

УДК 656.4

Д. М. КОЗАЧЕНКО^{1*}, М. І. БЕРЕЗОВИЙ^{2*}, В. В. МАЛАШКІН^{3*}, Д. В. ХИЛЬКЕВИЧ^{4*}

^{1*}Каф. «Транспортний сервіс та логістика», Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 04, ел. пошта: dmytro.kozachenko@outlook.com, ORCID 0000-0003-2611-1350

^{2*}Каф. «Транспортні вузли», Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, м. Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 371 51 03, ел. пошта: m.i.berezovyi@ust.edu.ua, ORCID 0000-0001-6774-6737

^{3*}Каф. «Транспортні вузли», Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, м. Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (068) 409 61 85, ел. пошта: v.v.malashkin@ust.edu.ua, ORCID 0000-0002-5650-1571

^{4*}ТОВ «МЕТІНВЕСТ СІЧСТАЛЬ», Південне шосе, 74, Запоріжжя, Україна, 69008, тел. +38(096) 337 55 53, ел. пошта: dmitriy.khilkevich@gmail.com, ORCID 0009-0006-5738-7041

УДОСКОНАЛЕННЯ АНАЛІТИЧНИХ МЕТОДІВ ОЦІНКИ ТЕХНІКО-ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ КАР'ЄРНОГО ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ

Мета. Метою цього дослідження є удосконалення аналітичних методів оцінки відповідності технічних параметрів кар'єрного залізничного транспорту плановим обсягам роботи. **Методика.** Дослідження виконані з використанням методів теорії експлуатації залізниць та методів дослідження операцій. **Результати.** Для підвищення конкурентоспроможності української продукції гірничодобувної промисловості важливо знижувати собівартість її виробництва. Витрати на роботу кар'єрів значною мірою залежить від ефективності промислового залізничного транспорту, який забезпечує переміщення великих обсягів сировини, готової продукції та відходів. Недоліки сучасних аналітичних моделей, що використовуються для оцінки відповідності технічних параметрів кар'єрного залізничного транспорту плановим обсягам роботи, пов'язані із складністю урахування особливостей технологічних процесів кар'єрів та відносно низькою точністю отриманих оцінок. Зокрема ці моделі не достатньо враховують цілочисельний характер задач експлуатації залізничного транспорту кар'єрів та залежності величини простоїв технічних засобів залізниць від рівня завантаження транспортної системи. В результаті дослідження розроблено методи оцінки наявної та потрібної переробної спроможності вантажних фронтів які, на відміну від існуючих, враховують необхідність виведення рухомого складу в пункти зміни локомотивних бригад. З використанням методів теорії експлуатації залізниць удосконалено аналітичні методи оцінки перевезень між вантажними фронтами за рахунок детального урахування обмежень швидкості руху локомотиво-составів. При жорсткому закріпленні пункту навантаження за пунктом вивантаження величина простою може бути встановлена на основі побудови графіків Ганта. Якщо на вантажний фронт вивантаження надходять завантажені вагони з декількох вантажних фронтів навантаження, або на вантажний фронт навантаження надходять порожні вагони з декількох вантажних фронтів вивантаження, то простій локомотиво-составів в очікуванні вантажних операцій буде мати випадкову величину і може бути встановлений на основі методів теорії систем масового обслуговування. Для скорочення витрат часу на перевезення формалізовано задачу закріплення пунктів вивантаження за пунктами навантаження. На основі виконаних досліджень запропоновано удосконалений метод розрахунку парку локомотиво-составів електровозної та тепловозної тяги для виконання перевезень. **Наукова новизна.** Наукова новизна полягає в удосконаленні методів аналітичного моделювання роботи залізничного транспорту кар'єрів за рахунок врахування цілочисельного характеру задач, та використання методів теорії систем масового обслуговування для оцінки простоїв в очікуванні вантажних операцій. **Практична значимість.** Практична значимість результатів полягає в тому, що вони дозволяють проєктувальникам та технологам прискорити пошук роботоспроможних рішень та зменшити кількість етапів графічного або імітаційного моделювання, що вимагають значних витрат часу та ресурсів.

Ключові слова: залізничний транспорт, кар'єрний залізничний транспорт, переробна спроможність, парк рухомого складу, оптимізація

Вступ

Залізнична промисловість відіграє ключову роль в економіці України. Завдяки експорту залізної руди та чорних металів вона забезпечує значну частину валютних надходжень країни. Для підвищення конкурентоспроможності

української продукції важливо знижувати собівартість її виробництва. На гірничодобувних та металургійних підприємствах це значною мірою залежить від ефективності промислового залізничного транспорту, який забезпечує переміщення великих обсягів сировини, готової продукції та відходів.

Залізничний транспорт широко використовується в гірничодобувній промисловості, оскільки він надзвичайно надійний в експлуатації за будь-яких умов. Його перевагами є низький опір руху, висока провізна спроможність, довговічність рухомого складу та можливість використання на кар'єрах будь-якої продуктивності. В той же час, залізничний транспорт має і недоліки, що пов'язані з обмеженнями роботи на крутих ухилах, спорудженні вантажних фронтів великої довжини, потреби у використанні кривих великих радіусів у плані та профілі при прокладанні інфраструктури, високими витратами часу та коштів на будівництво інфраструктури.

Враховуючи такі характеристики кар'єрного залізничного транспорту, вдосконалення методів його проектування з метою раціоналізації параметрів є однією з ключових задач у галузі промислового транспорту.

Мета

Метою цього дослідження є удосконалення аналітичних методів оцінки відповідності технічних параметрів кар'єрного залізничного транспорту плановим обсягам роботи.

Методика

Добувна промисловості та залізничний транспорт мають тривалу спільну історію. Саме із зростанням обсягів видобутку корисних копалин та заглибленням кар'єрів була пов'язана потреба в потужних, надійних і безперервних транспортних системах. Промислова революція призвела до появи у XVIII столітті у Європі, зокрема в Англії та Німеччині, рейкових систем з кінною тягою. Пізніше, на початку XIX століття зростання масштабів видобутку корисних копалин призвело до появи та розвитку парових локомотивів, які дозволили перевозити великі обсяги вантажів на значні відстані [1]. Перша половина XX століття являє собою час, коли залізничний транспорт виконував переважну частину транспортної роботи кар'єрів. В цей час розпочалося впровадження електровозів, тепловозів та спеціалізованих вагонів для перевезення гірничої маси. Однак в другій половині XX століття ситуація почала змінюватися. Сучасні технології транспортування корисних копалин постійно переглядаються, оскільки з ними пов'язано від 15 до 30% загальних капіталовкладень у розвиток виробництва та значна частина експлуатаційних витрат [2]. В таких умовах замість залізничного транспорту на під'їзних коліях почали широко використовувати автомобільний,

трубопровідний та конвеєрний транспорт [3]. Конкуренція з іншими видами транспорту стимулює розвиток і удосконалення кар'єрного залізничного транспорту. Основним методом, що дозволяє встановити раціональні параметри залізничного транспорту кар'єрів є моделювання. Для дослідження використовуються аналітичні, графічні та імітаційні моделі. В аналітичних моделях зв'язки між параметрами встановлюються у вигляді функціональних залежностей [5, 6]. Перевагою аналітичних моделей є висока швидкість отримання рішення та можливість застосування прямих методів оптимізації для встановлення раціонального технічного оснащення кар'єрів. Недоліки аналітичних моделей пов'язані із складністю урахування особливостей технологічних процесів кар'єрів та відносно низькою точністю отриманих оцінок.

Процеси, що відбуваються у транспортних системах кар'єрів відбуваються частково паралельно, а частково послідовно. Для того, щоб визначити порядок і взаємозв'язок у часі та просторі основних технологічних операцій, розробляють функціональні моделі роботи станцій. Однією з найбільш широко вживаних моделей роботи станції є графічна модель у вигляді плана-графіка [7, 8, 9]. Плани-графіки будують з метою узгодження роботи всіх технічних засобів, визначення завантаження основних елементів, скорочення міжопераційних інтервалів і визначення найбільш напружених періодів у роботі транспортних систем кар'єрів. Перевагою графічного моделювання є можливість детального врахування взаємозв'язків між окремими операціями. Недоліки цього методу пов'язані зі значними витратами часу на отримання рішення, суб'єктивність отриманого рішення так як воно суттєво залежить від кваліфікації людини, що будує добовий план-графік, а також від обраного набору вихідних даних.

Розвиток комп'ютерної техніки викликав появу методів імітаційного моделювання [10, 11]. Їх застосування дозволяє суттєво підвищити швидкість отримання рішення у порівнянні з графічними моделями, однак проблема його суб'єктивності залишається невирішеною.

В цілому сучасний підхід до вибору технічного оснащення транспортних систем кар'єрів ґрунтується на отриманні рішення за допомогою аналітичних моделей та перевірки можливості його реалізації на основі графічного або імітаційного моделювання.

Виконаний аналіз показує, що застосування методів аналітичного моделювання для удосконалення технічного забезпечення та технології

кар'єрів залишається актуальною задачею. Проблемою сучасних аналітичних методів розрахунків є те, що вони не враховують цілочисельний характер задачі, а також спрощені підходи до оцінки простоїв в очікуванні технологічних операцій. Удосконалення цих моделей може бути досягнуто за рахунок використання методів теорії експлуатації залізниць та методів дослідження операцій.

Результати

Основними елементами транспортних систем кар'єрів, що підлягають перевірці є переробна спроможність вантажних фронтів та кількість локомотиво-составів.

Вантажні fronti кар'єрів можуть бути розділені на два типи. До першого типу відносяться вантажні fronti де рухомий склад може залишатися під час перерв в роботі між змінами, при цьому вантажна операція з групою вагонів може бути не закінчена. При роботі кар'єрів у дві зміни наявна переробна спроможність вантажних фронтів цього типу у локомотиво-составах за добу може бути встановлена за виразом

$$n_{\text{вфн}} = \left\lfloor \frac{1440 - 2t_{\text{пер}}}{T_{\text{во}} + t_{\text{сх}} + t_{\text{дод}}} \right\rfloor,$$

де $t_{\text{пер}}$ – тривалість перерви між змінами, хв;

$t_{\text{сх}}$ – витрати часу на подачу та забирання вагонів на вантажний фронт від найближчого можливого місця схрещення локомотиво-составів, хв;

$t_{\text{дод}}$ – додаткові витрати часу при подачі та забиранні вагонів.

До другого типу вантажних фронтів кар'єрів відносяться вантажні fronti де не може відбуватися зміна бригад. З таких фронтів локомотиво-состави повинні бути виведені на станції чи спеціально облаштовані місця на перегонах для виконання зміни локомотивних бригад. В такому випадку впродовж кожної зміни буде один цикл, що розпочинається та закінчується в пункті зміни бригад, та декілька циклів, що розпочинаються та закінчуються в пункті схрещення локомотиво-составів. З урахуванням цього, наявна переробна спроможність вантажних фронтів другого типу у локомотиво-составах за добу може бути встановлена за виразом

$$n_{\text{вфн}} = 2 \left\lfloor \frac{720 - t_{\text{пер}} - T_{\text{во}} - t_{\text{пз}} - t_{\text{дод}}}{T_{\text{во}} + t_{\text{сх}} + t_{\text{дод}}} \right\rfloor + 2,$$

де $t_{\text{пз}}$ – витрати часу на подачу та забирання вагонів на вантажний фронт від найближчого можливого місця зміни локомотивних бригад, хв;

$\lfloor \rfloor$ – операція округлення до меншого цілого числа.

Потрібна переробна спроможність вантажного фронту у локомотиво-составах визначались за формулою

$$n_{\text{вфп}} = \left\lfloor \frac{Q_{\text{р}} k_{\text{н}}}{\alpha_{\text{н}} (365 - d_{\text{н}}) q_{\text{лс}}} \right\rfloor,$$

де $Q_{\text{р}}$ – плановий річний обсяг вантажних робіт, т/рік;

$q_{\text{лс}}$ – вантажопідйомність локомотиво-состава, т;

$k_{\text{н}}$ – коефіцієнт нерівномірності перевезень;

$d_{\text{н}}$ – кількість днів у році, протягом яких вантажні роботи на фронті не виконуються;

$\alpha_{\text{н}}$ – коефіцієнт надійності роботи технічних засобів;

$\lceil \rceil$ – операція округлення числа до більшого цілого.

Кількість днів у році, протягом яких вантажні роботи на фронті не виконуються $d_{\text{н}}$, включає час на проведення вибухових робіт, обслуговування машин та механізмів вантажних фронтів, переукладання пересувних колій та ін.

Потреба у локомотиво-составах залежить від виду тягового рухомого складу. У випадку виконання перевезень електровозною тягою кількість локомотиво-составів може бути встановлена за формулою

$$M \geq \left\lceil \frac{\sum_i^k (T_{\text{р},i} + T_{\text{во},i} + t_{\text{дод},i} + t_{\text{оч},i}) n_i}{1440 - 2t_{\text{пер}} - 0,9T_{\text{то}} - 0,1t_{\text{од}}} \right\rceil, \quad (1)$$

де $T_{\text{р},i}$ – тривалість рейсу i -го виду, хв;

n_i – кількість рейсів i -го виду;

$T_{\text{то}}$ – норма часу на технічне обслуговування локомотиво-состава з урахування витрат часу на слідування до пункту технічного обслуговування, хв, хв;

$t_{\text{од}}$ – норма часу на огляд дахів електровозів з урахування витрат часу на слідування до пункту огляду, хв;

$t_{\text{дод},i}$ – тривалість додаткових операцій, хв;

$t_{\text{оч},i}$ – тривалість очікування вантажних операцій, хв.

У випадку виконання перевезень тепловозною тягою кількість локомотиво-составів може бути встановлена за формулою

$$M = \left\lceil \frac{\sum_i^k (T_{\text{р},i} + T_{\text{во},i} + t_{\text{дод},i} + t_{\text{оч},i}) n_i}{1440 - 2t_{\text{пер}} - T_{\text{то}} - t_{\text{мто}} - T_{\text{тол}}} \right\rceil, \quad (2)$$

де $T_{\text{тол}}$ – витрати часу на технічного обслуговування локомотивів локомотива поза перервами для зміни бригад.

Проблеми сучасних методів нормування переміщення локомотиво-составів у кар'єрах

пов'язані з недостатнім урахуванням обмежень швидкості, що діють під час руху. У зв'язку з цим пропонується удосконалений вираз для визначення тривалості рейсу локомотиво-состава

$$T_{p,i} = t_{p,i} + t_{пр,i} + t_{пс,i} + t_{з,i},$$

де $t_{p,i}$ – тривалість операції руху під час виконання рейсу i -го виду, хв;

$t_{пр,i}, t_{пс,i}$ – відповідно тривалість прибирання та постановки локомотиво-состава на вантажний фронт під час виконання рейсу i -го виду, хв; $t_{p,i}$ – тривалість затримок у русі під час виконання рейсу i -го виду, хв.

$t_{з,i}$ – тривалість затримок під час руху, хв.

Загальна відстань переміщення під час рейсу i -го виду може бути встановлена за виразом

$$L_{p,i} = L_{вф,i} - m_c l_{в} - l_{нав,i} - l_{вив,i},$$

де $L_{вф,i}$ – довжина маршруту між кінцями колій на вантажних фронтах, при виконанні рейсу i -го виду, м;

m_c – кількість вагонів у локомотиво-составі, ваг;

$l_{в}$ – довжина вагона у локомотиво-составі, м;

$l_{нав}, l_{вив}$ – відстань, яку локомотиво-состав проходить під час виконання операцій навантаження та вивантаження, пов'язаних з виконанням рейсу i -го виду, м.

Загальна відстань переміщення під час виконання рейсу i -го виду включає відстань прибирання з вантажного фронту $l_{пр,i}$, руху l_p , та постановки на вантажний фронт $l_{пс,i}$.

$$L_{p,i} = l_{пр,i} + l_p + l_{пс,i}. \quad (3)$$

Відстань прибирання та постановки визначається в залежності від розташування локомотива в голові чи хвості состава відносно вантажного фронту і напрямку виконання подальших вантажних робіт, що співпадає, чи протилежний напрямку рейсу. При цьому, необхідно враховувати, що операція постановки локомотиво-составу на вантажний вимагає завчасного зниження швидкості до допустимого значення на відстані не менше ніж довжина вагона.

Приклад розрахункової схеми визначення тривалості рейсу локомотиво-составу наведено на рис. 1, довжину локомотива позначено як $l_{лк}$.

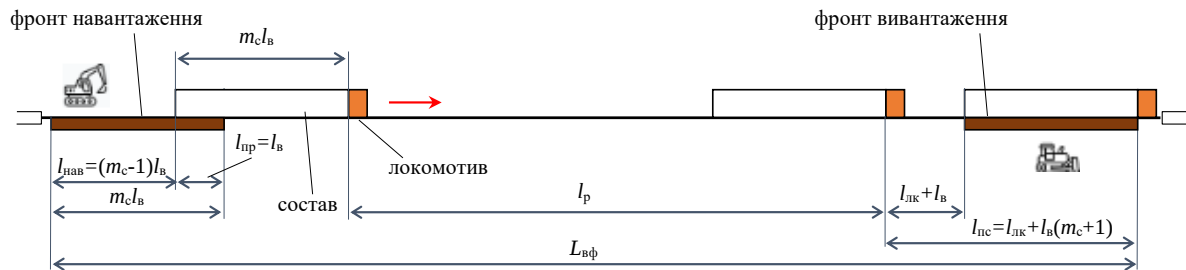


Рис. 1. Розрахункова схема визначення тривалості рейсу локомотиво-составу

Відстань руху може бути встановлена на підставі виразу (3) як

$$l_{p,i} = L_{p,i} - l_{пр,i} - l_{пс,i}.$$

При виконанні переміщень локомотиво-составів у кар'єрах, так як і при виконанні маневрів на магістральному залізничному транспорті [12], частина операцій руху виконується на короткій відстані що не дозволяє досягти максимально допустимих швидкостей руху. У зв'язку з цим попередньо встановлюється максимальна відстань, яку локомотиво-состав може подолати у режимі розгін гальмування за виразом

$$l_{рг} = \frac{(\alpha_{рг} + \beta_{рг} m_c) v_{\max}^2}{7,2},$$

де $\alpha_{рг}$ – маневровий параметр, що враховує час, необхідний для зміни швидкості руху локомотива на 1 км/год під час розгону, і час,

необхідний для зміни швидкості руху локомотива на 1 км/год під час гальмування, с/км/год;

$\beta_{рг}$ – маневровий параметр, що враховує додатковий час на зміну швидкості руху кожного вагона в маневровому составі на 1 км/год під час розгону і додатковий час на зміну швидкості руху кожного вагона в маневровому составі на 1 км/год під час гальмування, с/км/год на вагон;

$v_{\max}$ – максимально допустима швидкість руху, км/год.

Якщо $l_{p,i} < l_{рг}$, то, через обмеження довжини маршруту, локомотиво-состав не встигає досягти максимально допустимої швидкості і витрати часу на операцію руху встановлюються за виразом

$$t_{p,i} = \frac{\sqrt{20 \cdot l_p (\alpha_{рг} + \beta_{рг} m_c)}}{100},$$

інакше локомотиво-состав встигає досягти максимально-допустимої швидкості і певний час рухається з нею, при цьому витрати часу на операцію руху встановлюються за виразом

$$t_{p,i} = \frac{(\alpha_{pr} + \beta_{pr} m_c) v_{\max}}{120} + \frac{0,06 l_{p,i}}{v_{\max}}.$$

У випадку, якщо рух здійснюється постійними та пересувними коліями, що мають різні обмеження швидкості витрати часу встановлюються табличним методом [12]. Для приблизних розрахунків може використовуватись вираз

$$t_{p,i} = \frac{(\alpha_{pr} + \beta_{pr} m_c) v_{\max}}{120} + \frac{0,06 l_{p,i}}{v_{cp}}.$$

де v_{cp} – середня швидкість руху на маршруті.

$$v_{cp} = v_{\max}^{пст} - \frac{l_{пер,i}}{l_{p,i}} (v_{\max}^{пст} - v_{\max}^{пер}),$$

де $v_{\max}^{пст}$, $v_{\max}^{пер}$ – відповідно максимально допустима швидкість руху постійними та пересувними коліями, км/год;

$l_{пер,i}$ – відстань руху пересувними коліями, м.

Якщо маршрут руху локомотиво-состава передбачає зміни напрямку, то тривалість руху встановлюється як сума тривалості руху по окремим ділянкам.

Швидкість руху по вантажних фронтах $v_{вф}$ встановлюється в залежності від місцевих умов рівною 5 км/год або 3 км/год. При цьому, витрати часу на прибирання з вантажного фронту та постановки на вантажний фронт встановлюються за формулами

$$t_{пр,i} = \frac{0,06 l_{пр,i}}{v_{вф}}, \quad t_{пс,i} = \frac{0,06 l_{пс,i}}{v_{вф}}.$$

Затримки локомотиво-составів під час руху виникають при прослідуванні стрілочних переводів, світлофорів, розрахункових підйомів та ковзаючих з'їздів. Їх тривалість може бути визначена в залежності від довжини маршруту пересування за емпіричним виразом

$$\begin{cases} t_{3,i} = 4,13 + \frac{6,7 l_p}{10^5} \\ t_{3,i} \geq 5,84 \end{cases}$$

Простої локомотиво-составів в очікуванні вантажних операцій $t_{оч,i}$ залежать від порядку взаємного закріплення вантажних фронтів навантаження та вивантаження та кількості локомотиво-составів, що їх обслуговують.

Якщо перевезення здійснюються між одним вантажним фронтом навантаження та одним вантажним фронтом вивантаження одним локомотиво-составом, то простої локомотиво-составів

в очікуванні вантажних операцій у такому випадку відсутні. Якщо перевезення здійснюються між одним вантажним фронтом навантаження та одним вантажним фронтом вивантаження декількома локомотиво-составами, то простій локомотиво-составів в очікуванні вантажних операцій має постійну величину, яка може бути встановлена шляхом побудови графіків Ганта. Якщо на вантажний фронт вивантаження надходять завантажені вагони з декількох вантажних фронтів навантаження, або на вантажний фронт навантаження надходять порожні вагони з декількох вантажних фронтів вивантаження, то простій локомотиво-составів в очікуванні вантажних операцій буде мати випадкову величину. В такому випадку величина простоїв визначається методами теорії систем масового обслуговування. Найбільш розповсюдженими вантажними фронтами кар'єрів є пункти завантаження, що обслуговуються екскаваторами, а також пункти вивантаження породи у відвали. Такі вантажні fronti можуть розглядатися як одноканальні системи масового обслуговування з очікуванням, що мають постійну тривалість обслуговування та випадковий потік замовлень. Величина простою в очікуванні обслуговування в такій системі складає

$$t_{оч} = \frac{t_o^2}{2(\bar{t}_n - t_o)} \left(1 + \frac{\sigma_n^2}{\bar{t}_n^2} \right)$$

де $\bar{t}_n$ – середній інтервал часу між надходженнями локомотиво-составів для виконання вантажних операцій, хв;

t_o – тривалість зайняття вантажного фронту обслуговуванням одного состава, хв;

σ_n – середнє квадратичне відхилення часу надходження заявок.

Середній інтервал часу між надходженнями локомотиво-составів для виконання вантажних операцій визначається як

$$\bar{t}_n = \frac{1440}{N},$$

де N – планові обсяги надходження локомотиво-составів на пункт вантажної роботи протягом доби.

Дробильні фабрики можуть мати декілька вантажних фронтів вивантаження. При цьому локомотиво-состави надходять на будь-який вільний вантажний фронт. Такі пункти вантажної роботи розглядаються як багатоканальні системи масового обслуговування з очікуванням, що мають постійну тривалість обслуговування та випадковий потік замовлень. Величина простою в очікуванні обслуговування в такій системі

визначається в залежності від параметрів вхідного потоку, тривалості та числа каналів обслуговування.

Закріплення пунктів вивантаження за пунктами навантаження у виразах (1) та (2), а відповідно і кількість рейсів кожного виду n_i визначається на підставі вирішення задачі мінімізації витрат часу руху локомотиво-составів. Витрати часу на оборот локомотиво-составу при перевезенні вантажу з вантажного фронту i на вантажний фронт j позначимо як t_{ij} ; x_{ij} – кількість рейсів локомотиво-составів при перевезенні вантажу з вантажного фронту i на вантажний фронт j ; n, m – відповідно кількість вантажних фронтів навантаження та вивантаження; a_i – обсяг навантаження вантажного фронту $i, i = \overline{1..n}$; b_j – обсяг вивантаження вантажного фронту $j, j = \overline{1..m}$. Тоді задача закріплення пунктів вивантаження за пунктами навантаження формулюється як задача мінімізації цільової функції

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m x_{ij} t_{ij} \rightarrow \min \quad (4)$$

при обмеженнях

$$\begin{cases} \sum_{j=1}^m x_{ij} = a_i \\ \sum_{i=1}^n x_{ij} = b_j \end{cases} \quad (5)$$

Наведена задача являє собою транспортну задачу лінійного програмування. Враховуючи, що у значній кількості випадків задача має вирожденний характер, то її рішення доцільно отримувати шляхом зведення до задачі про призначення [13]. В такому випадку розглядається задача вибору призначення N локомотиво-составів. Кожному вантажному фронту навантаження у відповідність ставиться a_i пунктів відправлення, а кожному вантажному фронту вивантаження – b_j – пунктів призначення. Враховуючи, що $\sum_{i=1}^n a_i = \sum_{j=1}^m b_j = N$, то відстані перевезень можуть бути представлені квадратною матрицею значень t_{uv} розміром N (тут u, v – пункти відправлення і призначення локомотиво-составу). В такому випадку задача мінімізації цільової функції (4) при обмеженнях (5) може бути зведена до задачі мінімізації цільової функції

$$\sum_{u=1}^N \sum_{v=1}^N x_{uv} t_{uv} \rightarrow \min$$

при обмеженнях

$$\begin{cases} \sum_{u=1}^N x_{uv} = 1 \\ \sum_{v=1}^N x_{uv} = 1 \\ x_{uv} \in B \end{cases}$$

Необхідно відзначити, що аналітичні методи розрахунку технічного забезпечення транспортних систем кар'єрів мають обмежені

можливості для урахування усіх вимог технології. Зокрема в роботі кар'єрів спостерігаються значні систематичні простой рухомого складу, пов'язані з його виведенням до пунктів зміни бригад в кінці змін, а також введенням у роботу на початку змін. Окрім того, виконання технічного обслуговування рухомого складу у денну зміну пов'язане з можливими простоями в очікуванні цього обслуговування, а також порушенням циклів роботи локомотиво-составів по обслуговуванню вантажних фронтів. Тому аналітичні методи дозволяють встановити лише мінімальну потребу у технічному забезпеченні транспортних систем кар'єрів, а отримані на їх підставі рішення потребують подальшої перевірки методами графічного чи імітаційного моделювання.

Наукова новизна та практична значимість

Наукова новизна полягає в удосконаленні методів аналітичного моделювання роботи залізничного транспорту кар'єрів за рахунок врахування цілочисельного характеру задач, та використання методів теорії систем масового обслуговування для оцінки простой в очікуванні вантажних операцій.

Практична значимість результатів полягає в тому, що вони дозволяють проєктувальникам та технологам прискорити пошук роботоспроможних рішень та зменшити кількість етапів графічного або імітаційного моделювання, що вимагають значних витрат часу та ресурсів.

Висновки

1. Широке використання залізничного транспорту в гірничодобувній промисловості обумовлюється його надійністю та високою провізною спроможністю, що дозволяє ефективно транспортувати великі обсяги вантажів. Однак значні капітальні інвестиції у залізничну інфраструктуру та рухомий склад вимагають постійної підтримки відповідності техніко-технологічних параметрів залізничної транспортної системи плановим обсягам роботи. Недоліки сучасних аналітичних моделей, що використовуються для оцінки відповідності параметрів кар'єрного залізничного транспорту плановим обсягам роботи, пов'язані із складністю урахування особливостей технологічних процесів кар'єрів та відносно низькою точністю отриманих оцінок. Зокрема ці моделі не достатньо враховують цілочисельний характер задач експлуатації залізничного транспорту кар'єрів та залежності

величини простоїв технічних засобів залізниць від рівня завантаження транспортної системи.

2. В результаті дослідження розроблено методи оцінки наявної та потрібної переробної спроможності вантажних фронтів які, на відміну від існуючих, враховують необхідність виведення рухомого складу в пункти зміни локомотивних бригад. З використанням методів теорії експлуатації залізниць удосконалено аналітичні методи оцінки перевезень між вантажними фронтами за рахунок детального урахування обмежень швидкості руху локомотиво-составів. При жорсткому закріпленні пункту навантаження за пунктом вивантаження величина простою може бути встановлена на основі побудови графіків Ганта. Якщо на вантажний фронт вивантаження надходять завантажені вагони з декількох вантажних фронтів навантаження, або на вантажний фронт навантаження надходять порожні вагони з декількох вантажних фронтів вивантаження, то простий локомотиво-составів в очікуванні вантажних операцій буде мати випадкову величину і може бути встановлений на основі методів теорії систем масового обслуговування. Для скорочення витрат часу на перевезення формалізовано задачу закріплення пунктів вивантаження за пунктами навантаження. На основі виконаних досліджень запропоновано удосконалений метод розрахунку парку локомотиво-составів електровозної та тепловозної тяги для виконання перевезень.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Olshin B. B. The Coming of the Railway: A New Global History, 1750-1850: By David Gwyn. New Haven: Yale University Press, 2023. 416 pp., indices, and b/w and color illustrations. *Terrae Incognitae*. 2023. No. 55 (3). P. 307–308. DOI: <https://doi.org/10.1080/00822884.2023.2277588>.
2. Opportunities and challenges of rail haulage systems in current mining operations / Dammers M. та ін. *Engineering and Mining Journal*. 2016. вип. 217. С. 42–47. URL: https://merchiers-consulting.de/assets/downloads/Merchiers_Vortrag_EMJ_pg42-47.pdf (дата звернення: 23.09.2025).
3. Rakishev B., Moldabaev S. Typification of the Mining Technological Complexes at the Quarries. *Proceedings of the 12th International Symposium Continuous Surface Mining - Aachen 2014*. : Lecture Notes in Production Engineering. Springer, Cham., 2015.

P. 83–90. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-12301-1_9.

4. Хилькевич Д. В. Аналіз методів розрахунку парку рухомого складу залізничного транспорту гірничо-видобувних підприємств. *Транспортні системи та технології перевезень*. 2025. № 29, С. 14–22. DOI: <https://doi.org/10.15802/tstt2025/325348>.

5. Фролов О. О., Косенко Т. В. Відкриті гірничі роботи. Частина I. Процеси відкритих гірничих робіт : навчальний посібник. Київ : КПП ім. Ігоря Сікорського, 2020. 151 с.

6. Шинін Л. Н., Пригунов О. С., Денищенко О. В. Транспортні комплекси кар'єрів : навчальний посібник. Дніпро : Національний гірничий університет, 2015. 241 с.

7. Організація і планування відкритих гірничих робіт (системний підхід) : навчальний посібник / Б. Є. Собко та ін. ; Міністерство освіти та науки України. Дніпро : НТУ «ДП», 2020. 187 с.

8. Kozachenko D., Verlan A., Korobyova R. Improvement of graphical model of railway stations functioning. *2020 International Conference on Decision Aid Sciences and Application (DASA)*. Sakheer, Bahrain, 2020. P. 395-398. DOI: <https://doi.org/10.1109/dasa51403.2020.9317139>.

9. Верлан А. І. Графоаналітична модель функціонування залізничних станцій. *Східноєвропейський журнал передових технологій*. 2014. № 3 (72), том 6, С. 21-26. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2014.30906>.

10. Proposal of a Transport Planning Model for the Removal of Quarry Stone Using a Simulation / J. Saderova et al. *Applied Sciences*. 2024. Vol. 14, no. 12. P. 5130. DOI: <https://doi.org/10.3390/app14125130>.

11. Panagiotou G. N. Discrete mine systems simulation in Europe. *International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment*. 1999. Vol. 13, No 2. P. 43-46. DOI: <https://doi.org/10.1080/0920811990894420>.

12. Козаченко Д. М., Журавель І. Л., Левицький І. Ю. Нормування тривалості виконання маневрових пересувань з врахуванням обмеження швидкості руху на окремих елементах прямування составів. *Залізничний транспорт України*. 2014. № 6 (109). С. 30–36.

13. Козаченко Д. М., Вернигора Р. В., Малашкін В. В. Основи дослідження операцій у транспортних системах: приклади та задачі : навч. посіб. Дніпропетровськ : Дніпропетр. нац. ун-т залізн. трансп. ім. акад. В. Лазар., 2015. 277 с.

Надійшла в редколегію 20.03.2025

Прийнята до друку 30.05.2025

IMPROVED ANALYTICAL METHODS FOR ASSESSING TECHNICAL AND TECHNOLOGICAL PARAMETERS OF QUARRY RAILWAY TRANSPORT

Purpose. The purpose of this study is to improve analytical methods for assessing the compliance of technical parameters of quarry railway transport with planned work volumes. **Methodology.** The research was conducted using methods from railway operation theory and operations research. **Results.** To increase the competitiveness of Ukrainian mining products, it is important to reduce their production cost. The costs of quarry operations largely depend on the efficiency of industrial railway transport, which ensures the movement of large volumes of raw materials, finished products, and waste. The shortcomings of modern analytical models used to assess the compliance of technical parameters of quarry railway transport with planned work volumes are related to the complexity of considering the specifics of quarry technological processes and the relatively low accuracy of the obtained estimates. Specifically, these models do not sufficiently account for the integer nature of quarry railway transport operation tasks and the dependence of equipment downtime on the transport system's load level. As a result of the research, methods have been developed to assess the available and required processing capacity of loading and unloading fronts. These methods, unlike existing ones, account for the need to withdraw rolling stock to locomotive crew change points. Using methods from railway operation theory, the analytical methods for assessing transportation between loading and unloading fronts have been improved by meticulously considering locomotive-consist speed limits. In cases where a loading point is strictly assigned to an unloading point, downtime can be determined by constructing Gantt charts. If loaded wagons arrive at an unloading front from several loading fronts, or empty wagons arrive at a loading front from several unloading fronts, the downtime of locomotive-consists waiting for freight operations will be a random variable and can be determined using methods from queuing theory. To reduce transportation time, the task of assigning unloading points to loading points has been formalized. Based on the conducted research, an improved method for calculating the required fleet of electric and diesel locomotive-consists for transportation has been proposed. **Originality.** The **originality** of this study lies in improving the analytical modeling methods for quarry railway transport operations by accounting for the integer nature of the tasks and using queuing theory methods to estimate downtime while waiting for freight operations. **Practical value.** The practical value of the results is that they allow designers and technologists to speed up the search for viable solutions and reduce the number of stages of graphical or simulation modeling, which require significant time and resource expenditures.

Keywords: railway transport, quarry railway transport, processing capacity, rolling stock fleet, optimization