

О.О. Фролов, д.т.н., проф.

Т.В. Косенко, ст. викладач

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Удосконалення методу визначення раціональних параметрів екскаваторно-автомобільних комплексів потужних кар'єрів

Наведено результати досліджень щодо визначення раціональних параметрів екскаваторно-автомобільних комплексів під час розробки родовищ корисних копалин в умовах потужних глибоких кар'єрів з видобутку залізорудної сировини. Встановлено, що оптимальне співвідношення місткості кузова автосамоскида до місткості ковша екскаватора є найважливішою умовою, яка забезпечує високопродуктивне використання екскаваторів і автотранспорту при мінімальній вартості гірничо-транспортних робіт.

Отримана аналітична залежність з визначення необхідного співвідношення між місткістю кузова автосамоскида і місткістю ковша екскаватора для досягнення максимально можливої продуктивності екскаваторно-автомобільного комплексу під час навантаження і транспортування будь-яких типів гірських порід з урахуванням характеристики гірничої маси, тривалості її навантаження екскаватором, тривалості обмінних операцій, відстані горизонтальних і похилих ділянок траси, висоти підйому гірничої маси автотранспортом та середнього ухилу похилих ділянок траси.

Для умов кар'єру Полтавського гірничо-збагачувального комбінату проаналізовано існуюче обладнання екскаваторно-автомобільного комплексу, виконано розрахунок необхідної місткості ковшів екскаваторів для обраних маршрутів та рекомендовано найбільш раціональні поєднання виймального і транспортного обладнання. Встановлено, що для розкривних робіт найбільш ефективним з існуючого парку екскаваторів буде Komatsu PC-3000 з місткістю ковша 15 м^3 (розраховане значення оптимальної місткості ковша екскаватора становить $15,3 \text{ м}^3$) за умови транспортування гірничої маси автосамоскидом Hitachi EH-3500A з місткістю кузова $115,1 \text{ м}^3$. Видобувні роботи доцільно проводити екскаваторами з місткістю ковшів $13,5$ та $11,5 \text{ м}^3$, використовуючи автосамоскид Hitachi EH-3500A.

Результати наукових досліджень дозволяють для існуючих гірничо-геологічних і технологічних умов будь-якого кар'єру визначати раціональні параметри екскаваторно-автомобільних комплексів для оптимізації структури комплексної механізації гірничих робіт.

Ключові слова: кар'єр; екскаваторно-автомобільний комплекс; структура комплексної механізації; гірські породи; місткість ковша екскаватора; місткість кузова автосамоскида.

Постановка проблеми та її зв'язок з важливими практичними завданнями. Гірничо-геологічні умови залягання родовищ корисних копалин, що розробляються потужними глибокими кар'єрами, надзвичайно різноманітні. Зміна типів і властивостей гірських порід, а також умов їхнього залягання з розширенням і поглибленням кар'єру ведуть до зниження продуктивності і погіршення техніко-економічних показників використання екскаваторно-автомобільних комплексів, що складають структуру комплексної механізації. Зокрема, знижується швидкість руху автотранспорту, ускладнюється обмін транспортних засобів від навантаження екскаватором, погіршується зручність розміщення транспортних комунікацій, збільшується тривалість доставки вантажів на поверхню. Це викликає необхідність вишукування способів інтенсифікації роботи екскаваторно-автомобільного комплексу, що застосовується в конкретних умовах кар'єру.

Основним параметром, що впливає на кінцевий результат роботи екскаваторно-автомобільного комплексу, вважається співвідношення між місткістю кузова автосамоскида V_a і місткістю ковша екскаватора E . Оскільки навантаження і транспортування в кар'єрі являють собою єдиний технологічний процес, який забезпечується різним обладнанням комплексу, то зазначені параметри повинні бути тісно пов'язані між собою та формуватися на якісній і кількісній взаємодії обладнання [1]. Тому оптимізація параметрів екскаваторно-автомобільних комплексів, що становлять структуру комплексної механізації гірничих робіт на потужних кар'єрах, є актуальним завданням, вирішення якого дозволяє покращити техніко-економічні показники роботи гірничого підприємства в цілому.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Оптимізація параметрів екскаваторно-автомобільних комплексів досліджувалася багатьма вченими [2–10]. Зокрема, автори [3] довели, що в основі продуктивності комплексу обладнання закладено тривалість циклу роботи екскаватора з урахуванням часу на від'їзд завантаженого автосамоскида, часу на розворот і встановлення порожнього автосамоскида

в зону навантаження та затримки автосамоскида при його русі на трасі. Однак при цьому не була врахована відстань та тривалість транспортування гірничої маси.

Бардась О.В. в [4] зазначає, що ефективність роботи екскаваторно-автомобільних комплексів обумовлюється лише співвідношенням кількості працюючих автосамоскидів та екскаваторів у кар'єрі, а коливання продуктивності обладнання залежать від простоїв екскаваторів і автосамоскидів. При цьому параметри обладнання взагалі не беруться до уваги.

У [5] зазначено, що раціональне співвідношення залежить як від технічної характеристики навантажувального обладнання, так і від гірничо-технічних умов роботи комплексу. Дослідивши поєднання автосамоскида БелАЗ-75211 з екскаваторами, які мають різну ємність ковша, дослідники прийшли до висновку, що максимальна річна продуктивність екскаваторно-автомобільного комплексу може бути досягнута при співвідношенні $V_a/E = 5$. Веснін А.В. пропонує обирати екскаваторно-автомобільний комплекс таким чином, щоб кількість ковшів екскаватора забезпечувала коефіцієнт вантажопідйомності автосамоскида в оптимальних межах, тривалість навантаження була мінімальною, а місткість кузова автосамоскида дозволяла перевозити необхідний об'єм гірничої маси [6].

Автори [7] зазначають, що одним з факторів, що визначають правильний вибір екскаваторно-автомобільного комплексу, є співвідношення місткості кузова автосамоскида і ковша екскаватора. Ними проведено моделювання роботи декількох виймально-навантажувальних і транспортних засобів з урахуванням систематичних і випадкових зупинок та змін тривалості операцій процесів екскавації і транспортування та встановлено, що найбільш раціональний комплекс з співвідношенням V_a/E менше 4.

Оптимізація роботи системи «екскаватор-автосамоскид» з метою досягнення максимальної продуктивності, а відповідно і зниження затрат, досліджена в [8]. На першому етапі було визначено оптимальну кількість автосамоскидів, які мають працювати з кожним екскаватором. На другому етапі було встановлено, за яким маршрутом автосамоскиди повинні бути направлені до екскаватора.

У [9] зазначено експертну систему для встановлення оптимального поєднання гідравлічного екскаватора та автосамоскида на основі 6 критеріїв вибору обладнання, а саме: зусилля черпання, геологічні і геотехнічні фактори, параметри видобування, виробничі критерії, параметри обладнання та собівартість продукції. Вибір автосамоскида здійснюється, виходячи з умови заповнення кузова від 3 до 6 ковшів екскаватора.

Автори [10] в своїх дослідженнях прийшли до висновку, що продуктивність і ефективність екскаваторно-автомобільного комплексу залежить від узгодженості обладнання між собою, тобто розмір кузова автосамоскида залежить від розмірів ковша екскаватора, а тривалість зупинок необхідно звести до мінімуму. Як критерій вибору обладнання закладено дві умови: перша – мінімальне співвідношення $V_a/E = 4$; друга – максимальне співвідношення V_a/E не має перевищувати 6–8.

Аналіз літературних джерел показує, що на даний час відсутня єдина думка щодо визначення оптимальних параметрів екскаваторно-автомобільного комплексу. Зокрема, одними дослідниками пропонується визначати співвідношення місткості кузова до місткості ковша екскаватора тільки на підставі певного критерію (тривалості циклу екскаватора, коефіцієнта вантажопідйомності, тривалості очікування тощо), іншими – чисельні значення V_a/E приймаються без обґрунтування, а деякі науковці, під час визначення максимальної продуктивності комплексу, взагалі не враховують V_a/E як фактор, що впливає на кінцевий результат. Отже, дослідження з удосконалення методу визначення раціонального співвідношення місткостей кузова автосамоскида та ковша екскаватора, який дозволить враховувати максимальну кількість факторів впливу на продуктивність комплексу, необхідно продовжити.

Метою досліджень є удосконалення методу визначення раціональних параметрів екскаваторно-автомобільних комплексів, що становлять структуру комплексної механізації гірничих робіт під час розробки родовищ корисних копалин у конкретних умовах потужних кар'єрів.

Викладення основного матеріалу. Сумісність параметрів місткостей навантажувальної і транспортної ланок екскаваторно-транспортного комплексу визначається гірничо-геологічними, технологічними, технічними та економічними факторами [11]. В основі пропонованих досліджень закладено умову рівності відносних значень продуктивностей екскаватора і автосамоскида (так зване математичне очікування виймально-навантажувального і транспортного процесів). Відносні значення встановлювалися шляхом визначення максимально можливих значень продуктивності екскаватора по навантаженню гірничої маси та продуктивності автосамоскида щодо її транспортування.

Для встановлення кількісного і якісного взаємозв'язку продуктивності комплексу обладнання циклічної дії з продуктивністю транспортних машин розглянуто їхні продуктивності.

Згідно з [12], годинна продуктивність екскаватора при навантаженні гірничої маси у автосамоскид визначається за:

$$Q_c = \frac{60k_s}{t_{\text{ц}} \frac{q_a}{q_c} + t_o} q_a k_q, \text{ т/год}, \quad (1)$$

де k_3 – коефіцієнт зниження продуктивності через нерівномірність навантажувально-транспортних операцій; q_a – вантажопідйомність автосамоскида, т; k_q – коефіцієнт використання вантажопідйомності; $t_{ц}$ – середня тривалість циклу екскавації породи, хв; q_c – маса гірничої маси в ковші екскаватора, т; t_o – тривалість обміну автосамоскидів під завантаження, хв.

З виразу (1) випливає, щоб досягти максимальної продуктивності екскаватора, необхідно зменшувати тривалість обміну автосамоскидів під завантаження t_o . Якщо припустити, що t_o буде наближатися до нуля або $t_o = 0$, то формула отримає вигляд:

$$Q_{e.max} = \frac{60k_3}{t_{ц}} q_c k_q, \text{ т/год.} \quad (2)$$

Відносне зменшення продуктивності екскаватора при навантаженні гірничої маси у автосамоскид у цьому разі буде становити:

$$Q_{відн.е} = \frac{Q_e}{Q_{e.max}} = \frac{t_{ц} \frac{q_a}{q_c}}{t_{ц} \frac{q_a}{q_c} + t_o}. \quad (3)$$

Експлуатаційна продуктивність автосамоскида при навантаженні його екскаватором визначається як

$$Q_a = \frac{60k_3}{t_{ц} \frac{q_a}{q_c} + t_o + t_p} q_a k_q, \text{ т/год,} \quad (4)$$

де t_p – середня тривалість рейсу автосамоскида без врахування навантажувально-обмінних операцій, хв.

Аналіз (4) показує, що продуктивність автосамоскидів буде збільшуватися зі зменшенням кількості навантажених ковшів екскаватора n_k , а максимальне значення продуктивності буде у випадку, коли $n_k = q_a/q_c = 1$, тобто

$$Q_{a.max} = \frac{60k_3}{t_{ц} + t_o + t_p} q_a k_q, \text{ т/год.} \quad (5)$$

Відносне зменшення продуктивності автосамоскидів становить

$$Q_{відн.а} = \frac{Q_a}{Q_{a.max}} = \frac{t_{ц} + t_o + t_p}{t_{ц} \frac{q_a}{q_c} + t_o + t_p}. \quad (6)$$

Згідно з [13], повна технологічна узгодженість у роботі екскаваторно-транспортного комплексу настане у тому випадку, коли відносні значення продуктивностей екскаватора і автосамоскида будуть рівні між собою, тобто:

$$Q_{відн.е} = Q_{відн.а}. \quad (7)$$

З урахуванням формул (3) і (6) рішенням (7) відносно співвідношення q_a/q_c буде вираз

$$\frac{q_a}{q_c} = \frac{1}{2} \left(1 + \sqrt{1 + 4 \frac{t_o(t_{ц} + t_o + t_p)}{t_{ц}^2}} \right). \quad (8)$$

Вантажопідйомність автосамоскида виражається через місткість його кузова формулою

$$q_a = V_a \frac{\gamma}{k_p}, \quad (9)$$

де V_a – місткість кузова автосамоскида, м³; γ – щільність гірничої маси, т/м³; k_p – коефіцієнт розпушеної гірничої маси в кузові автосамоскида, а маса гірничої маси в ковші екскаватора пов'язана з місткістю ковша виразом:

$$q_c = E \frac{k_n}{k_p} \gamma, \quad (10)$$

де E – місткість ковша екскаватора, м³; k_n – коефіцієнт наповнення ковша.

Тоді формула (8), яка встановлює раціональне співвідношення між місткістю кузова автосамоскида і місткістю ковша екскаватора в навантажувально-транспортному процесі, набуде вигляду

$$\frac{V_a}{E} = \frac{1}{2} k_n \left(1 + \sqrt{1 + 4 \frac{t_o(t_{ц} + t_o + t_p)}{t_{ц}^2}} \right). \quad (11)$$

В [14] на підставі наведеної вище формули побудована залежність між співвідношенням V_a/E та середньою тривалістю рейсу автосамоскида для різних значень коефіцієнта наповнення ковша екскаватора, який в свою чергу характеризує тип гірничої породи, що виймається (рис. 1). Середня

тривалість циклу екскавації породи прийнята $t_{ц} = 0,5$ хв, середня тривалість обміну автосамоскидів під завантаження становить $t_o = 1$ хв.

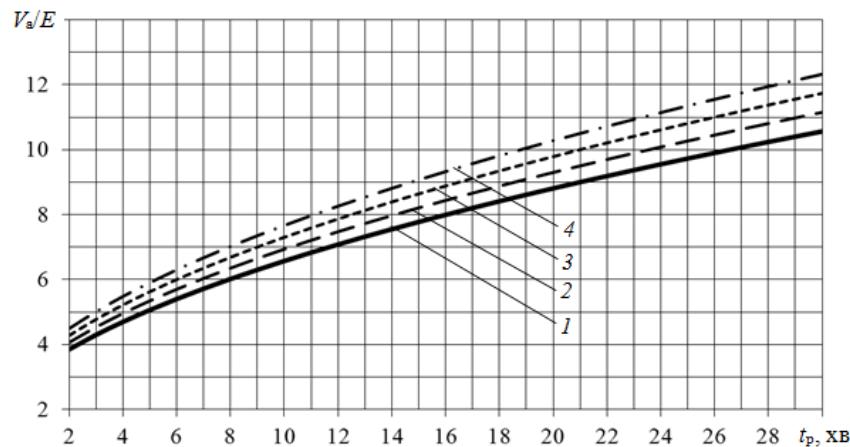


Рис. 1. Залежність співвідношення V_a/E від середньої тривалості рейсу автосамоскида t_p для різних значень коефіцієнта наповнення ковша екскаватора: 1 – $k_n = 0,9$; 2 – $k_n = 0,95$; 3 – $k_n = 1,0$; 4 – $k_n = 1,05$

Аналіз графічних залежностей показує, що при тривалості рейсу 2 хв оптимальне співвідношення між місткістю кузова автосамоскида і місткістю ковша екскаватора в середньому становить 4 для всіх типів порід. При збільшенні тривалості рейсу до 30 хв для $k_n = 1,05$ (пісок, супісок) найбільш доцільним буде $V_a/E = 12$, а для $k_n = 0,9$ (скельні розпушені породи) оптимальною кількістю ковшів в кузові буде 10. Таким чином, при збільшенні тривалості рейсу автосамоскиду, а отже відстані транспортування, співвідношення між місткістю кузова автосамоскида і місткістю ковша екскаватора змінюється.

Тривалість виконання рейсу автосамоскиду в загальному вигляді можна представити формулою

$$t_p = \frac{3600L}{v_{\text{сеп}}\beta}, \text{ с}, \quad (12)$$

де L – довжина транспортування, км; $v_{\text{сеп}}$ – середня технічна швидкість руху автосамоскиду, км/год; β – коефіцієнт використання пробігу, що характеризується відношенням вантажного пробігу до загального.

В [15] запропоновано вираз для визначення середньої технічної швидкості руху автосамоскиду $v_{\text{сеп}}$ в період виконання транспортного циклу, яка враховує вплив глибини кар'єру і величини ухилів автодоріг:

$$v_{\text{сеп}} = \frac{L_r + \frac{H}{i_{\text{сеп}}}}{\frac{L_r}{v_{\text{т.г}}} + \frac{H}{v_{\text{т.п}} i_{\text{сеп}}}}, \text{ км/год}, \quad (13)$$

де L_r – сумарна довжина горизонтальних ділянок траси, км; H – висота підйому гірничої маси, км; $i_{\text{сеп}}$ – середній ухил похилих ділянок траси; $v_{\text{т.г}}$, $v_{\text{т.п}}$ – технічні швидкості руху, відповідно на горизонтальних і похилих ділянках траси кар'єру, км/год.

З урахуванням (15) тривалість рейсу автосамоскиду визначиться

$$t_p = \frac{3600L \left(\frac{L_r}{v_{\text{т.г}}} + \frac{H}{v_{\text{т.п}} i_{\text{сеп}}} \right)}{\left(L_r + \frac{H}{i_{\text{сеп}}} \right) \beta}, \text{ с}. \quad (14)$$

Остаточню вираз для встановлення раціонального співвідношення основних параметрів екскаваторно-автомобільного комплексу набуде вигляду

$$\frac{V_a}{E} = \frac{1}{2} k_n \left(1 + \sqrt{1 + 4 \frac{t_o \left((t_{ц} + t_o) \left(L_r + \frac{H}{i_{\text{сеп}}} \right) \beta + 3600L \left(\frac{L_r}{v_{\text{т.г}}} + \frac{H}{v_{\text{т.п}} i_{\text{сеп}}} \right) \right)}{t_{ц}^2 \left(L_r + \frac{H}{i_{\text{сеп}}} \right) \beta}} \right). \quad (15)$$

Таким чином, володіючи інформацією про місця розташування вибоїв екскаваторів та пунктів розвантаження гірничої маси автосамоскидами для конкретних гірничо-геологічних умов розробки кар'єру можна встановити оптимальні параметри екскаваторно-автомобільного комплексу залежно від типу гірничої маси, відстаней горизонтальних і похилих ділянок траси, технічних швидкостей руху автосамоскиду на цих ділянках, висота підйому гірничої маси та середнього ухилу ділянок траси.

За наведеною вище методикою досліджень для умов кар'єру Полтавського гірничо-збагачувального комбінату проаналізовано існуюче обладнання екскаваторно-транспортного комплексу та рекомендовано найбільш раціональні його варіанти. Дослідження виконано за таких умов: корисна копалина – магнетитовий кварцит (залізна руда) з коефіцієнтом наповнення $k_n = 0,9$ (скельні розпушені породи); видобування корисної копалини відбувається на двох горизонтах: I – (-220 м), II – (-102 м); перевантажувальний пункт для руди розміщено на горизонті I – (-56 м); відстань транспортування корисної копалини від вибою I до перевантажувального пункту I становить 2,9 км, від вибою II до перевантажувального пункту I – 4,18 км; розкрив представлений різноманітними скельними породами з $k_n = 0,9$; розкривні роботи в кар'єрі проводяться на горизонті III – +26,5 м; його перевантаження відбувається на горизонті 2 – +37,5 м; відстань транспортування розкривних порід від вибою III до перевантажувального пункту 2 становить 2,25 км. Як виймально-навантажувальне обладнання використовуються екскаватори EX-5600E, EX3600-5 (Hitachi), PC-3000 (Komatsu). Парк автосамоскидів складається з CAT-785C ($V_a = 91\text{ м}^3$), Komatsu HD1200 ($V_a = 78\text{ м}^3$), Hitachi EH-3500A ($V_a = 115,1\text{ м}^3$).

Висота підйому гірничої маси на кар'єрі відносно горизонту розробки становить:

$$H_{I-1} = |H_I - H_1| = |-220 - (-56)| = 164\text{ м.}$$

$$H_{II-1} = |H_{II} - H_1| = |-102 - (-56)| = 46\text{ м.}$$

$$H_{III-2} = |H_{III} - H_2| = |26,5 - 37,5| = 11\text{ м.}$$

Середній ухил траси, по якій гірничі маса доставляється до перевантажувальних пунктів становить:

$$\text{- для маршруту I-1} - i_{cp\ I-1} = 0,057;$$

$$\text{- для маршруту II-1} - i_{cp\ II-1} = 0,011;$$

$$\text{- для маршруту III-2} - i_{cp\ III-2} = 0,005.$$

Відповідно до формули (15) для кожного маршруту переміщення гірничої маси визначено раціональні значення місткості ковша екскаватора з урахуванням існуючого на підприємстві парку автосамоскидів. Результати розрахунків занесено до таблиці 1.

Таблиця 1

Раціональні значення місткості ковша екскаватора

№ маршруту	Тип автосамоскида	Розрахункове значення місткості ковша екскаватора E , м^3
I-1 корисна копалина	CAT-785C	10,2
	Komatsu HD1200	8,97
	Hitachi EH-3500A	13,5
II-1 корисна копалина	CAT-785C	8,5
	Komatsu HD1200	7,65
	Hitachi EH-3500A	11,5
III-2 розкрив	CAT-785C	11,7
	Komatsu HD1200	10,1
	Hitachi EH-3500A	15,3

Згідно з отриманими даними для розкривних робіт (вибій III) з існуючого парку екскаваторів підходить лише Komatsu PC-3000 з місткістю ковша 15 м^3 (розраховане значення оптимальної місткості ковша екскаватора складає $15,3\text{ м}^3$) за умови транспортування гірничої маси автосамоскидом Hitachi EH-3500A з місткістю кузова $115,1\text{ м}^3$. Видобувні роботи доцільно проводити у вибої I екскаватором з оптимальною місткістю ковша $13,5\text{ м}^3$, у вибої II – з місткістю ковша $11,5\text{ м}^3$, використовуючи автосамоскид Hitachi EH-3500A. Однак екскаватори з такою місткістю ковша в існуючому парку відсутні (Hitachi EX 3600-5 – місткість ковша 22 м^3 ; Hitachi EX-5600E – місткість ковша 23 м^3). Застосування інших марок автосамоскидів та екскаваторів при будь-якому поєднанні є взагалі неефективним. Тому, якщо підприємство у майбутньому буде змінювати або поповнювати парк виймально-навантажувального обладнання, то для даних умов рекомендується застосовувати такі екскаватори: EG-150 – $E = 12\text{ м}^3$; Hitachi EX-1900 – $E = 11\text{ м}^3$; Komatsu PC-2000 – $E = 11-12\text{ м}^3$; TerexRH-120E – $E = 13,5-16,5\text{ м}^3$; Liebherr R-9250 – $E = 13-17\text{ м}^3$.

Висновки та перспективи подальших досліджень. Проведеними дослідженнями щодо визначення раціональних параметрів екскаваторно-автомобільних комплексів при розробці родовищ корисних копалин в умовах потужних кар'єрів встановлено, що оптимальне співвідношення місткості кузова автосамоскида до місткості ковша екскаватора є найважливішою умовою, яка забезпечує високопродуктивне використання екскаваторів і автотранспорту при мінімальній вартості гірничотранспортних робіт. Отримана аналітична залежність з визначення необхідного співвідношення між місткістю кузова автосамоскида і місткістю ковша екскаватора для досягнення максимально можливої продуктивності екскаваторно-автомобільного комплексу під час навантаження і транспортування будь-яких типів гірських порід з урахуванням глибини кар'єру, довжини горизонтальних і похилих ділянок траси, висоти підйому гірничої маси та середнього ухилу похилих ділянок.

Використовуючи отриману залежність, для умов кар'єру Полтавського гірничо-збагачувального комбінату, проаналізовано існує обладнання екскаваторно-автомобільного комплексу та рекомендовано найбільш раціональні поєднання виймального і транспортного обладнання.

Таким чином, для існуючих гірничо-геологічних і технологічних умов будь-якого кар'єру рекомендовано метод визначення раціональних параметрів екскаваторно-автомобільних комплексів для оптимізації структури комплексної механізації гірничих робіт, який враховує тип та характеристики гірської породи, тривалість циклу навантаження гірничої маси екскаватором, тривалість обмінних операцій, відстані горизонтальних і похилих ділянок траси, висоту підйому гірничої маси автотранспортом та середній ухил похилих ділянок траси.

З огляду на отримані результати, перспективними виглядають подальші наукові дослідження зі встановлення надійності роботи екскаваторно-транспортного комплексу в умовах максимальної продуктивності.

Список використаної літератури:

1. Карьерный автотранспорт: состояние и перспективы / П.Л. Мариев, А.А. Кулешов, А.Н. Егоров, И.В. Зырянов. – СПб. : Элмор, 2004. – 427 с.
2. Максимов І.І. Аналіз впливу розміщення точки зведення гірничої маси на сумарний об'єм автотранспортної роботи / І.І. Максимов, Р.В. Слободянюк // Вісник ЖДТУ. Серія : Технічні науки. – 2018. – №1 (81). – С. 274–281.
3. Колесников В.Ф. Выбор оптимальной структуры экскаваторно-автомобильного комплекса / В.Ф. Колесников, А.И. Корякин, А.В. Стрельников // Вестник КузГТУ. – 2010. – № 1. – С. 59–61.
4. Бардась О.В. Визначення взаємозв'язку між продуктивністю екскаваторних комплексів та автосамоскидів на родовищах фосфоритів в Україні / О.В. Бардась // Економічний вісник НГУ. – 2009. – № 1. – С. 62–67.
5. Хорешок А.А. Определение оптимального соотношения сопряженных параметров экскаваторно-автомобильных комплексов / А.А. Хорешок, Д.В. Стенин // Вестник КузГТУ. – 2007. – № 5. – С. 3–4.
6. Веснин А.В. Пути повышения эффективности работы экскаваторно-автомобильных комплексов в сформировавшихся специфических условиях карьеров криворожского региона / А.В. Веснин // Вісник НТУ «ХП». – 2014. – № 9 (1052). – С. 113–119.
7. Журавлев А.Г. К вопросу обоснования производительности экскаваторно-автомобильных комплексов методом компьютерного моделирования / А.Г. Журавлев, А.В. Скороходов // Проблемы недропользования ИГД Уральского отделения РАН. – 2015. – № 2. – С. 53–60.
8. Ercelebi S.G. Optimization of shovel-truck system for surface mining / S.G. Ercelebi, A.Bascetin // The Journal of The Southern African Institute of Mining and Metallurgy. – 2009. – № 109. – P. 433–439.
9. Kirmanli C. An expert system for hydraulic excavator and truck selection in surface mining / C.Kirmanli, S.G. Ercelebi // The Journal of The Southern African Institute of Mining and Metallurgy. – 2009. – Vol. 109. – P. 727–738.
10. Determination of shovel-truck productivities in open-pit mines / H.Nguyev, T.L. Doan, T.H. Le et al. // The 3rd International Conference on Advances in Mining and Tunneling. – Vietnam : Vung Tau. – 2014. – Vol. 3.
11. Фролов О.О. Визначення раціонального співвідношення між ємністю кузова автосамоскида і ємністю ковша екскаватора / В.В. Журавель, А.В. Хоменюк, О.О. Фролов // Перспективи розвитку гірничої справи та раціонального використання природних ресурсів : матеріали всеукраїнської науково-практичної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених, квітень. – Житомир : ЖДТУ, 2017. – С. 24–26.
12. Фролов О.О. Обґрунтування технологічної узгодженості параметрів екскаваторно-автомобільного комплексу / О.О. Фролов, М.І. Соколовська, А.В. Хоменюк // Вісник Криворізького національного університету : зб. наук. праць. – 2017. – Вип. 44. – С. 3–7.
13. Кулешов А.А. Мощные экскаваторно-автомобильные комплексы карьеров / А.А. Кулешов. – М. : Недра, 1980. – 317 с.
14. Оптимізація технологічних параметрів екскаваторно-автомобільних комплексів / О.О. Фролов, М.І. Соколовська, Л.В. Краморенко, В.А. Кононович // Вісник НТУУ «ХП». Серія : Гірництво. – 2017. – Вип. 34. – С. 28–33.
15. Хоменюк А.В. Оптимізація структури комплексної механізації гірничих робіт на глибоких кар'єрах : автореф. : 8.05030101. / А.В. Хоменюк. – Київ, 2017. – 16 с.

References:

1. Mariev, P.L., Kuleshov, A.A., Egorov, A.N. and Zyrjanov, I.V. (2004), *Kar'ernyj avtotransport: sostojanie i perspektivy*, Elmor, Sankt-Peterburg, 427 p.
2. Maksymov, I.I. and Slobodjanjuk, R.V. (2018), «Analiz vplyvu rozmishhennja tochky zvezennja girnychoi' masy na sumarnyj ob'jem avtotransportnoi' roboty», *Visnyk ZhDTU, Tehnichni nauky*, No. 1 (81), pp. 274–281.
3. Kolesnikov, V.F., Koryakin, A.I. and Strel'nikov, A.V. (2010), «Vybor optimal'noi struktury ekskavatorno-avtomobil'nogo kompleksa», *Vestnik KuzGTU*, No. 1, pp. 59–61.
4. Bardas', O.V. (2009), «Vyznachennja vzajemozv'jazku mizh produktyvnistju ekskavatornyh kompleksiv ta avtosamoskydiv na rodovyshhah fosfortyv v Ukraini», *Ekonomichnyj visnyk NGU*, No. 1, pp. 62–67.
5. Khoreshok, A.A. and Stenin, D.V. (2007), «Opredelenie optimal'nogo sootnosheniya sopryazhennykh parametrov ekskavatorno-avtomobil'nykh kompleksov», *Vestnik KuzGTU*, No. 5, pp. 3–4.
6. Vesnin, A.V. (2014), «Puti povysheniya effektivnosti raboty ekskavatorno-avtomobil'nykh kompleksov v sformirovavshihhsya spetsificheskikh usloviyakh kar'erov krivorozhskogo regiona», *Visnyk NTU «KhPI»*, No. 9 (1052), pp. 113–119.
7. Zhuravlev, A.G. and Skorokhodov, A.V. (2015), «K voprosu obosnovaniya proizvoditel'nosti ekskavatorno-avtomobil'nykh kompleksov metodom komp'yuternogo modelirovaniya», *Problemy nedropol'zovaniya IGD Ural'skogo otdeleniya RAN*, No. 2, pp. 53–60.
8. Ercelebi, S.G. and Bascetin, A. (2009), «Optimization of shovel-truck system for surface mining», *The Journal of The Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, No. 109, pp. 433–439.
9. Kirmanli, C. and Ercelebi, S.G. (2009), «An expert system for hydraulic excavator and truck selection in surface mining», *The Journal of The Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, No. 109, pp. 727–738.
10. Nguyen, H., Doan, T.L., Le, T.H., Do, N.H. and Pham, V.V. (2014), «Determination of shovel-truck productivities in open-pit mines», *Trudy The 3rd International Conference on Advances in Mining and Tunneling*, Vung Tau, Vietnam, No. 3.
11. Frolov, O.O., Zhuravel', V.V. and Homenjuk A.V. (2017), «Vyznachennja racional'nogo spivvidnoshennja mizh jemnistju kuzova avtosamoskyda i jemnistju kovsha ekskavatora», *Materialy vseukrai'ns'koi' naukovy-praktychnoi' konferencii' studentiv, aspirantiv ta molodyh vchenyh, Perspektyvy rozvytku girnychoi' spravy ta racional'nogo vykorystannja pryrodnyh resursiv*, Zhytomyr, Ukraine, pp. 24–26.
12. Frolov, O.O., Sokolovs'ka, M.I. and Homenjuk, A.V. (2017), «Obg'runtuvannja tehnologichnoi' uzgodzhenosti parametrov ekskavatorno-avtomobil'nogo kompleksu», *Visnyk Kryvoriz'kogo nacional'nogo universytetu*, No. 44, pp. 3–7.
13. Kuleshov, A.A. (1980), *Moshchnye ekskavatorno-avtomobil'nye komplekxy kar'erov*, Nedra, Moscow, 317 p.
14. Frolov, O.O., Sokolovs'ka, M.I., Kramorenko, L.V. and Kononovych, V.A. (2017), «Optymizacija tehnologichnyh parametrov ekskavatorno-avtomobil'nyh kompleksiv», *Visnyk NTUU «KPI»*, Serija *Girnyctvo*, No. 34, pp. 28–33.
15. Homenjuk, A.V. (2017), *Optymizacija struktury kompleksnoi' mehanizacii' girnychyh robit na glybokyh kar'jerah*, abstract of dissertation, Kyi'v, 16 p.

Фролов Олександр Олександрович – доктор технічних наук, професор кафедри геоінженерії Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського».

Наукові інтереси:

- буропідривні роботи на кар'єрах;
- розробка родовищ корисних копалин.

<http://orcid.org/0000-0002-9833-6236>.

E-mail: frolov@geobud.kiev.ua.

Косенко Тетяна Володимирівна – старший викладач Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського».

Наукові інтереси:

- розробка родовищ корисних копалин.

<http://orcid.org/0000-0001-9635-1427>.

E-mail: tanitakos1@gmail.com.

Стаття надійшла до редакції 16.04.2020.