

В.К. Слободянюк, к.т.н., доц.

І.І. Максимов, к.т.н., доц.

Р.В. Слободянюк, аспір.

ДВНЗ «Криворізький національний університет»

ВПЛИВ ВЗАЄМНОГО РОЗТАШУВАННЯ ВИБОЇВ НА ПОЛОЖЕННЯ ОПТИМАЛЬНОЇ ТОЧКИ ЗВОЗУ ГІРНИЧОЇ МАСИ І АНАЛІТИЧНЕ ВИЗНАЧЕННЯ ЇЇ КООРДИНАТ

Метою даної роботи є розробка методологічної основи для визначення координат оптимальної точки звозу гірничої маси та дослідження впливу на оптимальну точку звозу просторового розташування екскаваторних вибоїв.

У статті надано огляд сучасних досліджень, в яких для мінімізації логістичних процесів застосовуються алгоритми з використанням точки Ферма-Торрічеллі-Штейнера. У роботі використані методи математичної оптимізації та аналітичної геометрії. Методами аналітичної геометрії встановлені формули для визначення координат оптимальної точки зведення для кількості точок $n=4$.

Технологія гірничих робіт з використанням перевантажувальних складів широко розповсюджена на глибоких залізрудних кар'єрах. У більшості випадків, при прийнятті рішення про місце розташування перевантажувального складу в першу чергу до уваги береться його висотне положення в просторі кар'єру. Але положення перевантажувального пункту в плані теж має значний вплив на техніко-економічні показники відкритих гірничих робіт. Традиційний підхід, що розглядає в якості оптимальної точки звозу точку центра ваги, не є гарантією забезпечення мінімального значення транспортної роботи. В математиці відома точка Ферма-Торрічеллі, яка забезпечує мінімальну відстань до вершин трикутника. Показано, що мінімальна транспортна робота забезпечується при співпадінні точки звозу гірничої маси з точкою Ферма-Торрічеллі.

З точки зору відкритої розробки, особливе практичне значення має розробка методу, що дозволяє прогнозувати вплив переміщення в кар'єрному просторі робочих вибоїв на положення оптимальної точки звозу. Запропонований двоетапний метод дозволяє визначити координати оптимальної точки зведення гірничої маси (мінімум транспортної роботи) для довільної кількості екскаваторних вибоїв. Розміщення перевантажувального пункту в оптимальній точці дозволяє знизити обсяг транспортної роботи на 10–20 %.

Ключові слова: перевантажувальний пункт; точка Ферма-Торрічеллі; мінімізація транспортної роботи.

Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями. З метою мінімізації транспортної роботи при плануванні і проектуванні кар'єрів постає необхідність визначення раціональної точки зведення гірничої маси. Це завдання виникає при обґрунтуванні раціонального положення перевантажувального складу комбінованого кар'єрного транспорту. Аналіз проектних рішень щодо встановлення кроку перенесення перевантажувальних пунктів і визначення оптимальних місць їх розташування показує, що положення перевантажувальних пунктів іноді визначається без достатнього теоретичного обґрунтування [1–4]. Такий підхід до розвитку транспортної схеми кар'єру призводить до неоптимальних технічних рішень, що знижує економічну ефективність гірничих робіт. В теорії гірничої справи немає загального і повного рішення задачі оптимізації положення перевантажувального пункту (тимчасового відвалу), що забезпечує мінімум транспортної роботи кар'єрних автосамоскидів. У даний час і в минулому подібні завдання виникають і в інших галузях виробництва.

Аналіз досліджень і публікацій. Задача оптимальної організації транспортних комунікацій представляє великий інтерес як з теоретичної точки зору, так і з точки зору практичного застосування і є однією з класичних наукових проблем. Вперше задача визначення оптимальної точки зведення для трьох точок була поставлена в XVII столітті П'єром Ферма [5]. У його формулюванні задача поставлена наступним чином: «для трьох заданих точок знайти четверту, таку, що якщо від неї провести прямі лінії до даних точок, сума відстаней буде найменшою». У XVII столітті розв'язком цієї задачі займалися багато дослідників.

У збережених джерелах вперше рішення цієї задачі для трьох точок дано учнями Галілео Галілея Е.Торрічеллі і В.Вівіані. Рішення задачі було отримане фізичними методами і розмірковуваннями – оптимальною точкою для трьох вершин трикутника є така внутрішня точка, з якої всі сторони трикутника видно під кутом 120° . Дана точка називається точкою Ферма-Торрічеллі. В XIX столітті були знайдені геометричні методи розв'язання цієї задачі [5–8] (рис. 1). Для знаходження точки Ферма-Торрічеллі (точка S) на сторонах даного трикутника будуємо допоміжні правильні трикутники (трикутники Наполеона). Точку S можна знайти як точку перетину кіл, описаних навколо трикутників

Наполеона. В другій половині XIX століття був знайдений ще більш простий метод: з'єднавши вершини трикутника ABC з відповідними протилежними точками, одержуємо точку перетину S . Якщо один із кутів трикутника ABC більше 120° , то відповідна вершина i є точкою Ферма-Торрічеллі.

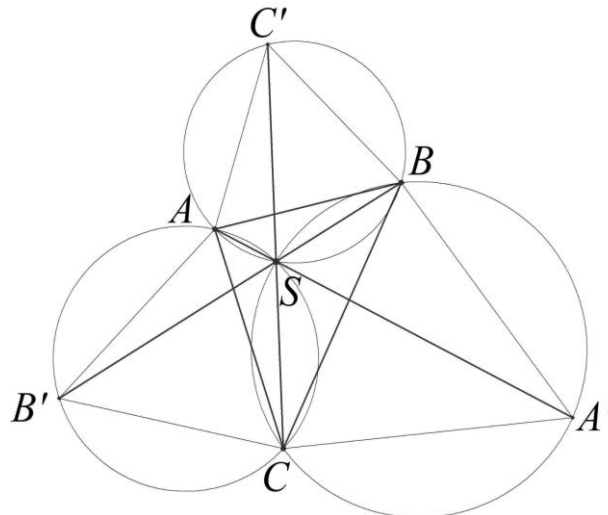


Рис. 1. Геометричне рішення задачі визначення точки Ферма-Торрічеллі для трикутника

Для чотирьох точок рішення задачі визначення точки Ферма-Торрічеллі було знайдено італійським інженером і математиком Фаньяно: для випуклого чотирикутника мінімум суми відстаней досягається в точці перетину діагоналей.

Великий внесок у розвиток методу знаходження оптимальних точок зведення вніс Якоб Штейнер (1796–1863). Для кількості точок, більшої за чотири, він заклав основи створення теорії оптимальних мереж. Їм особисто були розглянуті тільки деякі окремі випадки, а теорії графів і логістики були розвинені в XIX і на початку XX століття (Р.Курант, 1888–1972 pp.) [9].

Багато дослідників при вирішенні аналогічних завдань в різних областях промисловості в якості точки Ферма-Торрічеллі шукають точку центру ваги. Для довільного n -кутника в масштабі вирізається модель, фізичними методами знаходиться центр ваги. Збіг цих точок можливий для правильних і деяких окремих видів багатокутників. Упродовж 350 років були запропоновані різні рішення і алгоритми визначення оптимальної точки зведення, але кожен з них має певні обмеження і не може бути розглянутий як остаточний універсальний метод.

У гірничій справі задачу визначення оптимальної точки зведення (визначення місця закладення підйомного шахтного стовбура) вирішував академік Л.Д. Шевяков [10]. У загальному вигляді математична задача про точку найвигіднішого зосередження вантажів, що надходять з n точок, заданих в площині, дуже складна. У теорії проектування підприємств з підземним способом розробки відомо кілька спрощених методів визначення оптимальної точки зведення (вантажі розташовуються уздовж прямої). Згідно з правилом Шевякова Л.Д., при зосередженні вантажів на прямій, за умовою мінімальної роботи з транспортування, ствол шахти повинен бути розташований в місці зосередження такого вантажу, який, будучи доданий до суми інших, розташованих від нього вліво, дає суму, більшу суми вантажів, розташованих вправо, а будучи доданим до правих вантажів, дає суму, більшу суми лівих. Оптимальний пункт зведення знаходиться в точці, що ділить запаси навпіл. Академік Шевяков Л.Д. був одним з перших вчених, якій показав, що оптимальна точка зведення вантажів не завжди співпадає з центром ваги. Метод Шевякова Л.Д. є розвитком метода «штандорта», запропонованого засновниками економічної географії (В.Лаунхардт, А.Вебер), але є громіздким та наближеним.

В роботі [11] наведені результати дослідження з визначення оптимальної точки зведення при розкритті нового горизонту кар'єра. Завдання сформульоване таким чином: потрібно знайти точку зведення, що забезпечує мінімум транспортної роботи при розробці горизонту. Дане завдання виникає при визначенні раціонального положення рудоспуску [12]. Поставлену задачу аналітичними методами вирішити не вдалося, проте було виконано дослідження деяких характерних властивостей оптимальної точки зведення. Чисельними методами були досліджені асиметричні фігури з різними відносними розмірами.

Встановлено, що середня відстань, яка розрахована для центра ваги горизонту, перевищує відстань, розраховану для оптимального пункту зведення. У розглянутих випадках ця різниця становила 3–5 %. Робиться спірний висновок про те, що при визначенні положення пункту зведення для всього горизонту з достатньою точністю за його положення може бути прийнятий центр ваги фігури, утвореної контуром горизонту. Проте на практиці перевантажувальний пункт для одного горизонту, як правило, не передбачається; в розробці одночасно знаходиться декілька екскаваторних заходок і їх взаємному

положенню з урахуванням різниці в плановій продуктивності вибоїв в різний час будуть відповідати різні координати оптимальної точки звезення.

Всі перераховані вище методи дозволяють знаходити геометричне рішення задач. Однак особливе практичне значення має розробка методу, що дозволяє знаходити координати оптимальної точки звезення для багатокутника (ділянок і робочих зон кар'єра) при відомих координатах його вершин з урахуванням вагових коефіцієнтів. При реалізації даного методу в системі автоматизованого проєктування кар'єрів це дозволить динамічно визначати оптимальні точки звезення гірничої маси у кар'єрі.

Постановка завдання. Метою даного дослідження є розробка методологічної основи для визначення точки Ферма-Торрічеллі для кількості екскаваторних вибоїв, що перевищує три, а також з урахуванням впливу на оптимальну точку звезення відмінностей у продуктивності екскаваторних вибоїв.

Викладення матеріалу та результати. В даний час відсутнє строге математичне рішення задачі визначення оптимальної точки звезення для точок, розташованих у вершинах довільного n -кутника ($n > 4$). Раніше авторами запропоновано [13], рішення даної задачі розбити на два етапи. На першому етапі знаходимо допоміжну точку P , що забезпечує мінімум суми квадратів відстані транспортування.

Для вибоїв однакової продуктивності:

$$x = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad y = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i \quad (1)$$

Для вибоїв різної продуктивності ($Q_1, Q_2, Q_3, \dots, Q_n$):

$$x = \frac{x_1 Q_1 + x_2 Q_2 + x_3 Q_3 + \dots + x_n Q_n}{Q_1 + Q_2 + Q_3 + \dots + Q_n} \quad ; \quad y = \frac{y_1 Q_1 + y_2 Q_2 + y_3 Q_3 + \dots + y_n Q_n}{Q_1 + Q_2 + Q_3 + \dots + Q_n} \quad (2)$$

На другому етапі градієнтним методом визначаємо координати оптимальної точки S , що забезпечує мінімум транспортної роботи. Таким методом можна визначити оптимальну точку звезення для довільної кількості вихідних точок як при однаковій, так і при різній їх продуктивності.

У той же час, розглядаючи роботу внутрішньокар'єрного екскаваторного перевантажувального пункту, слід зазначити, що він має обмежену продуктивність. Як правило, на перевантажувальному пункті працює один екскаватор, рідше застосовують перевантажувальні пункти з двома екскаваторами. Гірнична маса на перевантажувальний пункт не доставляється з усіх вибоїв кар'єра, а тільки з декількох близько розташованих. Таким чином подальше дослідження особливостей і властивостей точки Ферма-Торрічеллі для області, що містить $n \leq 4$ точок, має велике значення для теорії відкритої розробки.

Однією з головних особливостей відкритої розробки є динамічність екскаваторних вибоїв [14]. В процесі гірничих робіт робочі вибої, в яких проводиться виїмка гірських порід, переміщуються в просторі зі швидкістю, прямо пропорційною продуктивності виймального обладнання і обернено пропорційною площі вибою. Слідом за переміщенням екскаваторних вибоїв переміщуються транспортні комунікації. У кар'єрах найбільш часто зустрічається випадок роботи 3–4 екскаваторів на один перевантажувальний пункт, але в процесі розвитку гірничих робіт їх взаємне розташування постійно змінюється (як відстань між окремими екскаваторами, так і кути).

За допомогою геометричного методу визначення точки Ферма-Торрічеллі проведемо дослідження закономірностей взаємного розміщення точок S (точка Ферма-Торрічеллі) і P (центр ваги) при зміні геометрії трикутників та чотирикутників.

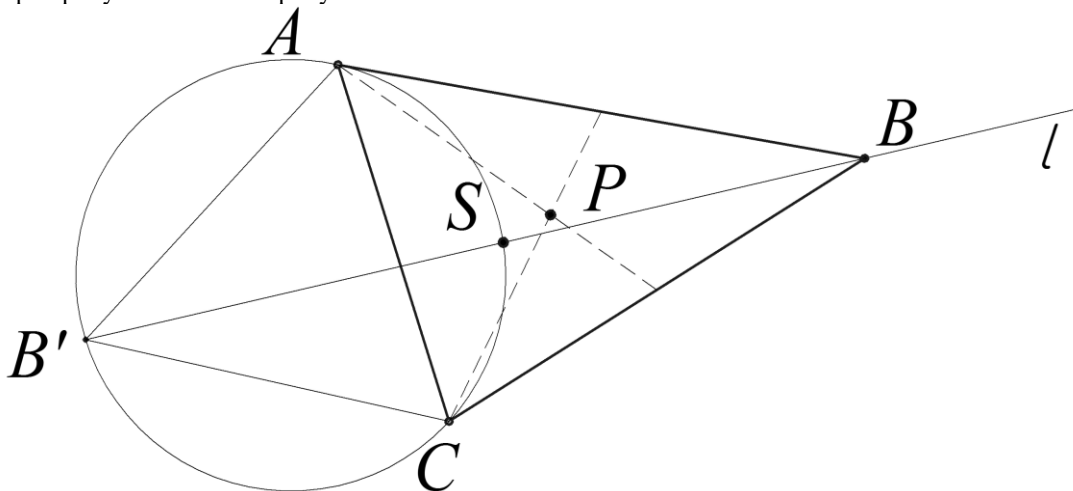


Рис. 2 Незалежність положення точки Ферма-Торрічеллі від положення точки B на промені l

Розглянемо довільний трикутник ABC . Для визначення допоміжної точки B' на стороні AC побудуємо рівносторонній трикутник $AB'C$. Навколо трикутника $AB'C$ будемо описане коло. Точка S завжди лежить на дузі AC . Поєднавши точки B та B' , на перетині дуги AC та відрізка BB' знаходимо шукану точку S (Ферма-Торрічеллі). Центр ваги (точка P) знаходимо як точку перетину медіан трикутника ABC . Проаналізуємо, як змінюється взаємне положення точок S та P при зміні положення точки B . Якщо вершина B буде віддалятися від сторони AC уздовж променя l , то також буде зміщуватися центр ваги трикутника, але положення точки Ферма-Торрічеллі залишається незмінним. При будь-якому положенні точки B точка S завжди належить дузі AC . Якщо через переміщення точки B один з внутрішніх кутів трикутника (A або C) стане рівним або більшим 120° , то відповідна вершина буде оптимальною точкою зведення. Можна виокремити три характерні зони положення точки Ферма-Торрічеллі на дузі AC в залежності від положення точки B (рис. 3).

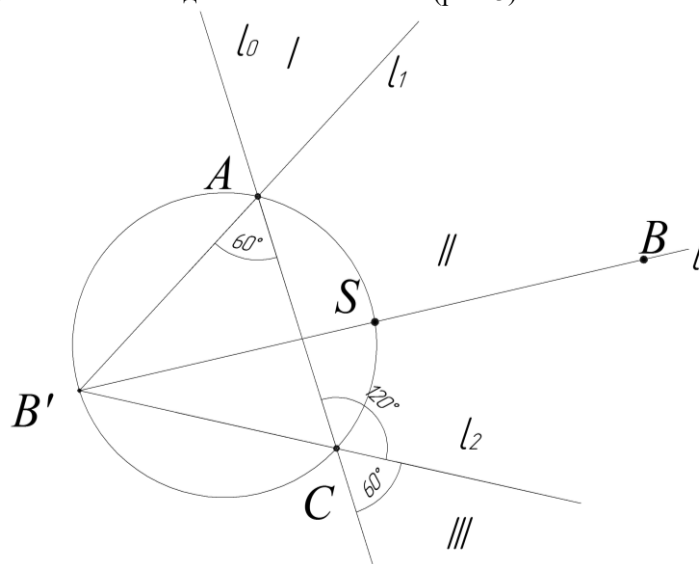


Рис. 3 Вплив зони розташування точки B на положення точки Ферма-Торрічеллі

Продовжуємо відрізок AC в обидві сторони (пряма l_0). На стороні AC будемо рівносторонній трикутник, знаходимо точку B' . Продовжуємо сторони $B'A$ та $B'C$ - промені l_1 та l_2 . Промені l_1 та l_2 ділять праву напівплощину (правіше прямої l_0) на три зони:

- якщо точка B лежить між променями l_0 і l_1 , то оптимальною точкою є вершина A (зона I);
- якщо точка B лежить між променями l_0 і l_2 , (зона III), то точка Ферма-Торрічеллі збігається з вершиною C ;
- якщо точка B попадає в зону II, то точка S завжди лежить на дузі AC .

Для остаточного знаходження точки Ферма-Торрічеллі з'єднуємо точки B і B' і знаходимо точку S як точку перетину дуги AC і відрізка BB' . Цікаво відзначити, що де б на промені l не знаходилась точка B , положення точки S не змінюється. Положення точки S залежить не від відстані BB' , а від кута, під яким точку B видно з точки B' . Розміщення оптимальної точки S залежить не тільки від розмірів, але і від форми трикутника ABC (кутів).

Рішення задачі визначення оптимальної точки зведення для чотирьох точок (сума відстаней від точки Ферма-Торрічеллі до вершин чотирикутника мінімальна) простіше. Точкою Ферма-Торрічеллі є точка перетину діагоналей чотирикутника (теорема Фаньяно).

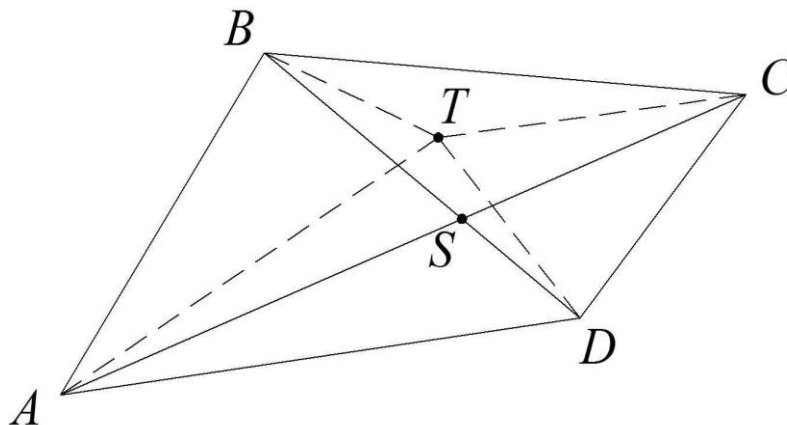


Рис. 4. Визначення точки Ферма-Торрічеллі для чотирикутника

У справедливості цієї теореми легко переконатись (рис. 4). Візьмемо довільну точку T всередині чотирикутника. Так як пряма коротше будь-якої ламаної, то сума відстаней від точки T до вершин чотирикутника буде більше, ніж для точки S .

Для більшої кількості точок геометричне рішення задачі визначення оптимальної точки звезення не знайдене. Великим недоліком наведених вище геометричних методів для трьох і чотирьох точок є те, що ми не можемо визначити координати точки Ферма-Торрічеллі при відомих координатах вершин. Координати оптимальної точки звезення для чотирьох точок можна знайти як координати точки перетину діагоналей (рис. 5).

Знайдемо координати точки S при відомих координатах вершин чотирикутника.

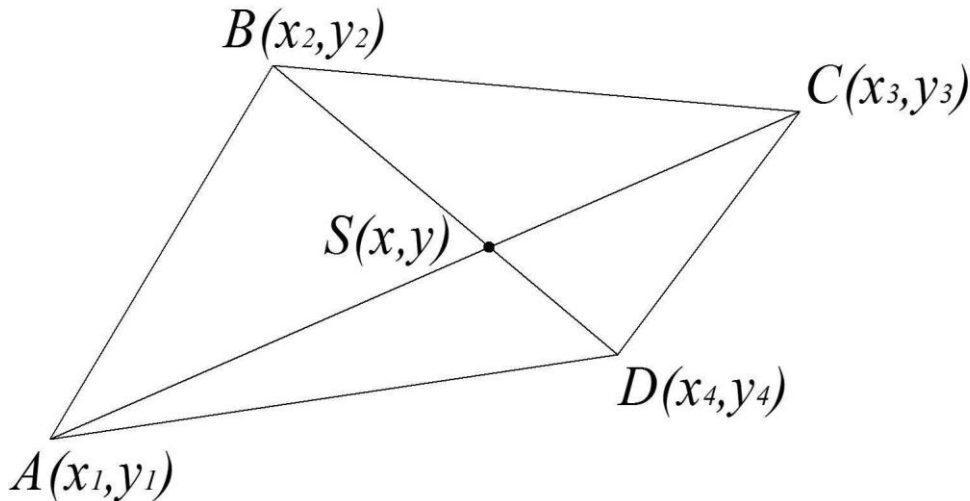


Рис. 5. Схема до визначення координат оптимальної точки звезення для чотирикутника

Складемо рівняння діагоналей (за двома точками):

$$\text{діагональ } AC \quad \frac{y - y_3}{y_3 - y_1} = \frac{x - x_3}{x_3 - x_1} \quad ; \quad y - y_3 = \frac{y_3 - y_1}{x_3 - x_1} (x - x_3) \quad (3)$$

$$\text{діагональ } BD \quad \frac{y - y_4}{y_4 - y_2} = \frac{x - x_4}{x_4 - x_2} \quad ; \quad y - y_4 = \frac{y_4 - y_2}{x_4 - x_2} (x - x_4) \quad (4)$$

Координати оптимальної точки звезення (перевантажувального пункту) для чотирьох точок знаходимо як рішення системи рівнянь (діагоналей AC і BD):

$$x = \frac{(y_3 x_1 - y_1 x_3) \times (x_4 - x_2) - (y_4 x_2 - y_2 x_4) \times (x_3 - x_1)}{(y_3 - y_1) \times (x_4 - x_2) - (y_4 - y_2) \times (x_3 - x_1)} \quad (5)$$

$$y = \frac{(x_3 y_1 - x_1 y_3) \times (y_4 - y_2) - (x_4 y_2 - x_2 y_4) \times (y_3 - y_1)}{(x_3 - x_1) \times (y_4 - y_2) - (x_4 - x_2) \times (y_3 - y_1)} \quad (6)$$

Використовуючи останні формули, можна відразу знайти координати оптимальної точки звезення, не вдаючись до запропонованого раніше двоетапного метода визначення координат цієї точки. Але використовувати ці формули можна тільки при однаковій продуктивності екскаваторних вибоїв.

Цікаво відзначити, що координати оптимальної точки S залежать не тільки від розмірів чотирикутника $ABCD$, а й від його форми (кутів). Якщо видаляти одну або всі вершини уздовж прямих, що визначаються діагоналями чотирикутника, то положення оптимальної точки не змінюється.

Висновки та напрямок подальших досліджень. Для розробки ефективного плану гірничих робіт важливо визначити координати оптимальних точок звезення гірничої маси. Для чотирьох точок при однаковій продуктивності вибоїв можна використовувати отримані формули. За іншої кількості екскаваторів можна використовувати двоетапний метод, при якому спочатку знаходимо координати допоміжної точки P (мінімізуємо суму квадратів відстаней), а потім координати оптимальної точки звезення S . Причому цей метод може бути використаний для будь-якої кількості точок, як для однакової, так і різної продуктивності вибоїв. Геометричні методи визначення оптимальної точки звезення (для трьох і чотирьох точок) дозволяють провести дослідження особливостей розміщення оптимальної точки звезення при різному взаємному розміщенні вибоїв, коли змінюються відстані між вибоями та форми трикутників і чотирикутників (кути).

У подальших дослідженнях розроблений математичний апарат буде використаний для встановлення закономірностей оптимального розташування перевантажувальних пунктів та тимчасових автомобільних відвалів і формування умов для використання кільцевих схем руху кар'єрних автосамоскидів [15].

Список використаної літератури:

1. Яковлев В.Л. Теория и практика выбора транспорта глубоких карьеров / В.Л. Яковлев. – Новосибирск : Наука СО, 1989. – 240 с.
2. Анализ технологического потенциала периодических колебаний производительности ЦПТ как резерва мультиструктурных грузопотоков / С.А. Федоренко, С.А. Жуков, Ю.М. Навитный, С.В. Ткаличенко // Гірничий вісник. – Вип. 101. – Кривий Ріг. – 2016. – С. 12–18.
3. Вилкул Ю.Г. Обоснование рациональных зон использования карьерных автосамосвалов разной грузоподъемности / Ю.Г. Вилкул, В.К. Слободянюк, И.И. Максимов // Разработка рудных месторождений. – Кривой Рог. – 2008. – № 92. – С. 3–7.
4. Vilkul Y. Optimization of capacity and the number of crushing and transfer stations at the deep open pits / Y.Vilkul, V.Slobodyanyuk, I.Maximov // Metallurgical and Mining Industry. – 2016. – № 4. – Pp. 116–120.
5. Протасов В.Ю. Максимумы и минимумы в геометрии / В.Ю. Протасов. – М. : МЦНМО, 2005. – 56 с.
6. Успенский В.А. Некоторые приложения механики к математике / В.А. Успенский. – М. : Физматгиз, 1958. – 48 с.
7. Люстерник Л.А. Кратчайшие линии (вариационные задачи) / Л.А. Люстерник. – М. : Гостехиздат, 1955. – 104 с.
8. Берн М.У. Поиск кратчайших сетей / М.У. Берн // В мире науки. – 1989. – № 3. – С. 64–70.
9. Гордеев Э.Н. Задача Штейнера. Обзор / Э.Н. Гордеев, О.Г. Тарасцов // Дискретная математика. – Москва : МИАН, 1993. – Т. 5. – Вып. 2. – С. 3–28.
10. Шевяков Л.Д. Определение места заложения подъемного ствола / Л.Д. Шевяков. – М. : Углетехиздат, 1947. – 43 с.
11. Белозеров В.И. Оптимизация вскрытия рабочих горизонтов карьера / В.И. Белозеров // ГИАБ. – М. : Изд-во МГГУ, 2012. – № 6. – С. 88–94.
12. Дослідження умов та особливостей використання рудоспусків для розкриття глибоких горизонтів залізрудних кар'єрів / В.К. Слободянюк, М.М. Данілов, О.В. Пишменний, В.С. Саприкін // Вісник ЖДТУ. Серія : Технічні науки. – Житомир : ЖДТУ, 2006. – № 1 (36). – С. 163–171.
13. Максимов І.І. Особливості визначення раціонального положення перевантажувального пункту у кар'єрі / І.І. Максимов, Р.В. Слободянюк // Вісник Криворізького національного університету. – Кривий Ріг : КНУ, 2017. – Вип. 44. – С. 73–79.
14. Арсентьев А.И. Законы формирования рабочей зоны карьера : учеб. пособие / А.И. Арсентьев. – Л. : Изд-во ЛГИ, 1986. – 54 с.
15. Слободянюк Р.В. Вдосконалення технології гірничих робіт з кільцевою схемою руху кар'єрних автосамоскидів / Р.В. Слободянюк, М.М. Пишчик // Вісник ЖДТУ. Серія : Технічні науки. – Житомир : ЖДТУ, 2016. – № 1 (76). – С. 151–157.

References:

1. Jakovlev, V.L. (1989), *Teorija i praktika vybora transporta glubokih kar'erov*, Nauka SO, Novosibirsk, 240 p.
2. Fedorenko, S.A., Zhukov, S.A., Navitnij, Ju.M. and Tkalichenko, S.V. (2016), «Analiz tehnologicheskogo potenciala periodicheskikh kolebanij proizvoditel'nosti CPT kak rezerva mul'tistrukturnyh gruzopotokov», *Girnichij visnik*, Vol. 101, Krivij Rig, pp. 12–18.
3. Vilkul, Ju.G., Slobodjanjuk, V.K. and Maksimov, I.I. (2008), «Obosnovanie racional'nyh zon ispol'zovanija kar'ernyh avtosamosvalov raznoj gruzopod#emnosti», *Razrabotka rudnyh mestorozhdenij*, Krivoj Rog, No. 92, pp. 3–7.
4. Vilkul, Y., Slobodyanyuk, V. and Maximov, I. (2016), «Optimization of capacity and the number of crushing and transfer stations at the deep open pits», *Metallurgical and Mining Industry*, No. 4, pp. 116–120.
5. Protasov, V.Ju. (2005), *Maksimumy i minimumy v geometrii*, MCNMO, Moskva, 56 p.
6. Uspenskij, V.A. (1958), *Nekotorye prilozhenija mehaniki k matematike*, Fizmatgiz, Moskva, 48 p.
7. Ljusternik, L.A. (1955), *Kratchajshie linii (variacionnye zadachi)*, Gostehizdat, Moskva, 104 p.
8. Bern, M.U. (1989), «Poisk kratchajshih setej», *V mire nauki*, No. 3, pp. 64–70.
9. Gordeev, Je.N. and Tarascov, O.G. (1993), «Zadacha Shtejnera. Obzor», *Diskretnaja matematika*, MIAN, Moskva, Vol. 5, Issue 2, pp. 3–28.
10. Shevjakov, L.D. (1947), *Opredelenie mesta zalozhenija pod#emnogo stvola*, Ugletehizdat, Moskva, 43 p.
11. Belozerov, V.I. (2012), «Optimizacija vskrytija rabochih gorizontov kar'era», *GIAB*, Izd-vo MGGU, Moskva, No. 6, pp. 88–94.
12. Slobodjanjuk, V.K., Danilov, M.M., Pis'mennij, O.V. and Saprikin, V.S. (2006), «Doslidzhennja umov ta osoblivostej vikoristannja rudospuskiv dlja rozkrittja glibokih gorizontiv zalizorudnih kar'eriv», *Visnik ZhDTU*, Serija *Tehnichni nauki*, ZhDTU, Zhitomir, No. 1 (36), pp. 163–171.
13. Maksymov, I.I. and Slobodjanjuk, R.V. (2017), «Osoblyvosti vyznachennja racional'nogo polozhennja perevantazhuval'nogo punktu u kar'jeri», *Visnyk Kryvoriz'kogo nacional'nogo universytetu*, KNU, Kryvyj Rig, Vol. 44, pp. 73–79.
14. Arsent'ev, A.I. (1986), *Zakony formirovanija rabochej zony kar'era*, Izd-vo LGI, Leningrad, 54 p.

15. Slobodjanjuk, R.V. and Pizhik, M.M. (2016), «Vdoskonalennja tehnologii gornichih robiv z kil'cevoju shemoju ruhu kar'ernih avtosamoskidiv», *Visnik ZhDTU, Serija Tehnichni nauki, ZhDTU, Zhitomir, No. 1 (76)*, pp. 151–157.

СЛОБОДЯНЮК Валерій Костянтинович – кандидат технічних наук, доцент кафедри відкритих гірничих робіт Криворізького національного університету.

Наукові інтереси – автоматизоване проектування кар'єрів;

– розкриття та системи розробки залізородних родовищ.

E-mail: slobod_v@i.ua.

МАКСИМОВ Іван Іванович – кандидат технічних наук, доцент кафедри вищої математики, Криворізького національного університету.

Наукові інтереси :

– математичне моделювання;

– чисельні методи;

– теорія проектування кар'єрів.

СЛОБОДЯНЮК Роман Валерійович – аспірант кафедри відкритих гірничих робіт Криворізького національного університету.

Наукові інтереси:

– кар'єрний транспорт;

– імітаційне моделювання.

Тел.: +38(0564) 273–536.

E-mail: slobod.roman@gmail.com.

Стаття надійшла до редакції 24.03.2017.