Слободянюк В.К.

Криворізький національний університет

Максимов І.І.

Криворізький національний університет

ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНИХ ПАРАМЕТРІВ ЦИКЛІЧНО-ПОТОКОВОЇ ТЕХНОЛОГІЇ В ГЛИБОКИХ КАР'ЄРАХ

Під час проектування схем розкриття глибоких кар'єрів на етапі попередніх досліджень потрібно визначати оптимальну кількість дробильно-перевантажувальних пунктів і порядок їх переміщення під час розвитку відкритих гірничих робіт. Це дає змогу знизити витрати на кар'єрний транспорт та зменшити потрібну кількість кар'єрних автосамоскидів.

Як критерій оптимізації автомобільно-конвеєрного транспорту використано економічний ефект, рівний різниці сумарних витрат на доставку гірничої маси до магістрального конвеєру при одному дробильно-перевантажувальному пункті та при їх оптимальній кількості. Установлено аналітичну залежність для визначення оптимальної кількості перевантажувальних пунктів при їх рівномірному розташуванні по висоті робочої зони кар'єру. Досліджено особливості зміни основних технологічних показників роботи кар'єрного автотранспорту залежно від кількості дробильно-перевантажувальних пунктів, розмірів і продуктивності кар'єру. Визначені умови одночасного використання декількох дробильно-перевантажувальних пунктів, їх оптимальна кількість і продуктивність, оцінена економічна ефективність використання технологічних схем із декількома перевантажувальними пунктами. Виконаними дослідженнями встановлено, що оптимізація кількості перевантажувальних пунктів приводить до зменшення кількості автосамоскидів на 50–60% порівняно з варіантом використання одного перевантажувального пункту. Збільшення кількості перевантажувальних пунктів з одночасним зниженням кількості автосамоскидів підвищує надійність роботи кар'єрного транспорту. Оптимізація кількості перевантажувальних пунктів знижує необхідну продуктивність кожної дробильно-перевантажувальної установки до 10–20 млн.т/рік. Зменшення необхідної продуктивності перевантажувального пункту дає змогу їх обладнати цюковими дробарками великого дроблення. Застосування мобільних дробильно-перевантажувальних пунктів не блокує запасів руди і не перешкоджає розвитку робочої зони.

Ключові слова: автомобільно-конвеєрний транспорт, концентраційний горизонт, дробильно-перевантажувальний пункт.

Постановка проблеми. Одним з основних напрямків розвитку техніки і технології відкритих гірничих робіт є вдосконалення циклічно-потокової технології. В останні десятиліття у світовій гірничій промисловості реалізовані проекти, для яких були розроблені нові конструкції дробильно-перевантажувальних пунктів і впроваджені крутопохилі конвеєри. Зарубіжний досвід відкритої розробки підтверджує справедливості ключових підходів до оптимізації схем розкриття глибоких кар'єрів, обґрунтованих у теорії гірничої справи [1-6]. Одним з важливих концептуальних положень теорії розкриття глибоких кар'єрів є принцип переваги, при рівності інших умов, схем розкриття, в яких частка електричної енергії в транспортуванні гірничої маси максимальна. Тенденції розвитку світової економіки спонукають інженерів до вишу-

кування комбінованих транспортних схем, що забезпечують мінімізацію транспортної роботи кар'єрного автотранспорту. Обґрунтування принципів оптимального розміщення в глибокому кар'єрі концентраційних горизонтів циклічно-потокової технології є важливою науково-практичною проблемою. Характерною особливістю глибоких залізрудних кар'єрів України є використання комбінованих транспортних схем на базі автомобільно-залізничного та автомобільно-конвеєрного транспорту. Місцезнаходження і конструкція перевантажувальних пунктів мають значний вплив на роботу кар'єрного автотранспорту і техніко-економічні показники відкритої розробки в цілому. У міру збільшення глибини кар'єрів збільшується відстань транспортування і витрати на кар'єрний транспорт. Для скорочення відстані транспортування гірничої маси

автосамоскидами і підтримки її на економічно доцільному рівні необхідно своєчасно переносити перевантажувальні пункти на більш глибокі горизонти.

Транспортні схеми українських залізрудних кар'єрів характеризуються великою питомою вагою технологічних схем ЦПТ з використанням підземних розкривних виробок і застосуванням стаціонарних дробильно-перевантажувальних пунктів, обладнаних конусними дробарками типу ККД. Підвищити ефективність гірничих робіт у глибоких кар'єрах може використання нестационарних перевантажувальних пунктів з автомобільного на конвеєрний транспорт та використання систем конвеєрного транспорту, здатних до швидкої адаптації до розвитку робочої зони кар'єру.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У роботах багатьох дослідників [5-8] аналізуються і узагальнюються технічні рішення, прийняті в проектах зарубіжних глибоких кар'єрів зі складними гірничо-геологічними умовами. Відзначається тривалий і цілеспрямований розвиток систем розкривних виробок у міру розробки родовищ (рис. 1).

Існує багато прикладів ефективного зниження витрат на кар'єрний транспорт за рахунок застосування системи підземних конвеєрних виробок (рис. 1), що розміщуються за межею перспективного контуру відкритих гірничих робіт [6]. У роботах [1-5] обґрунтовується необхідність і крок періодичного перенесення по висоті концентраційного горизонту. У той же час невирішеним завданням є обґрунтування раціональної кількості горизонтів, що експлуатуються одночасно. Використання декількох концентраційних горизонтів дозволяє значно знизити витрати на автомобільний транспорт і робить актуальною задачу визначення їх оптимальної кількості.

Формулювання цілей. Метою роботи є обґрунтування раціональної конструкції перевантажувального пункту і схеми розкриття кар'єру з використанням штولень, які погашаються в процесі розвитку гірничих робіт; розробка методики визначення оптимальної кількості та положення перевантажувальних пунктів комплексу циклічно-потокової технології, при якому досягаються мінімальні витрати на автомобільно-конвеєрний транспорт. З метою мінімізації витрат на кар'єрний транспорт розглядається випадок розташування дробильно-перевантажувальних пунктів на робочому борту кар'єра. Система конвеєрного транспорту в цьому випадку складається з двох основних підсистем:

- доставки дробленої гірничої маси від дробильно-перевантажувальних пунктів до камери перевантаження на підйомний конвеєр;
- підйому і доставки гірничої маси до пункту розвантаження на денній поверхні (передбачається, що весь потік гірничої маси від декількох дробильно-перевантажувальних пунктів транспортується на поверхню одним підйомним конвеєром).

При виконанні роботи вирішували наступні завдання:

- розробка методики визначення сумарних витрат на автомобільно-конвеєрний транспорт;
- дослідження особливостей зміни сумарних витрат в залежності від параметрів робочої зони кар'єру і кількості обслуговуючих її дробильно-перевантажувальних пунктів;
- аналітичні дослідження і аналіз меж переходу від одного перевантажувального пункту до двох, від двох до трьох;
- встановлення аналітичної залежності для визначення оптимальної кількості перевантажувальних пунктів при їх рівномірному розташуванні по висоті робочої зони.

Рис. 1. Розвиток системи підземних розкривних виробок на кар'єрі Palabora [6]

Виклад основного матеріалу досліджень. Однією з особливостей схем розкриття глибоких кар'єрів, яка не знайшла належного відображення в теорії гірничої справи, є взаємна орієнтація в просторі системи підземних розкривних виробок і напряму розвитку робочої зони кар'єру. Аналіз схем розкриття глибоких кар'єрів дозволив виділити дві крайні особливості у взаємодії схем розкриття і напряму розвитку робочої зони кар'єру, які дозволяють умовно розділити схеми розкриття з використанням підземних гірничих виробок на попутні і зустрічні схеми розкриття.

У разі попутних схем розкриття, напрямки розвитку робочої зони кар'єру і транспортування гірничої маси по головним розкривним виробкам протилежні: капітальні розкривні виробки і перевантажувальні пункти знаходяться на неробочому або тимчасово неробочому борту кар'єру та їх положення не створює перешкод для розвитку гірничих робіт. В даному випадку проблема збільшення відстані транспортування гірничої маси автосамоскидами від екскаваторних вибоїв до перевантажувальних пунктів вирішується за рахунок наближення перевантажувальних пунктів до робочої зони кар'єру. Альтернативою використання стаціонарних перевантажувальних пунктів є застосування перевантажувальних пунктів, обладнаних напівстаціонарними (напівмобільними) дробильними установками.

У разі зустрічних схем розкриття, напрямок розвитку робочої зони кар'єру в плані збігається з напрямком транспортування гірничої маси по підземним конвеєрним виробкам, тобто капітальні виробки і перевантажувальні пункти знаходяться в робочій зоні кар'єру та їх поточне розташування створює або буде створювати перешкоди для розвитку гірничих робіт. Зустрічні схеми розкриття в теорії і практиці відкритих гірничих робіт зустрічаються значно рідше [4]. В даному випадку невід'ємним і характерним елементом системи розкривних виробок буде підземна гірничавиробка (штольня), що примикає до виробленого простору кар'єру і погашається (вкорочується) у міру розвитку гірничих робіт. При використанні даного варіанту розкриття ефективність транспортної схеми буде залежати від конструктивних особливостей пересувних перевантажувальних пунктів, які розташовані в робочій зоні кар'єру, і від конструктивних особливостей гірничих виробок, що погашаються, та конвеєрів, що в них розташовано.

З огляду на особливості схем розкриття низки українських залізрудних кар'єрів [2; 3; 7], є мож-

ливим розглянути варіант реконструкції транспортної системи кар'єра на основі використання існуючих капітальних підземних виробок і перевантажувальних пунктів на денній поверхні.

Розглянемо загальний випадок. Глибокі горизонти кар'єра розкрито системою підземних гірничих виробок (похилі і вертикальні стволи, штольня), обладнаних конвеєрними підйомниками і розташованими під робочим бортом кар'єру. На час прийняття рішення стаціонарний дробильно-перевантажувальний пункт перешкоджає розвитку гірничих робіт і консервує під собою запаси корисних копалин. Будівництво нового стаціонарного дробильно-перевантажувального пункту нераціональне, оскільки відсутня можливість створити майданчик необхідних розмірів з терміном існування, що виправдовує витрати на будівництво дробильно-перевантажувального пункту. Виникнення подібної гірничотехнічної ситуації часто обумовлено гірничо-геологічними особливостями родовища, відсутністю в будові родовища сприятливих топологічних особливостей, які при перспективному плануванні можуть бути використані для створення майданчиків, придатних для розміщення перевантажувальних пунктів з тривалим терміном експлуатації.

Таким чином, актуальним завданням є розробка раціональних технологічних схем розкриття робочих горизонтів підземними гірничими виробками, що погашаються і які обладнано конвеєрами, розробка раціональних і ефективних конструкцій мобільних і напівстаціонарних перевантажувальних пунктів, визначення оптимальної кількості, положення і продуктивності перевантажувальних пунктів.

Одним з варіантів розв'язання задачі може стати спільне використання системи конвеєрів, розташованих в штольнях, мобільних конвеєрів і мобільних (напівмобільних) дробарок [6; 8; 9; 10].

Раціональним варіантом є використання мобільних дробарок і системи мобільних конвеєрів, які забезпечують транспортування гірничої маси з перевантажувального пункту до конвеєра в штольні, яка усікається. Це рішення дозволяє продовжити експлуатацію існуючого обладнання і споруд ЦПТ і скоротити відстань транспортування самоскидами завдяки розміщенню дробарки в робочій зоні кар'єру.

Пропонується наступна технологічна схема: на новому концентраційному горизонті створюється екскаваторний перевантажувальний пункт (рис. 2). Як устаткування перевантажувального пункту приймаємо екскаватор (навантажувач)

Рис. 2. Схема організації гірничих робіт на екскаваторному перевантажувальному майданчику: 1 мобільна дробарка; 2 мобільні конвеєри; 3 – полустационарний конвеєр, розташований на транспортній бермі; I, II, III – послідовні положення екскаватора, дробарки і системи конвеєрів в різні періоди роботи перевантажувального пункту. Стрілкою вказано напрям транспортування подрібненої скельної гірничої маси

з ємністю ковша $15-25\text{ м}^3$, мобільну дробильну установку Lokotrack LT-160 (LT-200) і три-чотири мобільних конвеєра Lokolink H12-36, які забезпечують рухливість мобільної дробарки щодо фронту гірничих робіт. По мірі переміщення екскаваторного вибою, переміщаємо мобільну дробарку і систему мобільних конвеєрів. При переході концентраційного горизонту на більш глибокі горизонти в технологічну ланку необхідно додати похилий конвеєр, що з'єднує мобільну групу і конвеєр в підземній гірничій виробці. Відмінними рисами цієї технології є: спільне використання системи мобільних і напівстационарних конвеєрів; використання перевантажувального пункту з мобільною дробильною установкою в робочій зоні глибокого кар'єру; скорочення довжини конвеєрної штольні в міру розвитку гірничих робіт.

Така конструкція перевантажувального пункту забезпечує незалежну роботу автомобільного та конвеєрного транспорту, дозволяє спростити організацію робіт по усіканню конвеєрної штольні. Недоліком схеми є додатковий екскаватор на перевантажувальному пункті. Але заміна екскаватора мобільним бункером з пластинчастим живильни-

ком зробить жорстким взаємозв'язок роботи автомобільного і конвеєрного транспорту.

Загальним недоліком конструкцій більшості перевантажувальних пунктів є необхідність перепідйому гірничої маси автосамоскидами на один уступ вище горизонту розміщення конвеєрного транспорту. Аналогічна проблема притаманна також для автомобільно-залізничного транспорту [9]. В роботі [10] наведено критичний аналіз конструкції дробильно-перевантажувального пункту з використанням приймального бункера для розвантаження самоскидів. Зазначено [10], що така конструкція зумовлює велику висоту дробильно-перевантажувального пункту і вимагає будівництва високих підпірних стінок для утримання навантажень від самоскидів. Це ускладнює і здорожує будівництво перевантажувального пункту. Крім того, велика висота перевантаження призводить до перепробігу автосамоскидів. Слепачом В.Й. [10] запропонована конструкція перевантажувального пристрою, яка характеризується експлуатаційною надійністю і відсутністю перепробігу автотранспорту. Приймальна ємність дробильно-перевантажувального пристрою виконана

у вигляді ковша. Задня стінка ковша відокремлена від нього і має форму циліндричної обичайки. Усередині циліндричної обичайки розташовується дробарка, над прийомним отвором дробарки в обичайці зроблено отвір. Ківш має можливість підніматися вгору, повертаючись навколо обичайки. Перевантажувальний пристрій може бути обладнано декількома ковшами. Запропоновано декілька конструкцій дробильно-перевантажувального пристрою, що відрізняються способом розвантаження самоскидом в ківш перевантажувального пристрою: без заїзду самоскида в ківш і з заїздом самоскида в ківш. Дробильно-перевантажувальний пристрій працює таким чином [10]: скельна гірнична маса кар'єрними автосамоскидами завантажується в ковші дробильно-перевантажувального пристрою, які за допомогою гідравлічного або канатного механізмів підйому, переміщують гірничу масу в приймальний отвір дробарки. З вихідного отвору дробарки гірнична маса завантажується на стрічковий конвеєр. До подібного рішення (рис. 3) також прийшли фахівці компаній FLSMIDTH і MAPLESOFT ENGINEERING [11].

Розглянемо можливі варіанти схеми розкриття з підземними гірничими виробками, що погашаються [12; 13]. Пропонований спосіб розкриття передбачає проходку похилих стовбурів і штولень, які оснащують конвеєрами. Штольні знаходяться під робочим бортом кар'єру. Поблизу устя штольні розташовують мобільний або напівстаціонарний перевантажувальний пункт (концентраційний горизонт). У міру розвитку гірничих робіт в кар'єрі довжина штولень буде зменшуватися, а перевантажувальний пункт переміщуватися.

Паралельно капітальній штольні розташовується штольня, яка періодично вкорочується.

Капітальна штольня обладнується стаціонарним конвеєром, штольня, що усікається, – пересувним конвеєром. Гірнична маса в камері перевантаження перевантажується з пересувного конвеєра на стаціонарний конвеєр.

Підземну гірничу виробку, яку погашають, обладнують одним перевантажним вузлом, а пересувний стрічковий конвеєр обладнують проміжним розвантажувальним пристроєм, який забезпечує перевантаження гірничої маси на стаціонарний конвеєр. Для зменшення обсягу прохідницьких і гірничо-капітальних робіт підземну гірничу виробку, яка буде погашатися, споруджують як продовження штольні зі стаціонарним конвеєром. На рис. 4.а показано фрагмент плану робочого борту кар'єру з гірничою виробкою, яка буде погашатися, яка обладнана одним перевантажним вузлом; на рис. 4.б – фрагмент плану робочого борту кар'єру з гірничою виробкою, яка буде погашатися, та яка є продовженням штольні зі стаціонарним конвеєром; на рис. 5 – поперечний розріз А А перевантажувального вузла.

Спосіб розкриття здійснюється наступним чином (рис. 4). При відпрацюванні крутопадаючого рудного тіла (1) проходять похилий стовбур (2), що переходить в штольню (3), обладнану стаціонарним конвеєром (4). Стовбур (2) і штольня (3) розташовані за межами проектного контуру кар'єра (11). З боку робочої зони кар'єру проходять штольню (5), яка погашається. Штольня (5) розташована паралельно штольні (3) і обладнана пересувним конвеєром (6). На концентраційному горизонті біля устя штольні (5) встановлюють мобільну дробильну установку (7). Перевантажувальний вузол (8) обладнують живильником (9), який встановлюють під кутом, що забезпечує

Рис. 3. Конструкція перевантажувального пункту (FLSmidth [11])

Рис. 4. Варіанти конструкції штольні, яка погашається [12; 13]

Рис. 5. Перевантажувальний вузол

перевантаження гірничої маси з пересувного конвеєра (6) на стаціонарний конвеєр (4). Перевантажувальний вузол (8) може бути обладнано проміжним розвантажувальним пристроєм, виконаним, наприклад, у вигляді плужкового зкидача 12 або двохбарабанного розвантажувального візка. У разі, коли гірничавиробка (5), яка погашається, є продовженням штольні (3) (фіг. 4б), проходять камеру (13), призначену для виведення пересувного конвеєру за межі робочої зони кар'єру.

Розкриття кар'єру здійснюється наступним чином. Гірничавиробка доставляється з робочих вибоїв на нестационарний перевантажувальний пункт. Гірничавиробка після дроблення надходить на пересувний конвеєр (6). Конвеєр (6) транспортує гірничавиробку до перевантажувального вузла (8) і перевантажує її за допомогою живильника (9) на стаціонарний конвеєр (4). При виробництві гірничих робіт в районі устя штольні (5) мобільний конвеєр (6) переміщують вглуб штольні, яка погашається (в тупик (10) або в камеру (13)), і здійснюють вибухові роботи і екскавацію гірничої маси. Після зачистки і укріплення устя штольні (5) конвеєр (6) встановлюють у вихідне положення. Пересувний конвеєр (6) переміщують кожного разу після відпрацювання нової екскаваторної заходки в глибину штольні (5) на величину кроку її погашення (показано пунктиром). Але при цьому місце перевантаження гірничої маси з пересувного конвеєра 6 на стаціонарний конвеєр залишається незмінним. При виробництві вибухових робіт в небезпечній близькості від конвеєра (6) його переміщують в штольню (5).

У порівнянні з традиційними для залізничних кар'єрів комплексами циклічно-потокової техно-

логії на базі стаціонарних дробильно-перевантажувальних пунктів, транспортні схеми з використанням конвеєрних штولень, які погашаються, і мобільних перевантажувальних пунктів мають істотні технологічні переваги: можливість скорочення відстані транспортування автомобільним транспортом і, як наслідок, зниження собівартості розробки гірничої маси і потреби в автосамоскидах; висока гнучкість і мобільність технологічної схеми, що дозволяє її перебудовувати з мінімальними витратами коштів і часу; компактність обладнання; можливість використання на вузьких робочих майданчиках; незначні обмеження на виробництво вибухових робіт (контурне і щадне підірвання в області штольні, яка погашається).

Розглянемо схеми комбінованого автомобільно-конвеєрного транспорту з одночасним використанням декількох концентраційних горизонтів. На прикладі одного і n концентраційних горизонтів виконаємо оптимізацію їх розміщення і визначимо сумарні витрати на автомобільно-конвеєрний транспорт. Витрати на доставку гірничої маси від перевантажувальних пунктів до основного конвеєра залежать від кількості концентраційних горизонтів, кута укосу борту кар'єра і робочих параметрів підйомного конвеєра (рис. 6).

Для всіх варіантів порівнюємо сумарні витрати на автомобільний транспорт від вибоїв до концентраційних горизонтів і на конвеєрний транспорт від перевантажувальних пунктів до підйомного конвеєра. Знаходимо сумарні витрати на автомобільний і конвеєрний транспорт (враховуємо

тільки витрати на переміщення гірничої маси автотранспортом на підйом).

Встановимо аналітичні залежності сумарної довжини конвеєрних штولень, що зв'язують концентраційні обрії кар'єра і підйомний конвеєр, який розташований в похилому стовбурі. Позначимо через H частину кар'єру по висоті, яку відпрацьовують на задану групу концентраційних горизонтів. Для спрощення завдання вважаємо, що у всіх розглянутих варіантах просторове положення осі похилого стовбура конвеєрного підйомника незмінне і мінімальна довжина штольні, яка з'єднує концентраційний горизонт і магістральний конвеєр дорівнює d , м (визначається інтенсивністю розвитку робочої зони і вимогами охорони праці).

З теорії гірничої справи [1-5; 14] відомо, що при заданій висоті робочої зони, що обслуговується одним концентраційним горизонтом, мінімальні витрати на автомобільно-конвеєрний транспорт досягаються при розташуванні перевантажувального пункту в центрі цієї зони по висоті.

Знаходимо сумарні витрати на автомобільний і конвеєрний транспорт для одного концентраційного горизонту (враховуємо тільки витрати на підйом гірничої маси):

$$Z_1 = 0,001Q \frac{H}{4i} \left(C_A + \frac{A}{q \cdot T_A} \right) + \left(0,001C_k \times Q + \frac{C_0}{T_k} \right) \times \left(d + \frac{H}{2} \left(\frac{1}{\operatorname{tg} \alpha} - \frac{1}{\operatorname{tg} \beta} \right) \right) + \frac{C_d}{T_d} \quad (1)$$

Розглянемо тепер m зон по вертикалі висотою H/m , обсяг автотранспортної роботи по вертикалі зменшується в m раз:

Рис. 6. Схема розкриття при використанні декількох концентраційних горизонтів (пунктирною лінією умовно відсікається мінімально допустима довжина конвеєрної штольні)

$$0,001m \frac{Q}{m} \frac{H}{4mi} = 0,001Q \frac{H}{4mi}, \text{ ткм.}$$

Довжини допоміжних конвеєрів утворюють арифметичну прогресію, їх загальна довжина становить:

$$\sum_{i=1}^m \ell_i = m \left[d + \frac{H}{2} \left(\frac{1}{\operatorname{tg} \alpha} - \frac{1}{\operatorname{tg} \beta} \right) \right], \text{ м.}$$

Загальна довжина конвеєрних штолень, які скорочуються, а значить і капітальні витрати на їх будівництво і оснащення конвеєрним обладнанням в m разів більше, ніж при одній точці зведення.

Загальні витрати складають:

$$Z_m = 0,001Q \frac{H}{4mi} \left(C_A + \frac{A}{q \cdot T_A} \right) + \left(0,001C_k \times Q + \frac{C_0}{T_k} m \right) \times \left(d + \frac{H}{2} \left(\frac{1}{\operatorname{tg} \alpha} - \frac{1}{\operatorname{tg} \beta} \right) \right) + m \frac{C_d}{T_d} \quad (2)$$

де Q – річна продуктивність області гірничих робіт, т/рік; C_A – собівартість транспортування гірничої маси автотранспортом, грн/ткм; A – вартість одного автосамоскиду, грн; q – річна продуктивність автосамоскиду, ткм/рік; T_A – нормативний термін експлуатації автосамосвала, років; H – висота області гірничих робіт, м; C_0 – капітальні витрати на один погонний метр додаткових конвеєрних виробок (враховує витрати на проходку, а також спорудження конвеєра), грн/м; T_k – період експлуатації допоміжних конвеєрних виробок, років; C_k – собівартість транспортування гірничої маси конвеєром, грн/ткм; d – довжина конвеєрної штольні, яка буде скорочуватися, м (визначається з урахуванням вимог безпеки та швидкості горизонтального посування борту кар'єру); T_d – період експлуатації дробильно-перевантажувального пункту, років; C_d – капітальні витрати на один дробильно-перевантажувальний пункт, грн; m – кількість дробильно-перевантажу-

вальних пунктів, шт; α – кут нахилу підйомного конвеєра, градус; β – кут нахилу робочого борту кар'єру, градус.

Як видно з формули 2, зі збільшенням кількості перевантажувальних пунктів витрати на автотранспорт зменшуються, а на конвеєрний транспорт збільшуються. Це свідчить про наявність оптимального значення параметра $m=m_0$, при якому сумарні витрати мінімальні.

Знаходимо оптимальну кількість концентраційних горизонтів, при якій мінімізуються загальні витрати (з рівняння $Z'_m=0$):

$$m_0 = \sqrt{\frac{0,001Q \frac{H}{4i} \left(C_A + \frac{A}{q \cdot T_A} \right)}{\frac{C_0}{T_k} \left(d + \frac{H}{2} \left(\frac{1}{\operatorname{tg} \alpha} - \frac{1}{\operatorname{tg} \beta} \right) \right) + \frac{C_d}{T_d}}}$$

Знаходимо сумарні витрати при оптимальній кількості концентраційних горизонтів $Z_m(m_0)$ і величину економічного ефекту:

$$F = Z_1 - Z_m(m_0) = \left[\sqrt{0,001Q \frac{H}{4i} \left(C_A + \frac{A}{q \cdot T_A} \right)} - \sqrt{\frac{C_0}{T_k} \left(d + \frac{H}{2} \left(\frac{1}{\operatorname{tg} \alpha} - \frac{1}{\operatorname{tg} \beta} \right) \right) + \frac{C_d}{T_d}} \right]^2$$

На рис. 7 наглядно показаний характер зміни сумарних витрат при збільшенні параметра m .

При $m=1$ сумарні витрати складають 21,4 млн.грн /рік, при $m=2$ сумарні витрати мінімальні і становлять 17,7 млн.грн /рік, а потім зростають і при $m>5$ стають більшими, ніж при одному концентраційному горизонті (зростання витрат на конвеєрний транспорт перевищує економію від зниження витрат на автотранспорт). Для продуктивності області гірничих робіт 20 млн.т/рік оптимальною буде схема з двома концентраційними горизонтами, при цьому сумарні витрати знижуються на 3,7 млн.грн / рік (17,3%). На рис. 8

Рис. 7. Зміна сумарних витрат зі збільшенням кількості концентраційних горизонтів ($Q=20$ млн.т, $H=200$ м, $d=400$ м)

Рис. 8. Зміна сумарних витрат для різної кількості перевантажувальних пунктів ($Q=40$ млн.т, $H=300$ м, $d=400$ м)

наведено графік зміни сумарних витрат для продуктивності робочої зони 40 млн.т/рік. Мінімальні витрати досягаються при 3-5 концентраційних горизонтах і знижуються з 55,3 до 35,8 млн.грн/рік (на 19,6 млн.грн/рік, або 35%). При цьому слід зазначити, що основна частка витрат знижується при переході від одного до трьох концентраційних горизонтів, а подальше їх збільшення ($m = 4-5$) знижує сумарні витрати несуттєво (менше 1%).

Проаналізуємо характер зміни сумарних витрат (і оптимальної кількості перевантажувальних пунктів) при зміні основних параметрів робочої зони – її висоти і продуктивності. На рис. 9 показано характер зміни сумарних витрат при збільшенні висоти робочої зони і кількості концентраційних горизонтів і з рисунка наочно видно наявність оптимальної кількості перевантажувальних пунктів, при яких сумарні витрати мінімізуються. При висоті робочої зони до 70 м оптимальною буде схема з одним концентраційним горизонтом, при $H = 100-250$ м – схема з двома концентраційними горизонтами (висота ділянки, яку обслуговує один горизонт, становить 50-125 м), а при $H = 300-600$ м – $m_0 = 3$ (висота ділянки, яку обслуговує один горизонт, становить 100-200 м). Чим вище висота робочої зони (при однаковій продуктивності), тим більше відстань між концентраційними горизонтами. На рис. 10 показано характер зміни сумарних витрат при збільшенні продуктивності області гірничих робіт і кількості концентраційних горизонтів. Тут ми також бачимо

наявність оптимальної кількості перевантажувальних пунктів. При $Q < 8$ млн.т/рік оптимальною буде схема з одним концентраційним горизонтом, при $Q = 8-20$ млн.т/рік – з двома, а при $Q = 20-30$ млн.т/рік – з трьома.

Чим більше продуктивність області гірничих робіт, тим більше як абсолютна, так і відносна ефективність від використання схем з оптимальною кількістю концентраційних горизонтів (рис. 11).

При продуктивності $Q=8-20$ млн.т/рік ($m = 2$) сумарні витрати знижуються на 6,7-21,1%. А при продуктивності $Q = 20-30$ млн.т/рік ($m = 3$) сумарні витрати знижуються на 23,3-30,9%. При подальшому збільшенні продуктивності області гірничих робіт $Q = 40-60$ млн.т/рік ($m = 4$) сумарні витрати знижуються на 35,3-41,2%, $Q = 65-90$ млн.т / рік ($m = 5$) сумарні витрати знижуються на 42,4-46,3%. При продуктивності 40-90 млн.т / рік раціонально використовувати схеми з чотирма і п'ятьма концентраційними горизонтами, але основна частина витрат знижується при переході від одного до трьох концентраційних горизонтів, а подальше їх збільшення призводить до зниження витрат на 2-5% і може бути не виправдана через ускладнення технологічних схем транспортування.

Для широкого діапазону продуктивності робочої області $Q = 20-90$ млн.т / рік і оптимальної кількості концентраційних горизонтів оптимальна продуктивність одного дробильно-перевантажувального пункту становить 10-15 млн.т / рік (рис. 12).

Рис. 9. Зміна сумарних витрат як функції двох змінних: висоти робочої зони (м) і кількості концентраційних горизонтів

Рис. 10. Зміна сумарних витрат як функції двох змінних: продуктивності робочої зони (млн т / рік) і кількості концентраційних горизонтів (шт.)

Рис. 11. Зміна абсолютних (млн.т/рік) та відносних (%) сумарних витрат для одного концентраційного горизонту (Z_1) і для оптимальної їх кількості

Рис. 12. Зміна оптимального кількості концентраційних горизонтів (m_0) і продуктивності (Q_D) кожного з них в залежності від продуктивності робочої області

Висновки та напрямки подальших досліджень. Виконано аналіз раціональних варіантів

конструкції перевантажувального пункту і схем розкриття кар'єру з використанням штولень, які погашаються в процесі розвитку гірничих робіт.

Виконані дослідження показали можливість значного зниження витрат на автомобільно-конвеєрний транспорт при одночасному використанні оптимальної кількості концентраційних горизонтів. У подальших дослідженнях необхідно врахувати вплив на оптимальну кількість концентраційних горизонтів інших можливих варіантів розташування системи підйомних конвеєрів, конструкцій перевантажувальних пунктів, технології гірничих робіт і параметрів гірничотранспортного обладнання. Розроблена методика буде використана при економіко-математичному моделюванні розвитку схем розкриття глибоких кар'єрів.

Список літератури:

1. Технологические параметры глубоких карьеров / М.Г. Новожилов и др. М.: Недра, 1982. 175 с.
2. Циклично-поточная технология добычи руды на карьерах Кривбасса / Б.Н. Тартаковский и др. Киев: Техшкола, 1978. 175 с.
3. Дриженко А.Ю. Відкриті гірничі роботи: підручник. Д.:НГУ, 2014. 590 с.
4. Технология открытой разработки месторождений полезных ископаемых. Часть 2. Технология и комплексная механизация открытых разработок./ М.Г. Новожилов М.Г. и др. М.: Недра, 1972. 552 с.
5. Яковлев В.Л. Теория и практика выбора транспорта глубоких карьеров. Новосибирск: Наука, 1989. 238 с.
6. Surface Mining (2nd edition), Society for Mining, Metallurgy and Exploration, Inc., Littleton, Colorado, 1990.
7. Дриженко А.Ю., Козенко Г.В., Рыкус А.А. Открытая разработка железных руд Украины: состояние и пути совершенствования. Полтава: Полтавский литератор, 2009. 454 с.
8. Перегрузочные пункты при автомобильно-конвейерном транспорте на рудных карьерах А.Г. Шапарь и др.; под ред. В.Т. Лашко. Днепропетровск: Поліграфіст, 2001. 138 с.
9. Слободянюк В.К. Аналіз і вдосконалення конструкцій перевантажувальних пунктів автомобільно-залізничного транспорту. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2019. Т. 30 (69), № 2 (2). С. 54-63.
10. Дробильно-перевантажувальний пристрій: пат. 18278 Україна: МПК E21C41/00. № 96062369; заявл. 17.06.96; опубл. 25.12.97, Бюл. № 6. 3 с.
11. Simulating a transfer station – Maplesoft Engineering solutions team helps FLSMIDTH develop revolutionary mining equipment. URL:<https://news.bulk-online.com/bulk-solids-handling-archive/simulating-a-transfer-station-maplesoft-engineering-solutions-team-helps-flsmidth-develop-revolutionary-mining-equipment.html> (дата звернення: 02.04.2021)

12. Спосіб розкриття при відкритій розробці родовищ корисних копалин: пат. 7187 Україна: МПК E21C41/26. № 2004108425; заявл. 18.10.04; опубл. 15.06.05, Бюл. № 6. 6 с.

13. Спосіб розкриття при відкритій розробці родовищ корисних копалин: пат. 7921 Україна: МПК E21C41/26. № 20041210358; заявл. 16.12.04; опубл. 15.07.05, Бюл. № 7. 8 с.

14. Vilkul Y., Slobodyanyuk V., Maximov I. Optimization of capacity and the number of crushing and transfer stations at the deep open pits. Metallurgical and Mining Industry. 2016. № 4. P. 116–120.

Slobodianiuk V.K., Maksymov I.I. DETERMINATION OF OPTIMAL PARAMETERS OF CYCLIC-FLOW TECHNOLOGY IN DEEP OPEN MINES

When designing the strip mining methods at the deep open pits at the stage of preliminary studies, it is necessary to determine the optimum number and succession of relocation of crushing and transfer stations while developing the open pit. This cuts the transport costs and reduces the number of dump trucks required.

As a criterion for optimization of truck and conveyor transport, an economic effect is used, being equal to the difference in the total costs of delivering the rock mass to the main conveyor with a single crushing plant and with the optimum number of crushing plants. An analytical dependence has been established to determine the optimum number of transfer points with their uniform location along the length and height of the open pit working area. The features of changes in the basic technological parameters of truck operation, depending on number of crushing and transfer stations, an open pit size and output are studied. The conditions for simultaneous use of several crushing and transfer stations, their optimum number and performance have been determined; the economic benefits of using the flowcharts with multiple transfer points have been estimated. The studies have shown that optimization of the number of transfer points results in the declining number of dump trucks by 50-60% compared to the option of using a single transfer point. An increase in number of transfer points, while saving in number of trucks enhances the reliability of transport operation in the open pit mines. Optimization of number of transfer points reduces the required capacity of each crushing and transfer plant up to 10-20 million tons / year. Reducing the required capacity of transfer points makes it possible to equip them with primary jaw crushers. The use of mobile crushing and transfer stations does not freeze the ore reserves and does not impede the development of the working area.

Key words: truck and conveyor transport, haulage level, crushing and transfer station.