспортної системи відповідно до змінних параметрів кар'єру.

Закономірності, описані вище, стосуються переважно теоретичної енергоемності переміщення гірничої маси, яка визначається виходячи з геометричних характеристик кар'єру. У реальних умовах суттєвий вплив на фактичні показники енерговитрат справляє вибір транспортної системи, що має певні енергетичні характеристики, обумовлені специфікою використання різних видів енергоносіїв, таких як дизельне паливо або електроенергія. Для забезпечення коректного порівняння різних видів транспорту необхідно привести їх до єдиних критеріїв оцінки енергоемності, що враховують як технічні, так і економічні аспекти експлуатації. Одним із підходів є визначення розрахункової роботи консервативних і дисипативних сил, які впливають на рушійну систему транспортного засобу. Такий підхід дозволяє оцінити втрати енергії, пов'язані з опором руху, тертям і нерівностями транспортного маршруту, що суттєво впливає на загальні енергетичні витрати під час переміщення гірничої маси.

Для коректної оцінки енергоемності необхідно також враховувати енергію первинного палива, визначену за його теплотворною здатністю, з приведенням до місця використання. Це включає аналіз особливостей енергопостачання, зокрема безпосереднє споживання дизельного пального автономними кар'єрними машинами або використання електроенергії, що постачається від стаціонарних електростанцій. Таким чином, забезпечення ефективного функціонування гірничотранспортної системи потребує комплексного підходу, що враховує геометричні параметри кар'єру, характер гірничотранспортних робіт і енергетичні характеристики застосовуваного обладнання. Оптимізація цих факторів дозволить знизити загальні витрати енергії та підвищити економічну ефективність розробки родовища.

Таблиця 3.3 – Питома енергоємність видобутку та передачі енергії до рушійної системи транспортного засобу енергосиловою установкою

Вид транспорту	Питома енергоємність за видами транспорту	
	МДж/МДж (робота сил на колесах транспортного засобу)	МДж/МДж (з урахуванням теплоти згоряння, ККД енергосилової установки та передачі від ЛЕП до транспортного засобу)
Відношення до показника енергоємності за табл. 1	$A/\Delta E_p$	$Q/\Delta E_p$
Автомобільний	2,39	8,78
Залізничний / Автомобільно-залізничний	3,01/3,51-2,54	5,79/7,09-8,61
Конвеєрний / Автомобільно-конвеєрний	1,77/3,33-2,18	4,99/7,69-6,42

У роботах [30-32] запропоновано альтернативний підхід до оцінки енергоємності транспортних систем, що передбачає приведення витрат енергоносіїв до єдиної порівняльної величини – кількості витраченого умовного палива, вираженого в г у.т./((т·м). Такий підхід є зручним для практичних розрахунків, оскільки дозволяє оперувати натуральними показниками, що легко піддаються інтерпретації. Водночас у рамках даного дослідження доцільніше застосовувати енергетичні одиниці вимірювання, які дозволяють здійснювати перехід до безрозмірних відносних показників, що значно спрощує аналіз ефективності різних транспортних схем у порівнянні. З цією метою в таблиці 3 наведено результати розрахунків, що ґрунтуються на комплексному врахуванні низки ключових параметрів.

У розрахунках було використано комплексний підхід, який включає кілька основних складових. По-перше, виконано тяговий розрахунок, що дозволяє визначити необхідні витрати енергії для подолання сил опору руху, враховуючи різні типи вантажного транспорту та умови експлуатації. По-друге, проведено розрахунок коефіцієнта корисної дії (ККД) трансмісії, що відіграє важливу роль у визначенні фактичних втрат енергії в системі приводу транспортних засобів. По-третє, використано усереднені довідкові значення ККД двигунів, що дозволяє адекватно враховувати ефективність різних типів силових установок. Окрім того, при аналізі враховано низку теплотворну здатність палива, яка визначає кількість енергії, що може бути отримана в результаті згоряння одиниці енергоносія. Важливим етапом дослідження є також розрахунок втрат енергії у лініях електропередач, що мають значний вплив на загальні показники енергоефективності при використанні електрифікованих транспортних систем.

Для електрифікованих видів транспорту, таких як залізничний та конвеєрний, розглянута схема енергопостачання передбачає використання газотурбінної міні-ТЕС, розташованої безпосередньо поблизу кар'єру. Такий підхід забезпечує мінімізацію втрат при транспортуванні енергії та підвищує загальну ефективність використання енергоресурсів у кар'єрі.

Однак слід зазначити, що отримані результати є усередненими та можуть зазнавати значних коливань залежно від конкретних гірничотехнічних умов. Серед основних факторів, що впливають на показники енергоємності, можна виділити середньозважений ухил транспортної траси, дальність транспортування, особливості конфігурації транспортних комунікацій, а також фізико-механічні властивості гірничої маси. Усі ці аспекти потребують детального аналізу

під час проектування системи транспортування, оскільки вони безпосередньо впливають на витрати енергії та експлуатаційні витрати.

Практична перевірка запропонованої методики була здійснена шляхом порівняння ефективності комбінованих транспортних схем, зокрема автомобільно-залізничного та автомобільно-конвеєрного транспорту. В процесі аналізу було враховано геометричні параметри кар'єру, зокрема кут нахилу його бортів з урахуванням необхідності розміщення транспортних комунікацій. Додатково було досліджено залежність питомої енергоємності транспортування від висоти підйому гірничої маси, яка визначається глибиною кар'єру. Для зручності оцінки та порівняння отриманих даних результати розрахунків подано у вигляді відносного співвідношення енергоємностей (рис. 3.9).

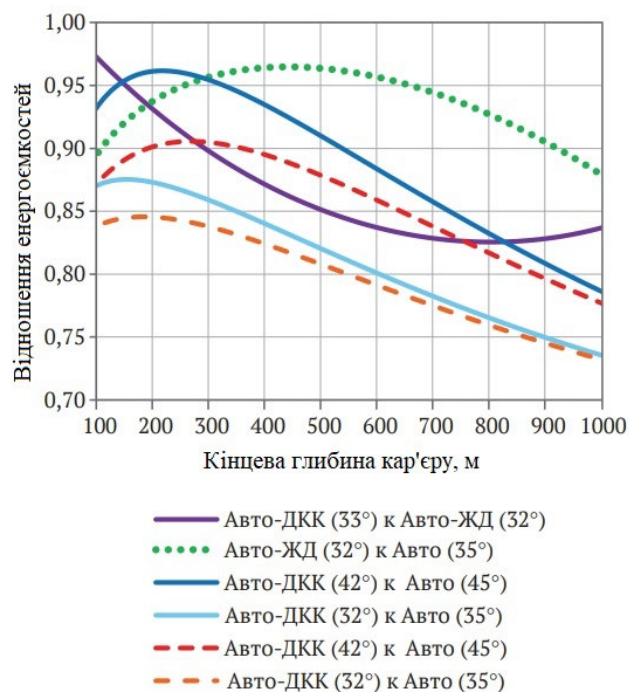


Рис. 3.9. Відношення повної енергоємності Q транспортування гірничої маси на поверхню кар'єру з урахуванням теплоти згоряння первинного палива за різними видами транспорту: Авто-Зал – автомобільно-залізничний транспорт; Авто-ДКК – автомобільно-конвеєрний транспорт. У дужках зазначено середній кут нахилу бортів кар'єру.

Менше значення цього відношення свідчить про більш економічну ефективність транспортної системи, розташованої в чисельнику. Це дозволяє здійснити обґрунтований вибір оптимальної транспортної схеми залежно від умов експлуатації кар'єру.

Таким чином, використання запропонованого підходу забезпечує комплексну оцінку енергоефективності різних транспортних систем у кар'єрних умовах. Це дозволяє не лише зіставити різні варіанти транспортування з точки зору енергетичних витрат, а й прийняти обґрунтовані рішення щодо вибору оптимального технологічного ланцюга з урахуванням експлуатаційних та економічних аспектів.

Аналіз отриманих результатів показує, що за заданих параметрів автомобільно-конвеєрний транспорт має нижчу енергоємність у всьому діапазоні глибин у порівнянні з автомобільно-залізничним та виключно автомобільним транспортом. Це досягається завдяки оптимізації геометричної форми бортів кар'єру та збільшенню їхнього кута нахилу в порівнянні із залізничним транспортом, а також нижчій питомій енергоємності конвеєрного транспорту, особливо порівняно з автомобільним.

Значення цієї переваги може бути додатково збільшене за рахунок оптимізації схеми розміщення конвеєрних ліній уздовж бортів кар'єру, що дозволяє мінімізувати загальні витрати на транспортування. Із збільшенням кінцевої глибини кар'єру, а також розширенням його нижньої частини комбіновані транспортні рішення демонструють вищу економічну ефективність у порівнянні з виключно автомобільним транспортом, що пояснюється зростанням сумарного обсягу гірничої маси, яка підлягає переміщенню.

РОЗДІЛ 4. ЕНЕРГЕТИЧНА ОЦІНКА ТРАНСПОРТУВАННЯ ГІРСЬКОЇ МАСИ В КАР'ЄРІ ПРАТ «ІНГЗК»

На основі запропонованого у розділі 3 підходу до оцінки транспортних схем за енергетичним критерієм та аналізу даних Інгулецького кар'єру, проведемо оцінку енергоємності транспортування гірської маси.

Геометричні параметри кар'єру:

- Глибина кар'єру: 440 м (проектна – 667 м)
- Довжина по поверхні: 3 450 м
- Ширина по поверхні: 2 100 м

Транспортна система

- Автомобільний транспорт:
- Самоскиди БелАЗ (вантажопідйомність 30-136 т)
- Середня відстань транспортування: 3,462 км
- Коефіцієнт технічної готовності: 0,833
- Залізничний транспорт:
- Локомотиви 2ТЭ10, ТЭМ2, ОПЭ1АМ
- Довжина залізничних колій: 195,9 км
- Коефіцієнт використання локомотивів: 70%

Виробничі параметри

- Обсяг видобутку руди: 34 млн т/рік
- Коефіцієнт розкриття: 0,602 м³/т
- Вантажобіг автомобільного транспорту: 247,9 тис. ткм
- Вантажобіг залізничного транспорту: 568,1 млн ткм

Для оцінки енергетичних витрат використовуємо три рівні аналізу:

- 1) Теоретична енергоємність (ΔE_p) – витрати енергії на підйом усієї гірської маси з врахуванням різниці потенційних енергій.

2) Енергоємність із урахуванням дисипативних втрат ($A/\Delta E_p$) – враховує вплив сил тертя, витрат на додання схилів.

3) Повна енергоємність ($Q/\Delta E_p$) – включає реальні характеристики транспорту, ККД двигунів і ефективність використання енергоносіїв.

Згідно з підходом, викладеним у розділі 3, середні енерговитрати на транспортування залізничним і автомобільним транспортом становлять:

Автомобільний транспорт: 9,89 МДж/МДж

Залізничний транспорт: 6,89 МДж/МДж

Автомобільно-залізничний: 8,09–8,39 МДж/МДж

Оскільки на Інгулецькому кар'єрі застосовується змішана схема транспортування, проведемо розрахунок середньозваженої енергоємності.

Розрахуємо повну енергоємність транспортування гірської маси для різних способів транспортування:

$$\Delta E_p = g \times \rho \times V \times h \quad (4.1)$$

де g — прискорення вільного падіння ($9,81 \text{ м/с}^2$);

ρ — середня густина руди ($3,2 \text{ т/м}^3$);

V — річний обсяг видобутку (34 млн т);

h — висота підйому (м).

$$\Delta E_p = 4,67 \cdot 10^{12} = 1,3 \text{ ТВт} \cdot \text{год}$$

Реальна енергоємність з урахуванням втрат становитиме:

$$Q = \Delta E_p \times \eta \quad (4.2)$$

η - коефіцієнт повної енергоємності для відповідного виду транспорту.

Для автомобільного транспорту: $Q = 4,62 \cdot 10^{12} \text{ Дж}$;

Для залізничного: $Q = 3,22 \cdot 10^{12} \text{ Дж}$;

Для автомобільно-залізничного: $Q = 3,78 \cdot 10^{12} \text{ Дж}$;

Для автомобільно-конвеєрного транспорту: $Q = 2,81 \cdot 10^{12} \text{ Дж}$.

Таким чином, автомобільно-конвеєрний транспорт має найнижчу енергоємність серед розглянутих варіантів, що робить його найбільш енергоефективним рішенням для транспортування гірничої маси на Інгулецькому кар'єрі.

З метою зниження енерговитрат доцільно впровадити комбіновану транспортну систему, де автосамоскиди використовуються для транспортування гірничої маси від місця видобутку до проміжного перевантажувального пункту, а далі матеріал переміщується конвеєрним або залізничним транспортом.

Методика оцінки енергетичних витрат транспортування гірської маси показала, що перехід на комбіновані схеми (залізничний та конвеєрний транспорт) дозволить значно зменшити енергоспоживання на Інгулецькому ГЗК. Запропоновані заходи спрямовані на підвищення економічної ефективності та зниження екологічного навантаження від гірничого транспорту.

Виконані розрахунки підтверджують, що при майбутньому формуванні транспортних схем необхідно намагатися збільшувати відстань транспортування саме конвеєрним транспортом.

ВИСНОВКИ І РЕКОМЕНДАЦІЇ

Встановлено, що визначення ефективності проектних рішень у відкритих гірничих роботах традиційно базується на техніко-економічних критеріях, таких як собівартість видобутку, капітальні вкладення та експлуатаційні витрати. Однак розглянутий у цій роботі енергетичний підхід дозволяє оцінити проектні рішення не лише з економічної, а й з фізико-механічної точки зору і дає змогу порівнювати варіанти транспорту за критерієм енергоємності, що є особливо важливим при розробці глибоких кар'єрів.

Питанням енергетичної оцінки проектних рішень в галузі відкритих гірничих робіт займалися такі науковці, як Авуах-Оффей К. П., Міллер Т., Саяді А., Хейдарі М., Саяді М., Кумрал М., Дауд П. А., Кецюевич В., Комльєнович Д., Гроувз В., Лебедев В. М., Ческідов В. П., Суорінені Ф. Т., Фіскор С., Канчіботла С., Курленя М. В., Танайно А. С., Паттерсон С. Р., Козан Е., Хайленд П., Пурхамадані Е., Багерпур Р., Тудешкі Х., Бхаппу Р. Р., Гузман Дж., Чаттерджі К., Мет'ю М., Саманта Б., Гусман Л., Варгас Дж. Д., Запата Дж., Мутомбо Т. К., Аністратов Ю. І., Аністратов К. Ю., Симоненко В. І., Хаддад Дж. С.

Стан гірничих робіт у ПрАТ «Інгулецький ГЗК» свідчить про необхідність впровадження енергетичного підходу при оцінці проектних рішень. Підприємство здійснює розробку родовища на значній глибині, що підвищує важливість вибору ефективної транспортної схеми. Використання автомобільного транспорту на великих глибинах спричиняє зростання енерговитрат через збільшення висоти підйому породи та довжини транспортних маршрутів. Дослідження показали, що комбіновані схеми транспортування (автомобільно-конвейєрні або автомобільно-залізничні) можуть значно знизити питомі енерговитрати

за рахунок скорочення загальної відстані перевезення та ефективнішого використання енергоресурсів.

1. Запропоновано застосування енергетичного критерію як альтернативного підходу для оцінки проектних рішень у відкритій розробці родовищ. Це дозволяє порівнювати варіанти транспортних схем з урахуванням їхніх енерговитрат, а не лише економічних параметрів.

2. Визначено закономірності зміни енергоємності транспортування у залежності від глибини кар'єру, ухилу бортів та вибору транспортної системи. Показано, що комбіновані транспортні схеми знижують енерговитрати порівняно з виключно автомобільним транспортом.

3. Розраховано повні енерговитрати на транспортування гірничої маси при різних схемах транспорту для Інгалецького кар'єру. Встановлено, що найбільш енергоефективними є комбіновані автомобільно-конвейєрні системи, які дозволяють мінімізувати висоту підйому та витрати на паливно-енергетичні ресурси.

Отримані результати можуть бути використані при проектуванні та модернізації гірничо-транспортних систем на підприємствах, що займаються відкритою розробкою корисних копалин. Запропонований підхід дозволяє не лише знизити енерговитрати, а й підвищити загальну економічну ефективність підприємства.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ:

1. Кузьмін В. М. Основи прийняття рішень у гірничій справі. Київ: Наукова думка, 2018. 312 с.
2. Bhappu R. R., Guzman J. Stochastic modeling in mining // SME Transactions. 1995. Vol. 298. P. 123–130.
3. Miller T. Minimizing energy use in mining. Dordrecht: Springer, 2001. 412 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-94-015-9749-6>.
4. Simon H. A. Administrative Behavior. Cambridge: Cambridge University Press, 1997. 368 p. DOI: <https://doi.org/10.1017/CBO9780511804095>.
5. Волошин О. Г., Пилипенко О. В., Кравченко В. І. Оцінка ризиків у гірничих проектах. Дніпро: НГУ, 2020. 256 с.
6. Keeney R. L. Decisions with Multiple Objectives: Preferences and Value Tradeoffs. Cambridge: Cambridge University Press, 1993. 596 p. DOI: <https://doi.org/10.1017/CBO9781139174084>.
7. Awuah-Offei K. P. Energy Efficiency in Mining: A Review of the Literature and Emerging Ideas // Mining Engineering. 2016. Vol. 68, No. 3. P. 51–59. DOI: <https://doi.org/10.19150/me.679>.
8. Sayadi A., Heydari M., Sayadi M. Evaluating Alternative Transportation Systems in Open-Pit Mines Using an Energy Efficiency Approach // Journal of Cleaner Production. 2019. Vol. 212. P. 493–507. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.12.064>.
9. Kumral M., Dowd P. A. Short-Term Optimization of Mining Operations Considering Energy Consumption Costs // Mining Technology. 2005. Vol. 114, No. 1. P. 25–36. DOI: <https://doi.org/10.1179/037178405X45409>.
10. Chatterjee K., Mathew M., Samanta B. Optimization of Load–Haul–Dump Mining System Based on Energy Consumption // Environmental

Earth Sciences. 2015. Vol. 73, No. 12. P. 7807–7819. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12665-014-3932-5>.

11. Guzmán L., Vargas J. D., Zapata J. Energy Consumption Assessment in Mining Projects Using the LCA Methodology // Resources Policy. 2020. Vol. 65. P. 101576. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2020.101576>.

12. Kecojevic V., Komljenovic D., Groves W. Energy Efficiency Analysis of Shovel-Truck Operations in Surface Mining // Journal of Mining Science. 2005. Vol. 41, No. 2. P. 131–136. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10913-005-0020-7>.

13. Nordhaus W. D. Energy and Economic Growth: The Role of Mining Efficiency // The Bell Journal of Economics. 1992. Vol. 23, No. 1. P. 56–76. DOI: <https://doi.org/10.2307/2353327>.

14. Mutombo T. K., Awuah-Offei K. P. Analysis of Energy Efficiency Opportunities for the Mining Sector // Journal of Sustainable Mining. 2014. Vol. 13, No. 2. P. 57–64. DOI: <https://doi.org/10.7424/jsm140206>.

15. Lebedev V. M., Cheskidov V. P. Energy Balance and Optimization in Open-Pit Mining Operations // Mining Industry Journal. 2018. Vol. 2, No. 4. P. 65–73. DOI: <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2018-2-4-65>.

16. Suorineni F. T., Fiscor S., Kanchibotla S. Energy Optimization in Mining Equipment Fleet Planning // Mining Engineering. 2021. Vol. 73, No. 5. P. 39–46. DOI: <https://doi.org/10.19150/me.738>.

17. Норми технологічного проектування відкритих гірничих робіт (НТП). Київ: Міністерство енергетики та захисту довкілля України, 2020. 172 с.

18. Anistratov Y. I., Anistratov K. Y. Classification of surface mining systems for the development of mineral deposits by energy input criterion // Russian Mining . - 2004. - № 6. - P. 11-15.

19. Symonenko V. I., Haddad J. S., Cherniaiev O. V. et al. Substantiating systems of open-pit mining equipment in the context of specific cost. *Journal of The Institution of Engineers (India): Series D*. 2019;100(2):301–305. <https://doi.org/10.1007/s40033-019-00185-2>
20. Purhamadani E., Bagherpour R., Tudeshki H. Energy consumption in open-pit mining operations relying on reduced energy consumption for haulage using in-pit crusher systems. *Journal of Cleaner Production*. 2021;291:125228. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125228>
21. Пояснювальна записка до плану розвитку гірничих робіт кар'єру ПрАТ «ІНГЗК» на 2022 рік; розроб. ДП «ДПІ «Кривбаспроект». – 2021. – 87 с.
22. Інструкція з безпечної організації та проведення масових вибухів свердловинних зарядів на відкритих гірничих роботах [Текст]. – Київ, 2014.
23. ПАО «ИнГОК». Расширение карьера ПАО «ИнГОК» в юго-восточном направлении [Текст] / розроб. ДП «Кривбаспроект». – 2010.
24. ПАО «ИнГОК». Комплексный проект поэтапного развития горных работ и переработки минерального сырья до конца отработки / розроб. ДП «Кривбаспроект». – 2006.
25. Kurlenya M. V., Tanaino A. S. Energy analysis of open-pit coal mining. *Journal of Mining Science*. 1997;33(5):453–462. <https://doi.org/10.1007/BF02765621>
26. El Maghraoui A., Ledmaoui Y., Laayati O. et al. Smart energy management: a comparative study of energy consumption forecasting algorithms for an experimental open-pit mine. *Energies*. 2022;15(13):4569. <https://doi.org/10.3390/en15134569>
27. Koptev V. Y., Kopteva A. V. Structure of energy consumption and improving open-pit dump truck efficiency. In: *IOP Conference Series: Earth*

and Environmental Science. 2017;87(2):022010. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/87/2/022010>

28. Patterson S. R., Kozan E., Hyland P. An integrated model of an open-pit coal mine: improving energy efficiency decisions. International Journal of Production Research. 2016;54(14):4213–4227. <https://doi.org/10.1080/00207543.2015.1117150>

29. Ristić L., Bebić M., Štatkić S. et al. Bulk material transportation system in open pit mines with improved energy efficiency. In: Proceedings of the 15th WSEAS International Conference on Systems. Corfu Island, Greece. 14–16 July 2011. Pp. 327–332.

30. Історія економічних вчень: навчальний посібник / за ред. В.В. Кириленка. – Тернопіль: Економічна думка, 2007. – 233 с.

31. Awuah-Offei K. Energy efficiency in mining: A review with emphasis on the role of operators in loading and hauling operations. Journal of Cleaner Production. 2016. Vol. 117. P. 89–97. DOI: 10.1016/j.jclepro.2015.12.016

32. Li L., Yang S. Optimization of shovel–truck system for surface mining using simulation and integer programming. International Journal of Mining, Reclamation and Environment. 2017. Vol. 31, No. 7. P. 465–479. DOI: 10.1080/17480930.2016.1273426