

**О.О. Фролов, д.т.н., проф.
І.Д. Литвинчук, аспірант
А.О. Остапчук, магістр**

*Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»*

Оптимізація роботи екскаваторно-автомобільного комплексу при відробці флювіогляціальних відкладів розкриву на кар'єрі Соснівського родовища гранітів

У статті наведено результати наукових досліджень щодо визначення оптимального співвідношення між місткістю кузова автосамоскида і місткістю ковша екскаватора при роботі екскаваторно-автомобільного комплексу в умовах розробки розкритого уступу кар'єру Соснівського родовища гранітів.

Згідно з проведеним аналізом наукових публікацій встановлено, що існують різні наукові підходи щодо забезпечення ефективної роботи екскаваторно-автомобільного комплексу на кар'єрах. Однак у більшості праць зазначено важливість дотримання оптимального співвідношення між місткостями кузова автосамоскида і ковша екскаватора для забезпечення високопродуктивної роботи комплексу обладнання.

У програмному комплексі AutoCAD Civil 3D виконано моделювання поверхні кар'єрного поля та встановлено параметри профілю трас при транспортуванні гірничої маси у відвал для двох запропонованих технологічних схем виймання флювіогляціальних відкладів на розкритому уступі. Використовуючи результати моделювання та встановивши особливості гірничо-геологічних і технологічних умов кар'єру Соснівського родовища гранітів, розраховано тривалості рейсів автосамоскидів за двома запропонованими технологічними схемами розробки флювіогляціальних відкладів. Визначено оптимальні співвідношення між місткістю кузова автосамоскида і ковша екскаватора. Для першої технологічної схеми відробки розкритого уступу тривалість рейсу автосамоскида становить 4,03 хв, а співвідношення місткостей кузова автосамоскида і ковша екскаватора – 5,64; для другої технологічної схеми відробки розкритого уступу відповідно ці значення складають 11,67 хв та 8,16.

При умові застосування на розкритому уступі кар'єру гідравлічного екскаватора зі зворотною лопатою Volvo EC460BLC (перша технологічна схема розробки) з ємністю ковша 2,1 м³ рекомендовано транспортувати гірничу масу на відвал автосамоскидом з місткістю кузова 11,84 м³. При використанні такого ж екскаватора, але з прямою лопатою (друга технологічна схема розробки) рекомендується застосовувати автосамоскид з місткістю кузова 17,44 м³.

Ключові слова: екскаваторно-автомобільний комплекс; місткість кузова автосамоскида; місткість ковша екскаватора; флювіогляціальні відклади; розкритий уступ; родовище; технологічна схема відробки; моделювання; профіль траси; ухил.

Постановка проблеми та її зв'язок з важливими практичними завданнями. В умовах будь-якого кар'єру основними технологічними процесами є виймання, навантаження та вивезення гірничої маси. Ці процеси виконують екскаваторно-автомобільні комплекси (ЕАК), що являють собою єдину технологічну систему у складі гірничо-видобувного підприємства. Ефективність роботи ЕАК насамперед визначається ефективністю взаємодії елементів цієї системи (а саме: кар'єрних екскаваторів і автосамоскидів), яка характеризується певними технологічними та конструктивними параметрами.

Одним із напрямів підвищення ефективності використання ЕАК є вдосконалення організації процесу навантаження гірничої маси та її перевезення [1]. При цьому багато науковців вважає, що продуктивність гірничого обладнання при вийманні і переміщенні гірничої маси є основним показником ефективності роботи ЕАК [2]. Тому основною умовою експлуатації екскаваторів і автосамоскидів з максимальною ефективністю є їх злагоджена робота.

Під час дослідження факторів, що впливають на ефективність роботи ЕАК, можуть застосовуватися теоретичний або експериментальний методи, а також метод моделювання. Застосування теоретичних залежностей дає зазвичай завищені результати, оскільки не враховується ймовірнісний характер процесів виймання, навантаження та переміщення гірничої маси. Використання експериментальних методів дослідження та отримання необхідних даних щодо ефективної експлуатації ЕАК характеризуються достатньою точністю результатів, але їх застосування може бути доцільне тільки в гірничо-технічних умовах певного кар'єру. При цьому слід зазначити, що проведення натурних експериментів вимагає значних матеріальних витрат та тривалості. Моделювання із застосуванням програмних комплексів дає змогу оцінювати вплив факторів на загальну продуктивність комплексу як в цілому, так і кожного з них

окремо. Однак при цьому робота ЕАК при моделюванні буде розглядатися в прогнозованих ідеальних умовах, а отже і оцінюватися буде як нереалістична. Тому найбільш доцільним буде комплексний підхід до дослідження ефективності роботи ЕАК з використанням елементів попередньо розглянутих методів.

Як вже зазначалося, при виборі оптимальних екскаваторно-автомобільних комплексів велику роль відіграють продуктивність автосамоскидів і екскаваторів. Водночас кар'єрний автомобільний транспорт та виймально-навантажувальне обладнання, які експлуатуються на гірничих підприємствах, мають різноманітні види, типи та технологічні параметри і переміщують гірничу масу з різними фізико-механічними властивостями на різні відстані. Також слід зважати на певні особливості виймання гірничої маси на конкретних родовищах. Так при розробці Соснівського родовища на кар'єрі мають місце ускладнення з приводу виймання флювіогляціальних відкладів, які розміщені на розкритому уступі. Зокрема, на окремих ділянках гравійно-піщана гірнична маса містить від 40 до 80 % гравію та валунів, що насамперед значно знижує продуктивність екскаватора і, відповідно, усього екскаваторно-автомобільного комплексу.

Тому оптимізацію конструктивних параметрів ЕАК при відпрацюванні гірських порід розкриття на Соснівському кар'єрі слід вважати актуальною науково-виробничою задачею, розв'язання якої дозволить в цілому підвищити техніко-економічні показники роботи підприємства.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблема підвищення ефективності роботи ЕАК присвячена значна кількість наукових статей і публікацій. Переважна більшість вчених, які займалися дослідженнями роботи ЕАК на кар'єрах, зазначають, що геометрична місткість кузова автосамоскида є одним із найважливіших конструктивних параметрів, який здійснює взаємозв'язок між місткістю ковша екскаватора, щільністю гірничої маси та відстанню її транспортування. Зокрема, автор в [3] пропонує формувати обладнання ЕАК таким чином, щоб число ковшів екскаватора забезпечувало максимальне значення коефіцієнта вантажопідйомності автосамоскида, при цьому час навантаження автотранспорту був мінімальним, а місткість його кузова дозволяла прийняти потрібний об'єм гірничої маси.

Науковці в [4] встановили, що ефективність роботи ЕАК залежить насамперед від узгодженості параметрів гірничого обладнання, тобто місткість кузова автосамоскида має залежати від місткості ковша екскаватора. А для підвищення продуктивності комплексу необхідно звести тривалість технологічних зупинок до мінімуму. Критерієм вибору обладнання є така умова – мінімальне співвідношення місткості кузова автосамоскида V_a до місткості ковша екскаватора E повинне бути $V_a / E = 4$, а максимальне – не має перевищувати 6–8.

У [5] вибір автосамоскида рекомендовано здійснювати, виходячи з умови дотримання певного співвідношення місткості кузова автосамоскида до місткості ковша екскаватора, а саме від 3 до 6. Для раціональної роботи екскаватора та автосамоскида запропоновано шість критеріїв вибору обладнання. Це зусилля черпання екскаватора, геологічні і геотехнічні умови розробки, параметри виймання гірничої маси, виробничі критерії на кар'єрі, робочі показники обладнання і собівартість продукції.

У науковому матеріалі [6] зазначено, що для правильного вибору ЕАК необхідно зважати на співвідношення місткостей кузова автотранспорту та ковша екскаватора. В результаті проведеного дослідження роботи виймально-навантажувального і транспортного обладнання з урахуванням тривалості екскаваційних і транспортних процесів, науковцями рекомендована аналітична залежність з визначення V_a / E . Етапи оптимізації роботи ЕАК також було розглянуто в [7]. Запропоновано на першому етапі встановити оптимальне число автосамоскидів, що працюють з окремим екскаватором, а на другому – розробити маршрут, за яким автосамоскиди мають рухатися від екскаватора до місця розвантаження та зворотньо. Це, на думку авторів, забезпечить максимальну продуктивність комплексу та призведе до зниження загальних витрат.

Також є певна кількість публікацій, які не вважають визначальним співвідношення місткості кузова автосамоскида до ковша екскаватора у забезпеченні ефективності роботи ЕАК. Зокрема, автор роботи [8] стверджує, що ефективність роботи ЕАК залежить тільки від співвідношення кількості автосамоскидів та екскаваторів, задіяних у кар'єрі. Зміна ж продуктивності комплексу залежить від простоїв екскаваторів і автосамоскидів. Параметри обладнання при цьому не враховуються.

Для оптимізації роботи ЕАК в [9] запропоновано основним критерієм вважати використання середньозваженого розміру шматка зруйнованої гірничої маси. Це дозволяє визначити оптимальні параметри кожного технологічного процесу, їх вартість і загальні техніко-економічні показники роботи ЕАК. Як вважають науковці, при цьому продуктивність автосамоскидів буде залежати від організації екскаваційних і навантажувальних робіт, але якість підірваної гірничої маси буде впливати на зміну часу завантаження автосамоскида. Розмір шматка гірничої маси також впливає на вибір ємності ковша, ступінь завантаженості автосамоскида і, як наслідок, визначає витрату палива.

Для визначення оптимальної кількості автосамоскидів на вугільному кар'єрі рекомендовано використовувати як основні параметри, співвідношення, які враховують період часу, що минув від відправлення автосамоскида після навантаження до відвалу (або до пункту прибуття) та у зворотньому напрямку, а також середній час його навантаження [10]. При цьому вказується, що середній час

навантаження автосамоскида залежить від коефіцієнта заповнення ковша та тривалості циклу екскавації. Коефіцієнт заповнення ковша у свою чергу залежить від характеристик гірничої маси, а тривалість циклу пов'язана з об'ємом ковша, міцністю та механічними характеристиками породи.

В [11] дослідники зазначають, що досконалість роботи ЕАК залежить від умов експлуатації обладнання, кількості рухомого складу, системи технічного обслуговування та ремонту, кваліфікації персоналу та виробничої бази видобутку сировини. Враховуючи ці показники, можна зменшити довжину перевезень, підвищити маневреність транспорту, скоротити час на перевезення, ліквідувати зупинки в роботі та, як наслідок, знизити матеріальні витрати на видобуток корисної копалини.

Автори статті [12] пропонують для підвищення роботи ЕАК застосувати метод оптимізації, який ґрунтується на впровадженні схем структурного резервування транспортних процесів з метою забезпечення безперебійності транспортування вантажів. Така схема роботи значно підвищує ймовірність виконання запланованого обсягу переміщення гірничої маси за рахунок перерозподілу автосамоскидів між кар'єрними та розкривними екскаваторами у випадку виходу з ладу однієї або декількох одиниць гірничо-транспортного обладнання. Невід'ємною складовою впровадження методу оптимізації є наявність на підприємстві геоінформаційних систем.

З метою оптимізації екскаваторно-транспортного перевезення пропонується також застосування на кар'єрах методу теорії масового обслуговування [13]. Використовуючи модель черг, показано взаємозв'язок між кількістю автосамоскидів автопарку та використанням екскаваторів, продуктивністю та довжиною черги при очікуванні завантаження. Цей метод дозволяє визначити оптимальну кількість автосамоскидів автопарку шляхом аналізу витрат, щоб знайти мінімальну вартість роботи ЕАК.

Встановлення економічно доцільного режиму роботи кар'єрного транспорту та мінімізація простоїв екскаваторів та самоскидів, задіяних у роботі ЕАК, може бути досягнуто, крім раціоналізації автопарків навантажувальної та транспортної техніки, створенням алгоритму оптимального розподілу кар'єрних автосамоскидів по пунктах навантаження [14]. За рахунок цього досягається підвищення експлуатаційної продуктивності ЕАК. В [15] зауважено, що однією з основних проблем, пов'язаних із роботою кар'єру, є ефективний розподіл вантажівок та екскаваторів по гірничих вибоях. Щоб мінімізувати експлуатаційні витрати на гірничо-транспортне обладнання з урахуванням їх обмежень за кількістю та якістю, представлена модель змішаного цілісного лінійного програмування для розподілу автосамоскидів та екскаваторів по вибоях кар'єру. Аналіз результатів дослідження показує, що за допомогою цієї моделі можна досягти значного зниження витрат на виймання гірничої маси.

Отже, аналіз вітчизняної та світової наукової літератури показує, що існують різні підходи до забезпечення ефективної роботи екскаваторно-автомобільних комплексів на відкритих гірничих роботах. Це свідчить про постійний розвиток наукової думки в цьому напрямі та удосконалення методів досліджень у зв'язку з появою сучасних пакетів прикладних програм з моделювання гірничих робіт і організації гірничого виробництва. Також варто зазначити, що, у зв'язку з особливостями гірничо-геологічних та гірничо-технологічних умов відробки, які присутні на кожному кар'єрі, проблему роботи ЕАК слід вирішувати в кожному випадку окремо.

Мета дослідження. На підставі аналізу останніх досліджень і публікацій з питань забезпечення ефективності роботи ЕАК на відкритих гірничих роботах сформульовано мету досліджень, яка полягає у встановленні оптимальних конструктивних параметрів обладнання для підвищення ефективності роботи екскаваторно-автомобільного комплексу на кар'єрі Соснівського родовища гранітів при вийманні флювіогляціальних відкладів розкриву.

Викладення основного матеріалу. У роботі [16] було зазначено, що при розробці Соснівського родовища гранітів виникли труднощі з відпрацюванням розкривного уступу. Це пов'язано з тим, що там, вже в процесі відробки, виявлені на окремих ділянках флювіогляціальні відклади. Розгляд та аналіз можливих технологічних схем відробки флювіогляціальних відкладів показав, що для зняття розкривного шару порід доцільним є використання бульдозерно-екскаваторно-автомобільного комплексу [16]. Для розпушення порід рекомендовано застосувати бульдозер-розпушувач.

Автори публікації [16] рекомендують дві можливі технологічні схеми відробки розкривного уступу з гравійно-піщаною масою. При першій схемі відробки гідравлічний екскаватор зі зворотною лопатою розташовується на покрівлі уступу, а бульдозер-розпушувач переміщує розпушені флювіогляціальні відклади до місця навантаження (рис. 1, а). Згідно з другою технологічною схемою екскаватор з прямою лопатою розміщується на нижче розташованому уступі корисної копалини, а бульдозер-розпушувач скидає йому зверху гравійно-піщану масу для завантаження у автосамоскид (рис. 1, б). В роботі також наведено чисельні значення продуктивності наявних на кар'єрі екскаваторів залежно від середнього розміру шматка флювіогляціальних відкладів та зазначено, що, зважаючи на складні умови залягання флювіогляціальних відкладів та невелику за розмірами робочу зону для виймально-навантажувального обладнання, доцільно визначити продуктивність усього екскаваторно-автомобільного комплексу, а не окремого обладнання. Тобто розрахункову продуктивність екскаватора треба узгоджувати з продуктивністю автосамоскидів та бульдозера-розпушувача, як це зазначено у [18].

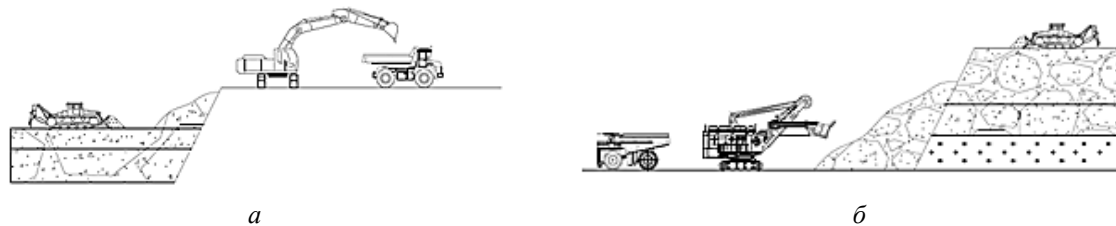


Рис. 1. Технологічні схеми відробки розкритого уступу флювіогляціальних відкладів: а – гідравлічним екскаватором зі зворотною лопатою; б – екскаватором з прямою лопатою [16]

Як було зазначено багатьма науковцями, однією з основних умов для забезпечення високопродуктивної експлуатації екскаваторів і автосамоскидів при мінімальній вартості робіт є оптимальне співвідношення між місткостями кузова автосамоскида і ковша екскаватора.

Найбільш обґрунтованим виглядає спосіб визначення співвідношенням V_a / E , в якому повна технологічна узгодженість у роботі ЕАК настане у випадку, коли відносні значення продуктивностей екскаватора і автосамоскида будуть рівні між собою [19]. За результатами цих досліджень отримана аналітична залежність зі встановлення співвідношення між місткістю кузова автосамоскида і ковша екскаватора за умови досягнення максимальної продуктивності ЕАК:

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

де V_a – місткість кузова автосамоскида, м³; E – місткість ковша екскаватора, м³; k_n – коефіцієнт наповнення ковша екскаватора; t_u – середня тривалість циклу навантаження породи, хв; t_o – тривалість обміну автосамоскидів при їхньому завантаженні, хв; t_p – середня тривалість рейсу автосамоскида (не враховуючи навантажувально-обмінні операції), хв.

На підставі формули (1) побудовано графічну залежність між співвідношенням V_a / E та тривалістю рейсу автосамоскида t_p для різних значень коефіцієнта наповнення ковша екскаватора, який характеризує певний тип гірської породи [1]. Середня тривалість циклу навантаження гірської породи прийнята в розрахунках $t_u = 0,5$ хв, а середня тривалість обмінних операцій автотранспорту під завантаження – $t_o = 1$ хв [19]. У таблиці 1 наведено значення коефіцієнта наповнення ковша екскаватора залежно від категорії порід за важкістю екскавації [20].

Таблиця 1

Значення коефіцієнтів розпушення породи k_p , наповнення k_n і використання ковша екскаватора k_e [20]

Категорія порід за важкістю екскавації	Породи	k_p	k_n	k_e
I	Пісок, супісок, легка глина	1,1–1,18	1–1,1	0,95
II	Буре і кам'яне вугілля, щільні глини, слабкі глинисті сланці, крейда, піщано-гравійна маса	1,15–1,25	0,95–1,1	0,8
III	Щільні глинисті сланці, мергель, слабкі піщаники	1,25–1,35	0,85–1	0,75
IV	Піщаники, слабкі вапняки	1,3–1,45	0,8–1	0,65
V	Міцні піщаники, щільні вапняки, доломіти, граніти, базальти, кварцити	1,45–1,5	0,75–0,9	0,55

Для встановлення тривалості рейсу автосамоскида авторами [1] запропонована така формула:

$$t_p = \frac{3600L \left(\frac{L_r}{v_{r,r}} + \frac{H}{v_{r,n} i_{сеп}} \right)}{\left(L_r + \frac{H}{i_{сеп}} \right) \beta}, \text{ с.} \quad (2)$$

де L – довжина транспортування, км; L_r – сумарна довжина горизонтальних ділянок траси, км; H – висота підйому гірничої маси, км; $i_{сеп}$ – середній ухил похилих ділянок траси; $v_{m,e}$, $v_{m,n}$ – технічні швидкості руху, відповідно на горизонтальних і похилих ділянках траси кар'єру, км/год; β – коефіцієнт використання пробігу, що характеризується відношенням вантажного пробігу до загального.

Як видно з формул (1–2), в них відсутня важлива складова роботи ЕАК, а саме тривалість розвантаження самоскидів $t_{розв}$. Тому для усунення цього недоліку запропоновано формулу (2) доповнити і представити у вигляді

$$t_p = \frac{3600L \left(\frac{L_r}{v_{т.г}} + \frac{H}{v_{т.п} i_{сеп}} \right)}{\left(L_r + \frac{H}{i_{сеп}} \right) \beta} + t_{розв}, \text{ с.} \quad (3)$$

Тривалість розвантаження автосамоскидів усіх марок, згідно з нормами технологічного проектування, приймається 1 хв.

Таким чином, знаючи місця розміщення екскаваторного вибою та розвантаження гірничої маси в конкретних умовах розробки родовища, можна визначити оптимальне співвідношення між місткістю кузова автосамоскида і ковша екскаватора для забезпечення ефективної роботи ЕАК.

З метою отримання оптимального співвідношення V_a / E для двох запропонованих технологічних схем відробки розкривного уступу флювіогляціальних відкладів в умовах кар'єру Соснівського родовища гранітів в програмному комплексі AutoCAD Civil 3D виконано моделювання поверхні кар'єрного поля та встановлено параметри профілю трас при транспортуванні породи у відвал. На рисунку 2 показано маршрут руху автосамоскидів від вибою гідралічного екскаватора Volvo EC460BLC зі зворотною лопатою, який розміщується на покрівлі розкривного уступу, до відвалу (перша технологічна схема).



Рис. 2. Маршрут транспортування розкриву на відвал за першою технологічною схемою

На рисунку 3 представлено профіль автомобільної траси від вибою екскаватора Volvo EC460BLC до відвалу за першою технологічною схемою, а в таблиці 2 наведено параметри цього профілю траси.

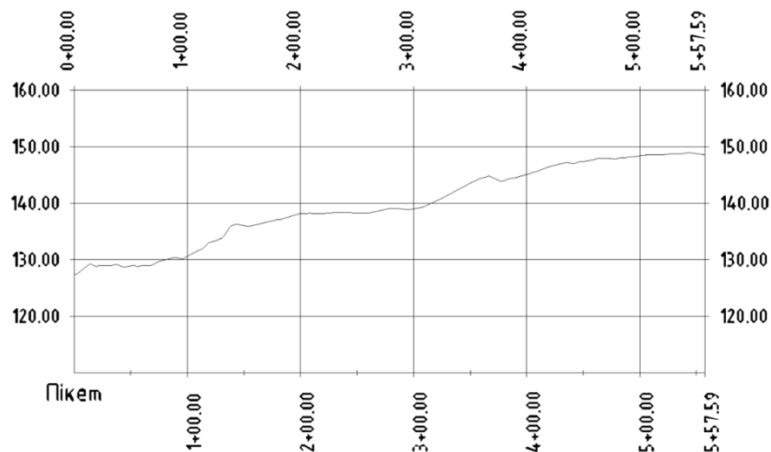


Рис. 3. Профіль траси до відвалу за першою технологічною схемою

Таблиця 2

Параметри профілю траси при транспортуванні розкриву на відвал за першою технологічною схемою

№ пікету	Пікет	Відмітка, м	Довжина пікету, м	Ухил до наступного пікету, ‰
1	0 + 00,00	127,3	21,0	75,5
2	0 + 21,00	128,9	23,0	-10,3
3	0 + 43,98	128,7	22,9	9,8
4	0 + 66,99	128,9	21,9	67,8
5	0 + 88,88	130,4	18,4	51,2
6	1 + 07,31	131,3	15,8	120,0
7	1 + 23,10	133,2	20,6	147,5
8	1 + 43,68	136,3	18,8	71,5
9	1 + 62,48	137,6	20,3	77,0
10	1 + 82,81	139,2	19,6	-39,3
11	2 + 07,99	138,2	42,3	2,4
12	2 + 50,33	138,3	51,9	15,4
13	3 + 02,26	139,1	48,5	92,7
14	3 + 50,79	143,6	39,3	22,9
15	3 + 90,09	144,5	40,9	61,1
16	4 + 31,04	147	41,7	21,6
17	4 + 72,76	147,9	37,6	18,6
18	5 + 10,36	148,6	47,2	0,0
19	5 + 57,59	148,6		
Min		127,3	15,8	0,0
Max		148,6	51,9	147,5
Середнє значення		137,8	31,0	50,3

Для другої технологічної схеми розробки розкривного уступу, за якої екскаватор типу з прямою лопатою розміщується на розташованому нижче уступі корисної копалини, на рисунку 4 представлено маршрут руху автосамоскида від вибою екскаватора до відвалу. На рисунку 5 наведено профіль траси від вибою екскаватора до відвалу, а в таблиці 3 – параметри профілю цієї траси.



Рис. 4. Маршрут транспортування розкриву на відвал за другою технологічною схемою

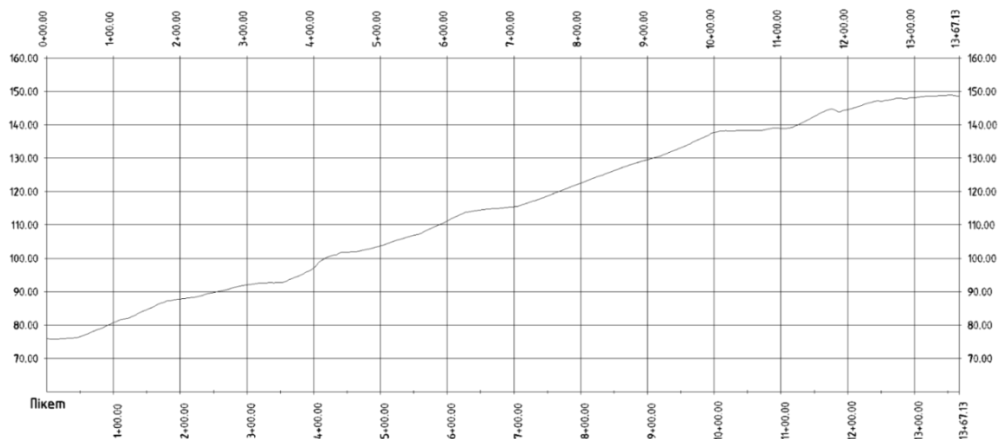


Рис. 5. Профіль траси до відвалу за другою технологічною схемою

Як видно з таблиць 2–3, загальна довжина транспортування гірничої маси становить: у першій технологічній схемі $L = 551,7$ м, в другій схемі – $L = 1367,5$ м. Сумарна довжина горизонтальних ділянок траси (згідно з класифікацією автошляхів сюди входять ділянки з ухилом до 10 %): по першому маршруту транспортування дорівнює $L_e = 112,4$ м; по другому – $L_e = 132,4$ м.

Таблиця 3

Параметри профілю траси при транспортуванні розкриву на відвал за другою технологічною схемою

№ пікету	Пікет	Відмітка, м	Довжина пікету, м	Ухил до наступного пікету, %
1	0 + 00,00	75,9	82,4	38,9
2	0 + 82,36	79,1	59,1	83,0
3	1 + 41,43	84,0	79,3	54,2
4	2 + 20,76	88,3	52,9	34,0
5	2 + 73,68	90,1	48,1	52,0
6	3 + 21,76	92,6	49,8	34,1
7	3 + 71,56	94,3	58,2	115,2
8	4 + 29,73	101,0	45,9	32,7
9	4 + 75,59	102,5	46,9	59,7
10	5 + 22,48	105,3	47,6	67,2
11	5 + 70,09	108,5	55,2	92,4
12	6 + 25,31	113,6	29,5	37,3
13	6 + 54,84	114,7	45,2	17,7
14	7 + 00,05	115,5	49,7	62,4
15	7 + 49,76	118,6	48,7	78,1
16	7 + 98,41	122,4	52,7	76,0
17	8 + 51,07	126,4	49,2	65,1
18	9 + 00,24	129,6	49,7	72,4
19	9 + 49,97	133,2	54,0	87,1
20	10 + 03,94	137,9	66,2	6,0
21	10 + 70,12	138,3	65,0	41,6
22	11 + 35,08	141,0	66,2	54,4
23	12 + 01,25	144,6	50,0	48,0
24	12 + 51,21	147,0	49,8	24,1
25	13 + 00,98	148,2	66,2	6,0
26	13 + 67,13	148,6		
Min		75,9	29,5	6,0
Max		148,6	82,4	115,2
Середнє		115,4	54,7	53,6

Висота підйому гірничої маси становить: для першої схеми $H = 21,3$ м; для другої – $H = 72,7$ м.

Для розрахунку тривалості рейсу необхідно знати середній ухил похилих ділянок траси (3). Їх чисельні значення отримані в програмному комплексі AutoCAD Civil 3D при прокладанні траси для руху автосамоскидів у відвал і наведені в таблицях 1–2. Для першої технологічної схеми розробки

флювіогляціальних відкладів на розкривному уступі кар'єру середній ухил траси становить $i_{\text{сеп}} = 50,3 \%$, для другої схеми – $i_{\text{сеп}} = 53,6 \%$. Швидкості руху завантажених автосамоскидів на кар'єрах, як зазначають дослідники, коливаються від 10 до 15–18 км/год, а порожніх – до 30–40 км/год. Враховуючи зазначене та зважаючи на існуючі нормативні вимоги, приймаємо орієнтовні технічні швидкості руху автосамоскидів: на горизонтальних ділянках автошляхів кар'єру – 30 км/год; на похилих – 15 км/год.

Коефіцієнт використання пробігу на кар'єрах зазвичай становить $\beta = 0,490 \dots 0,495$. Для розрахунку тривалості рейсу автосамоскида приймемо мінімальне значення коефіцієнта, тобто $\beta = 0,490$.

Коефіцієнт наповнення ковша екскаватора приймаємо згідно з даними таблиці 1 та рекомендаціями, наведеним у роботі [21], а саме – для зворотньої лопати $k_n = 1$ (перша технологічна схема розробки); для зворотньої лопати $k_n = 1,05$ (друга технологічна схема розробки).

Отже, зважаючи на отримані результати моделювання та умови роботи ЕАК на кар'єрі Соснівського родовища гранітів, відповідно до формули (3) розраховано тривалості рейсу автосамоскидів за двома технологічними схемами розробки флювіогляціальних відкладів на розкривному уступі, а потім за формулою (1) визначено співвідношення між місткістю кузова автосамоскида і ковша екскаватора для зазначених схем. Отримані результати розрахунків:

– для першої технологічної схеми тривалості рейсу автосамоскида становить $t_p = 302$ с, або 4,03 хв, а співвідношення V_a / E дорівнює 5,64;

– для другої технологічної схеми $t_p = 700$ с, або 11,67 хв, співвідношення місткостей кузова автосамоскида і ковша екскаватора $V_a / E = 8,16$.

Зважаючи на те, що на кар'єрі працює екскаватор Volvo EC460BLC з ємністю ковша $E = 2,1 \text{ м}^3$, то для досягнення максимальної продуктивності роботи ЕАК необхідно транспортувати гірничу масу автосамоскидом з місткістю кузова:

– для першої технологічної схеми розробки $V_a = 5,64E = 5,64 \cdot 2,1 = 11,84 \text{ м}^3$;

– для другої технологічної схеми розробки $V_a = 8,16E = 8,16 \cdot 2,1 = 17,44 \text{ м}^3$.

Такими марками автосамоскидів можуть бути: EUCLID-НІТАСНІ ЕН4000АСП – $V_a = 14,2 \text{ м}^3$; KOMATSU HM350-1 – $V_a = 14,6 \text{ м}^3$; БілАЗ 7540Д – $V_a = 15 \text{ м}^3$; CATERPILLAR 785С – $V_a = 17,2 \text{ м}^3$; KRESS 200с – $V_a = 18 \text{ м}^3$; БілАЗ 7547Д – $V_a = 19 \text{ м}^3$; Volvo FMX 6×6 – $V_a = 16 \text{ м}^3$ та інші з приблизною місткістю кузова. Як варіант, також можна планувати гірничі роботи на кар'єрах таким чином, щоб місця вибоїв та розвантаження гірничої маси були розміщені на відстанях, при яких би максимально ефективно використовувався екскаваторно-автомобільний комплекс.

Висновки та перспективи подальших досліджень. Аналіз робіт вітчизняних та закордонних науковців свідчить про те, що існують різні підходи щодо підвищення ефективної роботи ЕАК на відкритих гірничих роботах. Однак більшість з них зазначають, що для забезпечення високопродуктивної експлуатації екскаваторів і автосамоскидів при мінімальній вартості робіт необхідно встановити оптимальне співвідношення між місткостями кузова автосамоскида і ковша екскаватора.

Використовуючи дослідження минулих років, для умов кар'єру Соснівського родовища гранітів визначено співвідношення між місткістю кузова автосамоскида і ковша екскаватора, за умови досягнення максимальної продуктивності ЕАК, для двох запропонованих технологічних схем відробки розкривного уступу, на якому виявлено флювіогляціальні відклади. Для цього в програмному комплексі AutoCAD Civil 3D виконано моделювання поверхні кар'єрного поля та встановлено параметри профілю трас для перевезення гірничої маси у відвал.

На підставі результатів моделювання та гірничо-геологічних і технологічних умов роботи ЕАК на Соснівському кар'єрі розраховано тривалості рейсу автосамоскида за двома розглянутими технологічними схемами розробки флювіогляціальних відкладів та визначено оптимальні співвідношення між місткістю кузова автосамоскида і ковша екскаватора. Для першої технологічної схеми розробки тривалість рейсу автосамоскида становить $t_p = 4,03$ хв, а співвідношення місткостей кузова автосамоскида і ковша екскаватора $V_a / E = 5,64$; для другої технологічної схеми – $t_p = 11,67$ хв, $V_a / E = 8,16$. Враховуючи, що виймально-навантажувальні роботи на кар'єрі здійснює екскаватор Volvo EC460BLC з ємністю ковша $E = 2,1 \text{ м}^3$, то рекомендовано транспортувати гірничу масу на відвал автосамоскидом з місткістю кузова $V_a = 11,84 \text{ м}^3$ для першої технологічної схеми розробки і $V_a = 17,44 \text{ м}^3$ – для другої схеми.

Отримані результати дозволяють продовжити наукові дослідження в напрямі оптимізації роботи усього комплексу обладнання за пропонованими технологічними схемами відробки флювіогляціальних відкладів на розкривному уступі кар'єру Соснівського родовища гранітів.

Список використаної літератури:

1. Фролов О.О. Удосконалення методу визначення раціональних параметрів екскаваторно-автомобільних комплексів потужних кар'єрів / О.О. Фролов, Т.В.Косенко // Технічна інженерія. – 2020. – № 1 (85). – С. 242–248.
2. Хоменюк А.В. Оптимізація структури комплексної механізації гірничих робіт на глибоких кар'єрах : автореф. дис. ... : 8.05030101 / А.В. Хоменюк. – Київ, 2017. – 16 с.

3. Журавель В.В. 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 : матер. всеукр. наук.-практ. конф. студентів, аспірантів та молодих вчених, квітень. – Житомир : ЖДТУ, 2017. – С. 24–26.
4. Determination of shovel-truck productivities in open-pit mines / H.Nguyev, T.L. Doan, T.T.H. Le and other // The 3rd International Conference on Advances in Mining and Tunneling, At Vung Tau, Vietnam, 2014. – Vol. 3.
5. 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.
6. Оптимізація технологічних параметрів екскаваторно-автомобільних комплексів / О.О. Фролов, М.І. Соколовська, Л.В. Краморенко, В.А. Кононович // Вісник НТУУ «КПІ». Сер. : Гірництво. – 2017. – Вип. 34. – С. 28–33.
7. 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. – Vol. 109. – P. 433–439.
8. 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.
9. Optimization of the Excavator-and-Dump Truck Complex at Open Pit Mines – the Case Study / N.Demirel, A.Taghizadeh, S.Khoury, E.Tyuleneva // E3S Web of Conferences 41, 01006 (2018), IIIrd International Innovative Mining Symposium. – 2018. – P. 1–7.
10. Tosun A. Determination of Optimum Truck Number at Open Coal Quarry / A.Tosun // Archives of Mining Sciences. – 2021. – № 2 (66). – P. 213–225.
11. Omonov K. Organization of mining transport / K.Omonov // American Journal Of Applied Science And Technology. – 2022. – № 12:02. – P. 52–55.
12. Kurganov V.M. Assessment of operational reliability of quarry excavator-dump truck complexes / V.M. Kurganov, M.V. Gryaznov, S.V. Kolobanov // Journal of Mining Institute. – 2020. – Vol. 241. – P. 10–21.
13. Dan Vu Hai Optimization of Truck and Shovel for Haulage System in the Cao Son Mine, Viet Nam using Queuing Theory / Dan Vu Hai // Prince of Songkla University, 2016. – 85 p.
14. Mamadiyeva L.I. Characteristics of the kalmakir quarry excavator-automobile complex / L.I. Mamadiyeva, T.J. Annakulov // Science and innovation international scientific journal. – 2023. – № 4:2. – P. 181–186.
15. Shah K.S. Modeling and Optimization of Truck-Shovel Allocation to Mining Faces in Cement Quarry / K.S. Shah, S.U. Rehman // Journal of Mining and Environment. – 2020. – № 1:11. – P. 21–30.
16. Литвинчук І.Д. Обґрунтування бульдозерно-екскаваторно-автомобільного комплексу для зняття розкривного шару флювіогляціальних відкладів в умовах Соснівського родовища гранітів / І.Д. Литвинчук, О.О. Фролов // Геоінженерія : науково-технічний журнал. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – Вип. 7. – С. 83–93.
17. Литвинчук І.Д. Аналіз технологічних схем розробки флювіогляціальних відкладів / І.Д. Литвинчук, Ж.А. Гуцуляк, О.О. Фролов // Тези Всеукраїнської науково-практичної online-конференції здобувачів вищої освіти і молодих учених, присвяченої Дню науки 16–20, 26 травня. – Житомир : Державний університет «Житомирська політехніка». – 2022. – С. 154–155.
18. Литвинчук І.Д. Принципи формування технологічного комплексу обладнання на кар'єрах / І.Д. Литвинчук, О.О. Фролов // Перспективи розвитку гірничої справи та раціонального використання природних ресурсів : тези ІХ Всеукраїнської науково-практичної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених, 17 листопада. – Житомир : Житомирська політехніка. – 2022. – С. 52–54.
19. 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.
20. Косенко Т.В. Відкриті гірничі роботи: Ч. I. Процеси відкритих гірничих робіт : навч. посіб. для студ. спеціальності 184 «Гірництво» / Т.В. Косенко, О.О. Фролов. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. – 151 с.
21. Frolov O. Influence of the hydraulic excavator location with a backhoe in the face on the efficiency of rock mass excavation / O.Frolov, M.Beltek // Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського. – Кременчук : КрНУ. – 2021. – Вип. 3 (128). – С. 70–75.

References:

1. Frolov, O.O. and Kosenko, T.V. (2020), «Udoskonalennia metodu vyznachennia ratsionalnykh parametriv ekskavatorno-avtomobilnykh kompleksiv potuzhnykh karieriv», *Tekhnichna inzheneriia*, No. 1 (85), pp. 242–248.
2. Khomeniuk, A.V. (2017), *Optymizatsiia struktury kompleksnoi mekhanizatsii hirnychykh robiv na hlybokykh karierakh*, abstract thesis of dissertation, 8.05030101, Kyiv, 16 p.
3. Zhuravel, V.V., Khomeniuk, A.V. and Frolov, O.O. (2017), «Vyznachennia ratsionalnoho spivvidnoshennia mizh yemnistiu kuzova avtosamoskyda i yemnistiu kovsha ekskavatora», *Perspektyvy rozvytku hirnychoi spravy ta ratsionalnoho vykorystannia pryrodnykh resursiv*, mater. vseukr. nauk.-prak. konf. studentiv, aspirantiv ta molodykh vchenykh, kviten, ZhDTU, Zhytomyr, pp. 24–26.
4. Nguyev, H., Doan, T.L., Le, T.T.H. et al. (2014), «Determination of shovel-truck productivities in open-pit mines», *The 3rd International Conference on Advances in Mining and Tunneling*, At Vung Tau, Vietnam, Vol. 3.
5. 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*, Vol. 109, pp. 727–738.

6. Frolov, O.O., Sokolovska, M.I., Kramorenko, L.V. and Kononovych, V.A. (2017), «Optimizatsiia tekhnolohichnykh parametriv ekskavatorno-avtomobilnykh kompleksiv», *Visnyk NTUU «KPI». Ser. Hirnystvo*, Issue 34, pp. 28–33.
7. 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*, Vol. 109, pp. 433–439.
8. Bardas, O.V. (2009), «Vyznachennia vzaiemozviazku mizh produktyvnistiu ekskavatornykh kompleksiv ta avtosamoskydiv na rodovyschakh fosforytiv v Ukraini», *Ekonomichni visnyk NHU*, No. 1, pp. 62–67.
9. Demirel, N., Taghizadeh, A., Khouri, S. and Tyuleneva, E. (2018), «Optimization of the Excavator-and-Dump Truck Complex at Open Pit Mines – the Case Study», *E3S Web of Conferences 41, 01006 (2018), IIIrd International Innovative Mining Symposium*, pp. 1–7.
10. Tosun, A. (2021), «Determination of Optimum Truck Number at Open Coal Quarry», *Archives of Mining Sciences*, No. 2 (66), pp. 213–225.
11. Omonov, K. (2022), «Organization of mining transport», *American Journal Of Applied Science And Technology*, No. 12:02, pp. 52–55.
12. Kurganov, V.M., Gryaznov, M.V. and Kolobanov, S.V. (2020), «Assessment of operational reliability of quarry excavator-dump truck complexes», *Journal of Mining Institute*, Vol. 241, pp. 10–21.
13. Dan, Vu Hai (2016), «Optimization of Truck and Shovel for Haulage System in the Cao Son Mine, Viet Nam using Queuing Theory», *Prince of Songkla University*, 85 p.
14. Mamadiyeva, L.I. and Annakulov, T.J. (2023), «Characteristics of the kalmakir quarry excavator-automobile complex», *Science and innovation international scientific journal*, No. 4:2, pp. 181–186.
15. Shah, K.S. and Rehman, S.U. (2020), «Modeling and Optimization of Truck-Shovel Allocation to Mining Faces in Cement Quarry», *Journal of Mining and Environment*, No. 1:11, pp. 21–30.
16. Lytvynchuk, I.D. and Frolov, O.O. (2022), «Obhruntuvannia buldozerno-ekskavatorno-avtomobilnoho kompleksu dlia zniattia rozkryvnoho sharu fliuviolhiatsialnykh vidkladiv v umovakh Sosnivskoho rodovyscha hranitiv», *Heoizheneriia, naukovo-tekhnichnyi zhurnal, KPI im. Ihoria Sikorskoho*, Kyiv, Issue 7, pp. 83–93.
17. Lytvynchuk, I.D., Hutsuliak, Zh.A. and Frolov, O.O. (2022), «Analiz tekhnolohichnykh skhem rozrobky fliuviolhiatsialnykh vidkladiv», *Tezy Vseukrainskoi naukovo-praktychnoi online-konferentsii zdobuvachiv vyshchoi osvity i molodykh uchenykh, prysviachenoj Dniu nauky 16–20, 26 travnia*, Derzhavnyi universytet «Zhytomyrska politekhnika», Zhytomyr, pp. 154–155.
18. Lytvynchuk, I.D. and Frolov, O.O. (2022), «Pryntsyipy formuvannia tekhnolohichnoho kompleksu obladnannia na karierakh», *Perspektyvy rozvytku hirnychoi spravy ta ratsionalnoho vykorystannia pryrodnykh resursiv, tezy IX Vseukrainskoi naukovo-praktychnoi konferentsii studentiv, aspirantiv ta molodykh vchenykh, 17 lystopada*, Zhytomyrska politekhnika, Zhytomyr, pp. 52–54.
19. Frolov, O.O., Sokolovska, M.I. and Khomeniuk, A.V. (2017), «Obhruntuvannia tekhnolohichnoi uzgodzhenosti parametriv ekskavatorno-avtomobilnoho kompleksu», *Visnyk Kryvorizkoho natsionalnoho universytetu*, zb. nauk. prats., Issue 44, pp. 3–7.
20. Kosenko, T.V. and Frolov, O.O. (2020), *Vidkryti hirnychi roboty: Ch. I. Protsey vidkrytykh hirnychyykh robit, navch. posib. dlia stud. spetsialnosti 184 «Hirnystvo»*, KPI im. Ihoria Sikorskoho, Kyiv, 151 p.
21. Frolov, O. and Beltek, M. (2021), «Influence of the hydraulic excavator location with a backhoe in the face on the efficiency of rock mass excavation», *Visnyk KrNU imeni Mykhaila Ostrohradskoho*, KrNU, Kremenchuk, Issue 3 (128), pp. 70–75.

Фролов Александр Александрович – доктор технічних наук, професор кафедри геології Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського».

<https://orcid.org/0000-0001-8053-2653>.

Наукові інтереси:

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

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

Литвинчук Ілля Дмитрович – аспірант Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського».

<https://orcid.org/0000-0003-3702-173X>.

Наукові інтереси:

- розробка родовищ корисних копалин;
- маркшейдерська справа.

E-mail: Litvinchuk_ilya@icloud.com.

Остапчук Артем Александрович – магістр Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського».

<https://orcid.org/0009-0001-5766-3863>.

Наукові інтереси:

- розробка родовищ корисних копалин.

E-mail: aafrolov172@gmail.com.

Frolov O.O., Lytvynchuk I.D., Ostapchuk A.O.

Optimization of the excavator-automotive complex operation at excavation of fluvio-glacial deposits of overburden in the quarry of Sosnivske granite deposit

The article presents the results of scientific researches of determining the optimal ratio between the dump truck body capacity and excavator bucket capacity during the operation of excavator-auto-mobile complex under the conditions of developing overburden in the quarry of Sosnivske granite deposit.

According to the analysis of the scientific publications it has been established that there are different scientific approaches to providing effective work of the excavator-motor complex in the quarries. However, in the majority of works importance of observance of optimum correlation between the body of dump truck and bucket of excavator for maintenance of high-efficiency work of the complex of the equipment is specified.

In a program complex AutoCAD Civil 3D modelling of a surface of an open-cast mine field is executed and parameters of a profile of routes at transportation of rock mass in a dump for two offered technological schemes of extraction of fluvio-glacial adjournment on overburden bump are established. On the basis of results of modeling and taking into account the mining and geological features of the open pit, we calculated the duration of dump truck trips for the two proposed technological schemes of extraction of fluvio-glacial deposits and determined the optimal ratio between the capacity of the dump truck body and the excavator bucket capacity. For the first technological scheme of the overburden removing the duration of dump truck movement makes 4,03 min, and the ratio of dump truck body and excavator bucket capacity is 5,64; for the second technological scheme of overburden removing these values make 11,67 min and 8,16 respectively.

In the case of use of Volvo EC460BLC hydraulic excavator with a backhoe and bucket capacity of 2,1 m³ at the overburden step of the pit, it is recommended to transport the rock mass to the dump by dump truck with the approximate body capacity of 11,84 m. At use of the same excavator, but with a direct shovel, it is recommended to apply dump truck with capacity of a body of 17,44 m³.

Keywords: excavator-automotive complex; body capacity; dump truck; bucket capacity; excavator; fluvio-glacial deposits; opening; deposit; technological scheme of mining; modeling; route profile; slope.

Стаття надійшла до редакції 24.03.2023.