

В.О. Шлапак, к.т.н., доц.
А.О. Криворучко, к.т.н., доц.
М.С. Куницька, ст. викладач
С.М. Шишко, аспірант

Державний університет «Житомирська політехніка»

Сучасні підходи до оптимізації взаємодії екскаваторів і кар'єрних самоскидів на сучасних щебенових кар'єрах

У статті розглянуто проблематику підвищення ефективності роботи екскаваторно-автомобільних комплексів (ЕАК) на підприємствах відкритого видобутку корисних копалин, зокрема на щебенових кар'єрах. Проаналізовано сучасні підходи до формування парків екскаваторів і кар'єрних самоскидів, вплив дисбалансу транспортно-навантажувальних засобів на рівень їх використання та величину простоїв. Встановлено, що значна частка втрат робочого часу зумовлена недосконалістю організаційних рішень, застосуванням застарілих схем управління вантажопотоками та відсутністю оперативної диспетчеризації.

Обґрунтовано необхідність переходу до інтелектуальних систем управління транспортними процесами, які забезпечують раціональний розподіл кар'єрних самоскидів між пунктами навантаження і розвантаження, мінімізацію простоїв техніки та оптимізацію витрат на транспортування гірської маси. Запропоновано напрями підвищення продуктивності ЕАК, що враховують використання цифрових технологій моніторингу, алгоритмів оптимізації руху та моделювання виробничих ситуацій у режимі реального часу. Реалізація цих заходів сприятиме зниженню собівартості видобутку, підвищенню техніко-економічних показників підприємств та забезпечить їх конкурентоспроможність в умовах сучасних викликів.

Ключові слова: екскаваторно-автомобільний комплекс; відкриті гірничі роботи; кар'єрні самоскиди; екскаватори, продуктивність; простой техніки; оптимізація вантажопотоків; цифровізація кар'єрів.

Актуальність теми. Ефективна організація роботи екскаваторно-автомобільних комплексів (ЕАК) є одним із ключових чинників підвищення результативності відкритих гірничих робіт. В умовах зростання вартості пального, технічного обслуговування та експлуатації кар'єрної техніки, питання оптимізації транспортно-навантажувальних процесів набуває особливої важливості. На більшості кар'єрів витрати на автотранспорт становлять до 50 % собівартості видобутку, а тому удосконалення управління ЕАК безпосередньо впливає на економічну ефективність підприємства.

Сучасний стан організації роботи ЕАК характеризується низьким рівнем використання техніки, значними простоями екскаваторів і кар'єрних самоскидів, недосконалістю системи оперативного управління та відсутністю гнучких моделей розподілу транспортних засобів між пунктами навантаження. У більшості кар'єрів досі застосовуються традиційні підходи, сформовані десятиліття тому, що не відповідають сучасним умовам виробництва та рівню розвитку цифрових технологій.

Потреба у підвищенні продуктивності ЕАК, скороченні непродуктивних витрат часу та зниженні собівартості видобутку формує необхідність упровадження інтелектуальних систем диспетчеризації, цифрового моніторингу та оптимізаційних моделей прийняття рішень. Перехід до високотехнологічних підходів в управлінні автотранспортом є стратегічним напрямом розвитку гірничої промисловості, що забезпечує конкурентоспроможність підприємств, підвищує безпечність робіт та створює умови для модернізації виробничих процесів.

Таким чином, тема оптимізації роботи ЕАК та впровадження сучасних систем диспетчеризації є високоефективною, актуальною та своєчасною, оскільки відповідає потребам ринку, вимогам інноваційного розвитку галузі та сприяє зростанню економічної, технічної та організаційної ефективності відкритих гірничих робіт.

Аналіз останніх досліджень та публікацій, на які спираються автори. Проблема підвищення ефективності роботи екскаваторно-автомобільних комплексів традиційно посідає центральне місце в дослідженнях з планування відкритої розробки родовищ та кар'єрів. Базові теоретичні підходи до моделювання та оптимізації систем «ківш – автомобіль» були закладені ще у ХХ столітті і з того часу розвивалися у напрямку дискретно-подійного моделювання та теорії черг як ключових інструментів для визначення раціональної кількості автотранспорту й оцінки часу простоїв. Класичні оглядові роботи й моделі, що описують розподіл циклів ковша й автомобіля, залишаються базовими для сучасних досліджень [1–3].

Сучасні дослідження фокусуються на багатокритеріальній оптимізації, де одночасно мінімізують час очікування екскаватора, транспортні витрати і коливання добового плану відвантажень [4–8].

Одним із потужних трендів є впровадження систем реального часу для диспетчеризації (fleet management / truck dispatch systems). Практичні кейси (наприклад, впровадження DISPATCH від Komatsu) показують, що централізовані системи диспетчеризації дозволяють підвищити коефіцієнт завантаження екскаваторів та зменшити простой шляхом оптимальної підстановки автотранспорту й швидкої реакції на зміни статусу дробильного устаткування. Такий підхід також полегшує комунікацію між точками навантаження і розвантаження, що особливо важливо для інтенсивних щєбєневих кар'єрів [9].

За сучасних умов цифрової трансформації гірничого виробництва особливої значущості набуває наукове обґрунтування та розроблення нових підходів до оптимізації взаємодії навантажувально-транспортного обладнання, удосконалення системи диспетчеризації та впровадження цифрових інструментів управління вантажопотоками. Реалізація вказаних аспектів дозволить скоротити непродуктивні простой техніки, забезпечити більш збалансовану роботу елементів ЕАК, зменшити виробничі витрати та підвищити продуктивність відкритих гірничих робіт, що робить дослідження актуальним як у теоретичному, так і у прикладному аспектах для підприємств щєбєневої промисловості.

Мета статті полягає у науковому обґрунтуванні та розробленні підходів до підвищення ефективності функціонування екскаваторно-автомобільних комплексів на щєбєневих кар'єрах шляхом оптимізації взаємодії навантажувально-транспортного обладнання, скорочення простой техніки, удосконалення системи диспетчеризації та впровадження сучасних цифрових методів управління вантажопотоками з метою зниження собівартості видобутку та підвищення продуктивності відкритих гірничих робіт.

Викладення основного матеріалу. Відкритий спосіб розробки родовищ твердих корисних копалин є домінуючим як у світовій гірничодобувній практиці, так і в Україні. Його частка у загальному обсязі видобутку мінеральної сировини протягом останніх десятиліть стабільно залишається високою – у середньому приблизно 75 %, і, за прогнозами, у найближчій перспективі цей показник збережеться на подібному рівні.

Такий стан пояснюється значними техніко-економічними перевагами відкритого способу порівняно з підземним. Зокрема, продуктивність праці при відкритих гірничих роботах перевищує показники підземного видобутку у 3–4 рази для рудних і у 10–11 разів для вугільних родовищ. Крім того, собівартість видобутої продукції при відкритій розробці є у 3–4 рази нижчою, а терміни будівництва та введення в експлуатацію гірничих підприємств скорочуються у 2–3 рази [1–2].

Додатково варто зазначити, що відкритий спосіб забезпечує вищий рівень механізації та автоматизації виробничих процесів, що сприяє підвищенню безпеки праці, зниженню людського фактора та покращенню контролю за якістю видобутої сировини. Сучасні технологічні рішення – застосування високопродуктивних екскаваторно-транспортних комплексів, навантажувальної техніки нового покоління, GPS-моніторингу та геоінформаційних систем – дозволяють значно підвищити ефективність відкритих гірничих робіт.

Таким чином, відкритий спосіб розробки залишається основним і найбільш економічно доцільним методом видобутку твердих корисних копалин, особливо в умовах стабільного розвитку інфраструктури, високої доступності техніки та необхідності зниження витрат виробництва.

Розкривні та видобувні роботи на сучасних щєбєневих кар'єрах здійснюються переважно з використанням сучасних екскаваторно-автомобільних комплексів великої одиничної потужності, річна продуктивність яких становить від 500 до 1500 тис. м³ гірничої маси. Такий рівень продуктивності забезпечується завдяки застосуванню потужних екскаваторів циклічної дії в поєднанні з високо вантажопідйомними кар'єрними автосамоскидами.

Загальний аналіз технічного складу ЕАК свідчить, що вони характеризуються значною різноманітністю видів та типорозмірів екскаваторів (від 2 до 10 типорозмірів), при відносно малій кількості типорозмірів самоскидів (зазвичай від 1 до 3). Така структура зумовлена як різними умовами розробки уступів, так і особливостями розкривних та видобувних фронтів.

Відповідно до складу обладнання та рівня технічної різноманітності, екскаваторно-автомобільні комплекси щєбєневих кар'єрів умовно можна розділити на три групи:

- складні комплекси, що містять 10 та більше типорозмірів екскаваторів та 2–4 типорозміри самоскидів; застосовуються переважно на великих підприємствах з різноманітними гірничо-геологічними умовами;
- комплекси середньої складності, що містять приблизно 5 типорозмірів екскаваторів та 2–3 типорозміри самоскидів; характерні для більшості діючих щєбєневих кар'єрів України;
- прості комплекси, які складаються лише з 1–2 типорозмірів екскаваторів та одного типорозміру кар'єрних самоскидів; використовуються на кар'єрах із стабільними гірничими умовами та невеликими обсягами видобутку.

Загальна експлуатаційна продуктивність ЕАК визначається передусім тривалістю циклу навантаження автосамоскидів і параметрами їх транспортного руху. На ефективність комплексу істотно впливають

кількість і типорозміри екскаваторів та автосамоскидів, які є ключовими чинниками під час визначення раціональних параметрів відкритих гірничих робіт.

У випадку, коли кількість машин у складі ЕАК не збалансована, виникають простої та зниження продуктивності. Якщо кількість самоскидів перевищує потребу, вони простоюють біля екскаватора в очікуванні навантаження; якщо ж їх менше – екскаватори зупиняються в очікуванні транспорту. Таким чином, неузгодженість між ланками комплексу безпосередньо призводить до втрати робочого часу, зростання собівартості видобутку та неефективного використання техніки.

Навіть за умови правильно визначеного співвідношення кількості машин простої можуть виникати через нераціональний розподіл самоскидів між екскаваторами або при одночасній роботі транспортних засобів різних типорозмірів з одним екскаватором. Такі ситуації спричиняють зниження змінної продуктивності, нерівномірність навантаження транспортних засобів, підвищення експлуатаційних витрат і, як наслідок, зменшення загальної ефективності комплексу.

Підвищення продуктивності ЕАК навіть на декілька відсотків може дати суттєвий економічний ефект, адже дозволяє скоротити капітальні витрати на оновлення та обслуговування техніки. Тому раціональна організація взаємодії екскаваторів і автосамоскидів, оптимізація маршрутів їх руху, часів циклу та схем навантаження є одними з ключових напрямів удосконалення технології гірничих робіт у щобеневих кар'єрах.

Вибір ефективного екскаваторно-автомобільного комплексу безпосередньо пов'язаний із прогнозуванням техніко-експлуатаційних показників (ТЕП) у конкретних гірничо-геологічних і технологічних умовах. Висока точність визначення цих показників є необхідною умовою для забезпечення оптимальної організації виробничих процесів, оскільки навіть незначні похибки у плануванні можуть призвести до дисбалансу між розкривними та видобувними роботами, перевитрати палива, простоїв техніки та втрати продуктивності.

На сучасному етапі розвитку гірничодобувної промисловості транспортні витрати залишаються однією з найвагоміших статей собівартості видобутку, становлячи на більшості кар'єрів до 50 % від загальних експлуатаційних витрат. У зв'язку з цим значна увага приділяється заходам зі зниження транспортних витрат, серед яких:

- підвищення продуктивності, надійності та енергоефективності машин, що входять до складу ЕАК;
- забезпечення раціонального співвідношення між місткістю кузовів самоскидів і об'ємом ковшів екскаваторів;
- оптимізація маршрутів транспортування гірської маси з урахуванням ухилів, відстаней та особливостей рельєфу;
- впровадження внутрішньокар'єрних дробильно-конвеєрних комплексів у поєднанні з автомобільним транспортом, що дозволяє скоротити обсяг перевезень та підвищити екологічність виробництва.

Окремого значення набуває впровадження інтелектуальних транспортних систем та автоматизації управління ЕАК, що передбачає використання цифрових моделей кар'єру, GPS-навігації, систем диспетчеризації та віддаленого моніторингу техніки. Такі технології забезпечують оперативне коригування роботи машин, зменшують ризик простоїв і дозволяють досягти максимальної узгодженості дій між екскаваторами та транспортом.

Перспективним напрямом розвитку є застосування кар'єрних самоскидів без водіїв (autonomous haul trucks), що вже проходять випробування на великих міжнародних гірничих підприємствах. Їх широке впровадження в Україні в майбутньому дозволить не лише скоротити витрати на оплату праці та соціальне забезпечення персоналу, але й усунути людський фактор, що є однією з основних причин нераціонального використання техніки й аварійних ситуацій у транспортному циклі.

Отже, ефективність відкритих гірничих робіт значною мірою залежить від науково обґрунтованого вибору ЕАК, точності прогнозування ТЕП і гнучкої адаптації технічних рішень до змінних умов експлуатації. Саме комплексний підхід до формування складу екскаваторно-автомобільного комплексу забезпечує стійке функціонування кар'єру, зниження собівартості видобутку та підвищення загальної рентабельності підприємства.

Завдання зниження витрат за рахунок підвищення ефективності використання кар'єрних самоскидів та екскаваторів у складі екскаваторно-автомобільних комплексів є одним із пріоритетних напрямів управління кар'єрним автотранспортом. Для досягнення цієї мети важливо забезпечити раціональну організацію роботи машин, зменшити простої техніки та підвищити узгодженість між елементами транспортно-навантажувального циклу.

Диспетчеризація ЕАК є складним і динамічним процесом, що передбачає безперервний моніторинг технічного стану, маршрутів руху, типорозмірів, місця розташування та завантаженості як кар'єрних самоскидів, так і екскаваторів. Основна мета диспетчерського управління – забезпечення оптимального розподілу транспортних засобів між пунктами навантаження та розвантаження, що дозволяє скоротити простої, мінімізувати холості пробіги та підвищити загальну продуктивність комплексу.

У випадку простих ЕАК, що мають незначну різноманітність у типорозмірах техніки та відносно стабільні умови роботи, впровадження диспетчеризації не завжди є економічно доцільним, оскільки очікуваний ефект буде мінімальним. Для таких кар'єрів зазвичай достатньо застосування відомих методів оптимізації: раціонального визначення необхідної чисельності самоскидів, правильного добору їх вантажопідйомності, а також оптимізації режимів роботи екскаваторів.

Водночас складні ЕАК із великою кількістю типорозмірів техніки вимагають глибокого аналізу, значного обсягу оперативної інформації та складніших алгоритмів диспетчеризації. Тому доцільно починати дослідження з ЕАК середньої складності, які, по-перше, є найбільш поширеними серед кар'єрів, а по-друге, дозволяють отримати репрезентативні результати за менших трудових і часових витрат.

Аналіз виробничого досвіду, відображеного в сучасних наукових публікаціях, свідчить про відсутність істотного прогресу в організації навантажувально-транспортних робіт та скороченні простоїв техніки. Експерти зазначають, що на багатьох вітчизняних кар'єрах досі застосовуються традиційні схеми організації відкритих гірничих робіт, які практично не змінилися протягом останніх 40–50 років. Як наслідок, коефіцієнт використання екскаваторів, враховуючи сучасні високопродуктивні моделі, залишається на рівні лише 50–60 % календарного фонду часу. Це свідчить про істотне відставання практики управління від сучасних теоретичних вимог і підходів організації виробництва.

Крім того, широке застосування застарілого принципу організації транспортних перевезень за схемою «закритого циклу» часто призводить до значних простоїв кар'єрних самоскидів, оскільки вони прив'язані до конкретних екскаваторів. Така схема обмежує гнучкість транспортної системи й не дозволяє оперативно перерозподіляти транспорт між пунктами навантаження залежно від зміни умов роботи, що унеможливорює реалізацію потенційного ресурсу продуктивності ЕАК.

З урахуванням зазначеного, модернізація систем управління кар'єрним автотранспортом через впровадження інтелектуальних систем диспетчеризації, алгоритмів динамічного розподілу техніки та цифрових технологій моніторингу є об'єктивною необхідністю для підвищення ефективності роботи ЕАК і зниження виробничих витрат у галузі відкритої розробки родовищ.

Класифікацію простоїв технологічного автотранспорту, що враховуються під час аналізу виробничої діяльності щєбєневих кар'єрів, доцільно поділяти на дві основні групи.

Планові простой – це регламентовані перерви в роботі техніки, тривалість яких визначена чинними нормативно-технічними документами, інструкціями з експлуатації обладнання та правилами організації гірничих робіт. До таких простоїв належать технічне обслуговування і ремонти, регламентовані перерви на відпочинок персоналу, обідні перерви, підготовчо-заклучні операції тощо. Їх величина заздалегідь встановлюється для конкретних гірничо-технічних умов, а перегляд можливий лише у разі зміни технології, обладнання або параметрів гірничих робіт. Таким чином, планові простой є обов'язковою складовою виробничого процесу та підлягають нормуванню.

Непланові простой – це втрати робочого часу справних екскаваторів і самоскидів протягом зміни, які виникають з причин, що не залежать від водіїв або машиністів, але перешкоджають нормальному виконанню змінного завдання. До цієї категорії належать очікування навантаження, затримки через погодні умови, відсутність електропостачання, організаційні збої, дорожні чи вибухові роботи, нестача підготовленого фронту робіт, а також інші непередбачувані ситуації виробничого характеру. Саме непланові простой є ключовим резервом підвищення продуктивності ЕАК, оскільки їх скорочення безпосередньо впливає на обсяг добового видобутку та собівартість продукції.

Однією з актуальних проблем сучасних кар'єрних підприємств в Україні є зростання тривалості простоїв технологічного транспорту, спричинених аварійними та плановими відключеннями електроенергії. Ця проблема набула особливої гостроти після початку масованих ракетних та дронівих ударів по об'єктах енергетичної інфраструктури України, що призвело до суттєвої дестабілізації енергопостачання промислових підприємств, у тому числі й гірничодобувних.

Порушення стабільності електроживлення призводить до зупинки частини технологічного обладнання, пов'язаного з енергоспоживанням, а саме: дробильних фабрик, конвеєрних ліній, систем освітлення, паливозаправної інфраструктури, вентиляційних та насосних установок. Своєю чергою це спричиняє ланцюговий ефект простоїв у екскаваторно-автомобільному комплексі: екскаватори обмежують або повністю припиняють навантаження гірської маси через неможливість її оперативного вивезення чи переробки, а кар'єрні самоскиди змушені простоювати в очікуванні відновлення робіт.

Додаткові складнощі створює необхідність дотримання правил безпеки під час відключень – обмеження пересування техніки в темний час доби, відсутність роботи систем зв'язку та диспетчеризації, ускладнений контроль за технікою на маршрутах. У результаті частка простоїв, пов'язаних з енергетичною нестабільністю, на окремих кар'єрах в останні роки зросла у 3–5 разів, що призвело до помітного зниження змінної продуктивності ЕАК, збільшення собівартості видобутку та додаткових втрат робочого часу.

Таким чином, енергетичні ризики стали одним із найбільш критичних факторів невиконання простоїв, що вимагає впровадження заходів для мінімізації впливу енергетичних відключень на процес видобування – використання автономних джерел живлення, резервних систем освітлення, адаптивного

планування робочих змін, цифрових систем моніторингу та оптимізації навантажувально-транспортних операцій.

Узагальнену структуру простоїв технологічного автотранспорту для щебеневих кар'єрів наведено на рисунку 1, що дозволяє наочно оцінити їх частку та визначити пріоритетні напрями мінімізації втрат робочого часу.

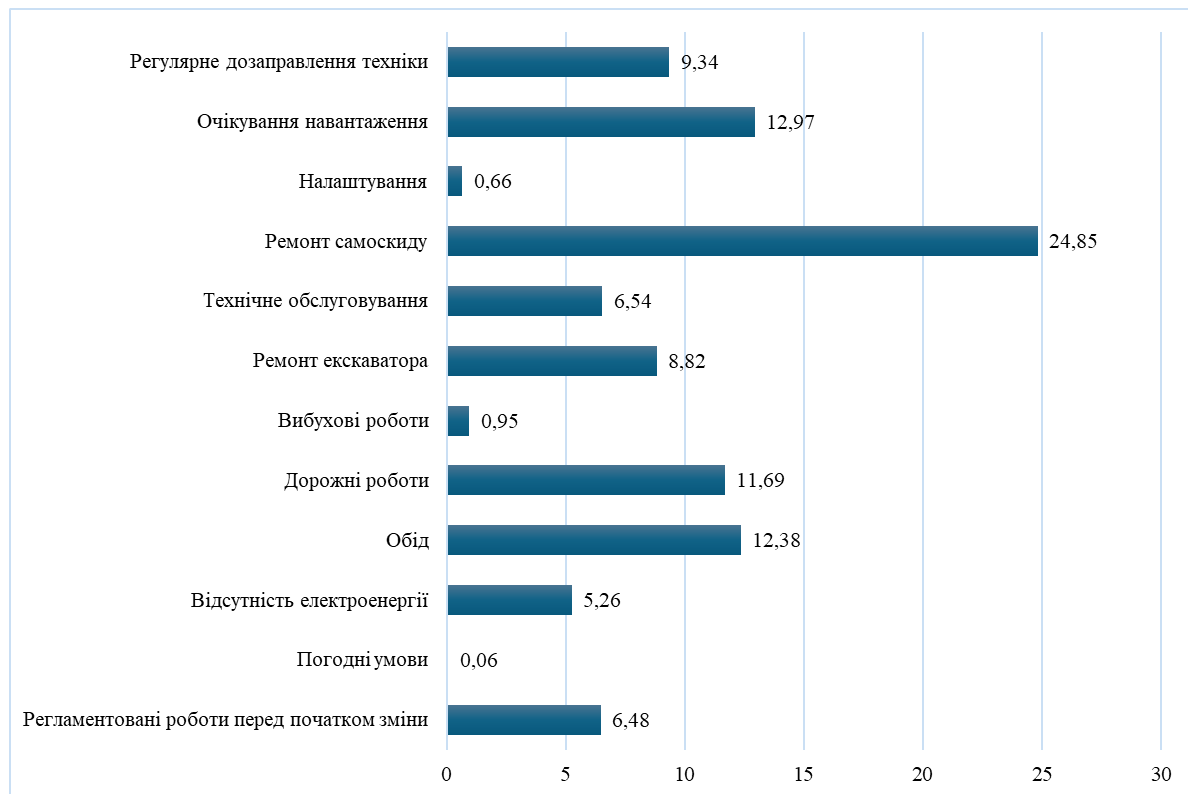


Рис. 1. Узагальнена структура простоїв технологічного автотранспорту в екскаваторно-автомобільному комплексі щебеневих кар'єрів

Представлений графік ілюструє структуру простоїв екскаваторно-автомобільного комплексу за різними видами непланових та регламентованих перерв у виробничому процесі. Дані свідчать, що найбільша частка втрат робочого часу припадає на ремонт автосамоскидів, який становить 24,85 % від загального обсягу простоїв. Це підтверджує високу залежність ефективності комплексу від технічного стану транспортної ланки та потребу в підсиленні превентивного обслуговування автомобілів.

Другим за значущістю фактором є очікування навантаження (12,97 %), що вказує на неузгодженість графіків роботи екскаватора й автотранспорту та недостатній рівень диспетчеризації подачі машин під навантаження. Порівнянний за впливом є простій, пов'язаний з перервою на обід (12,38 %) та виконанням дорожніх робіт (11,69 %), які також знижують загальну продуктивність комплексу, проте частково є плановими та технологічно обґрунтованими.

Суттєвими причинами втрат часу залишаються регулярне дозаправлення техніки (9,34 %) та ремонт екскаватора (8,82 %). Окремо слід виділити технічне обслуговування (6,54 %) та регламентовані роботи перед початком зміни (6,48 %), що хоч і мають плановий характер, але сумарно формують значний резерв оптимізації організації виробничих процесів.

До факторів меншого впливу належать відсутність електроенергії (5,26 %), вибухові роботи (0,95 %), налаштування обладнання (0,66 %) і погодні умови (0,06 %). Їхній сумарний внесок є незначним, однак для окремих кар'єрів може змінюватися залежно від виробничих та кліматичних особливостей.

Загалом структура простоїв демонструє, що більша половина втрат зумовлена організаційними та технічними причинами, що підтверджує необхідність впровадження моделі оптимізації роботи ЕАК, спрямованої на підвищення надійності техніки, синхронізацію роботи обладнання та удосконалення логістики транспортних потоків.

У межах проведеного дослідження було розроблено науково обґрунтовану модель мінімізації простоїв автосамоскидів у роботі екскаваторно-автомобільного комплексу щебеневих кар'єрів. Модель базується на балансуванні тривалості робочих циклів екскаватора та автотранспорту, враховує технічні характеристики машин, транспортно-логістичні параметри та пропускну здатність елементів виробничого процесу.

В основу моделі покладено оптимізацію кількості автосамоскидів, що одночасно обслуговують один екскаватор, шляхом мінімізації сумарного часу їх очікування під навантаженням і під час транспортування гірської маси. Запропонована модель дозволяє формалізувати процес узгодження параметрів ЕАК, визначити раціональні співвідношення місткостей ковша екскаватора та кузова автосамоскида, встановити оптимальні інтервали подачі транспорту, а також оцінити вплив зміни транспортних плечей та умов руху на величину простоїв. Її використання забезпечує підвищення коефіцієнта використання устаткування, скорочення витрат на транспортування щебеневої сировини та оптимізацію виробничої логістики в кар'єрі.

Математична модель мінімізації простоїв (адаптована для щебеневого кар'єру)

Позначення основних параметрів

n_a – кількість автосамоскидів, що обслуговують один екскаватор;

E – місткість ковша екскаватора (м^3);

V_a – місткість кузова автосамоскида (м^3);

t_{load} – тривалість циклу екскаватора (с);

k – кількість черпань (ковшів) для повного завантаження кузова: $k = \frac{V_a}{E}$ (може бути дробовим, фактична кількість – ціле число з округленням);

T_e – повний цикл екскаватора на одне авто: $T_e = k \cdot t_{load} + t_{prep}$, де t_{prep} – час допоміжних операцій (підгін, вирівнювання, безпека);

t_{haul} – час прямого руху «екскаватор → пункт розвантаження»;

t_{dump} – час розвантаження;

t_{return} – час повернення до екскаватора;

T_a – повний цикл автомобіля: $T_a = t_{haul} + t_{dump} + t_{return} + t_{queue}$, де t_{queue} – середній час очікування в дорозі або на місці розвантаження;

U – коефіцієнт корисного часу екскаватора (частка часу без простоїв).

Цільова функція

Мінімізувати сумарний час простоїв автосамоскидів або еквівалентно максимізувати коефіцієнт використання автопарку:

$$\min F = \sum_{i=1}^{n_a} (t_{queue,i} + t_{idle,i}), \quad (1)$$

або в нормалізованому вигляді мінімізувати відношення простоїв до робочого часу:

$$\min F' = \frac{\sum_{i=1}^{n_a} (t_{queue,i} + t_{idle,i})}{\sum_{i=1}^{n_a} T_a}. \quad (2)$$

Обмеження

1. Баланс циклів (щоб уникнути накопичення / дефіциту подачі):

$$n_a \cdot T_a \geq T_e. \quad (3)$$

Оптимально – прагнути до $n_a \cdot T_a \approx T_e$, з урахуванням коефіцієнта безпеки s (наприклад, $1.05 \div 1.15$) для покриття випадкових затримок:

$$n_a \cdot T_a = s \cdot T_e, s > 1. \quad (4)$$

2. Технічні обмеження місткостей:

$$\frac{V_a}{E} \in [3; 6]. \quad (5)$$

3. Пропускна здатність маршруту та розвантажувальної ділянки:

$$\lambda_{route} \geq \frac{1}{T_a}, \quad (6)$$

де λ_{route} – максимально допустима інтенсивність пропуску на маршруті / ділянки розвантаження.

4. Обмеження на ресурс (кількість доступної техніки):

$$n_a \leq N_{\max}. \quad (7)$$

Порядок здійснення оптимізації

1. Оцінка вхідних параметрів: $E, V_a, t_{load}, t_{haul}, t_{dump}, t_{return}$.

2. Визначення $k = V_a/E$ і T_e, T_a .

3. Визначення початкової кількості автосамоскидів:

$$n_a^0 = \lceil \frac{s \cdot T_e}{T_a} \rceil. \quad (8)$$

4. Запуск імітаційної моделі (дискретно-подійне моделювання) або модель черг (M/G/n) для перевірки значень t_{queue} і U за різних сценаріїв.

5. Коригування n_a , маршрутів і параметри подачі до отримання прийнятного рівня простоїв ($t_{queue} < 5\%$ від T_a).

Практичні рекомендації для щебених кар'єрів

1. Для коротких плеч (≤ 3 км) розглянути використання фронтального навантажувача у поєднанні з автосамоскидами – підвищує мобільність і скорочує час навантаження.

2. Для середніх і довгих плеч (>5 км) потрібно масштабувати автопарк; пріоритет – скорочення t_{haul} через раціональні маршрути та підвищення середньої швидкості (покращення дорожнього полотна).

3. Інвестувати у систему диспетчеризації з GPS та мобільною комунікацією для реального часу регулювання подачі.

4. Передбачити буферні лінії та майданчики для уникнення блокування фронту робіт.

5. Організувати систему попереднього дроблення й сортування біля зон навантаження, щоб зменшити періоди очікування через наявність негабаритів або неоднорідність вантажу.

6. Впроваджувати КРІ для диспетчерів та водіїв (час очікування, коефіцієнт використання автопарку, середній час циклу) і відслідковувати їх автоматично.

Нижче наведено графік залежності ефективності роботи екскаваторно-автомобільного комплексу від зниження простоїв до 15 % (рис. 2).

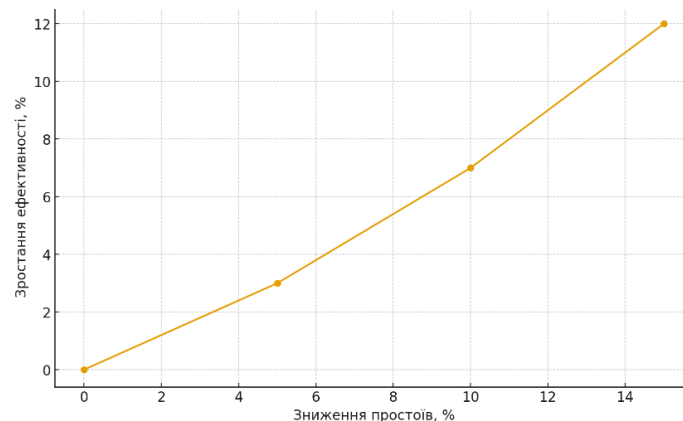


Рис. 2. Графік залежності ефективності роботи екскаваторно-автомобільного комплексу від зниження простоїв

Зниження простоїв хоча б на 5–7 % вже забезпечує відчутний приріст продуктивності кар'єру без суттєвих капіталовкладень. При скороченні простоїв на 15 % ефективність зростає нелінійно (в 4 рази швидше, ніж на початковому етапі). Це пояснюється тим, що синхронізація роботи екскаватора й автотранспорту зменшує взаємні затримки – найкритичніший фактор втрат часу.

Найбільший економічний ефект виникає при усуненні системних простоїв: ремонт техніки, очікування навантаження, неузгодженість транспорту.

Висновки та перспективи подальших досліджень. Мінімізація простоїв автосамоскидів у щебеневих кар'єрах – це комплексне завдання, що вимагає одночасного застосування інженерних (узгодження обладнання, поліпшення доріг), організаційних (диспетчеризація, маршрутизація) та технологічних (попереднє дроблення, сортування) заходів. Математична модель, базована на балансі циклів і обмеженнях пропускної здатності, є практичним інструментом для обґрунтування рішення щодо масштабу автопарку, оптимізації подачі та технічної політики. Перспективи подальших досліджень у сфері підвищення ефективності функціонування екскаваторно-автомобільного комплексу пов'язані з удосконаленням методів оптимізації виробничо-транспортних процесів, впровадженням цифрових технологій та підвищенням надійності гірничотранспортного обладнання. Подальший розвиток наукових досліджень доцільно спрямувати на:

1. Розроблення цифрових систем диспетчеризації та синхронізації роботи ЕАК на основі алгоритмів штучного інтелекту, машинного навчання та предиктивної аналітики для прогнозування потреб у техніці, часу прибуття автосамоскидів та попередження простоїв;

2. Поглиблене дослідження впливу технічного стану обладнання на продуктивність комплексу, зокрема розроблення систем діагностики та прогнозування відмов екскаваторів і автосамоскидів на основі датчиків, телеметрії та системи технічного моніторингу (Condition Monitoring);

3. Комплексну оптимізацію дорожньо-транспортної інфраструктури кар'єру, зокрема моделювання раціональних трас руху, розташування пунктів навантаження та розвантаження, під'їзних шляхів і зон очікування, що дозволить мінімізувати холості пробіги та затори на внутрішньокар'єрних дорогах;

4. Адаптацію моделей оптимізації ЕАК до умов щебеневих кар'єрів різної потужності та структури розкривних робіт, з урахуванням обмеженості робочих площадок, змінного фронту робіт, а також специфіки порід, що видобуваються.

Реалізація окреслених напрямів сприятиме формуванню інноваційних підходів до управління ЕАК, забезпеченню стійкого зростання продуктивності, зменшенню питомих витрат на видобуток та транспортування мінеральної сировини, а також підвищенню рівня безпеки та екологічної збалансованості гірничого виробництва.

Список використаної літератури:

1. Виймально-навантажувальні роботи на кар'єрах : навчальний посібник / В.В. Коробійчук, В.Г. Кравець, С.С. Іськов та ін. – Житомир : ЖДТУ, 2017. – 440 с.
2. 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 [Electronic resource]. – Access mode : <https://www.scielo.org.za/pdf/jsaimm/v109n7/06.pdf>.
3. Czaplicki J. Shovel-Truck Systems: Modelling, Analysis and Calculations / J.Czaplicki. – The Netherlands : CRC Press, 2008. – 170 p.
4. Слободянюк Р.В. Методика оптимізації екскаваторно-автомобільного комплексу при використанні тимчасових відвалів / Р.В. Слободянюк, М.М. Пижик // Геотехнічна механіка : міжвід. зб. наук. праць. – Дніпропетровськ : ІГТМ НАНУ, 2016. – Вип. 130. – С. 159–167.
5. 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.
6. Хоменюк А.В. Оптимізація структури комплексної механізації гірничих робіт на глибоких кар'єрах : автореф. дис. : 8.05030101 / А.В. Хоменюк. – Київ, 2017. – 16 с.
7. 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 IX Всеукраїнської науково-практичної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених, 17 листопада. – Житомир : Житомирська політехніка, 2022. – С. 52–54.
8. Фролов О.О. Оптимізація роботи екскаваторно-автомобільного комплексу при відробітці флювіогляціальних відкладів розкриття на кар'єрі Соснівського родовища гранітів / О.О. Фролов, І.Д. Литвинчук, А.О. Остапчук // Технічна інженерія. – 2023. – № 1 (91). – С. 366–376. DOI: 10.26642/ten-2023-1(91)-366-376.
9. DISPATCH Fleet Management system (FMS) helps mine optimize its haulage cycle and dramatically reduce truck idle times / Komatsu [Electronic resource]. – Access mode : https://www.komatsu.com/en-us/case-studies/dispatch-fleet-management-system-helps-mine-optimize-its-haulage?utm_source=chatgpt.com.

References:

1. Korobiichuk, V.V., Kravets, V.H., Iskov, S.S. et al. (2017), *Vyimalno-navantazhuvalni roboty na karierakh, navchalnyi posibnyk*, ZhDTU, Zhytomyr, 440 p.
2. 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, [Online], available at: <https://www.scielo.org.za/pdf/jsaimm/v109n7/06.pdf>
3. Czaplicki, J. (2008), «Shovel–Truck Systems: Modelling, Analysis and Calculations», *The Netherlands: CRC Press*, 170 p.
4. Slobodianiuk, R.V. and Pyzhyk, M.M. (2016), «Metodyka optymizatsii ekskavatorno-avtomobilnoho kompleksu pry vykorystanni tymchasovykh vidvaliv», *Heotekhnichna mekhanika*, mizhvid. zb. nauk. prats, IHTM NANU, Dnipropetrovsk, Issue 130, pp. 159–167.
5. 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.
6. Khomeniuk, A.V. (2017), «Optymizatsiia struktury kompleksnoi mekhanizatsii hirnychkykh robıt na hlybokykh karierakh», Abstract of D.Sc. dissertation, 8.05030101, Kyiv, 16 p.
7. Lytvynchuk, I.D. and Frolov, O.O. (2022), «Pryntsypy formuvannia tekhnolohichnoho kompleksu obladnannia na karierakh», *Perspektyvy rozvytku hirnychoi spravy ta ratsionalnoho vykorystannia pryrodnykh resursiv*, tezy IX Vseukrainskoi naukovy-praktychnoi konferentsii studentiv, aspirantiv ta molodykh vchenykh, 17 lystopada, Zhytomyrska politekhnika, Zhytomyr, pp. 52–54.
8. Frolov, O.O., Lytvynchuk, I.D. and Ostapchuk, A.O. (2023), «Optymizatsiia roboty ekskavatorno-avtomobilnoho kompleksu pry vidrobtsi fluviohliatsialnykh vidkladiv rozkryvu na karieri Sosnivskoho rodovyshcha hranitiv», *Tekhnichna inzheneriia*, No. 1 (91), pp. 366–376, doi: 10.26642/ten-2023-1(91)-366-376.
9. «DISPATCH Fleet Management system (FMS) helps mine optimize its haulage cycle and dramatically reduce truck idle times», *Komatsu*, [Online], available at: https://www.komatsu.com/en-us/case-studies/dispatch-fleet-management-system-helps-mine-optimize-its-haulage?utm_source=chatgpt.com

Шлапак Володимир Олександрович – кандидат технічних наук, доцент кафедри маркшейдерії Державного університету «Житомирська політехніка».

<https://orcid.org/0000-0002-4183-1922>.

Наукові інтереси:

- відкриті гірничі роботи;
- гірничий транспорт;
- переробка та збагачення корисних копалин.

E-mail: v.shlapak@ztu.edu.ua.

Криворучко Андрій Олексійович – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри маркшейдерії Державного університету «Житомирська політехніка».

<https://orcid.org/0000-0003-3332-2631>.

Наукові інтереси:

- геометрія надр;
- видобування блочного каменю;
- геолого-економічна оцінка рудних та нерудних родовищ корисних копалин.

E-mail: km_kao@ztu.edu.ua.

Куницька Марина Сергіївна – старший викладач кафедри маркшейдерії Державного університету «Житомирська політехніка».

<https://orcid.org/0000-0002-2649-0939>.

Наукові інтереси:

- геодезія;
- маркшейдерська справа;
- фотограмметрія.

E-mail: km_kms@ztu.edu.ua.

Шишко Сергій Михайлович – аспірант кафедри маркшейдерії Державного університету «Житомирська політехніка».

Наукові інтереси:

- геометрія надр;
- видобування природного декоративного каменю.

E-mail: phd184233_shsm@student.ztu.edu.ua.

Shlapak V.O., Kryvoruchko A.O., Kunitska M.S., Shyshko S.M.

**Modern approaches to optimizing the interaction between excavators and dump trucks
in modern gravel quarries**

The article discusses the issues of improving the efficiency of excavator-truck complexes (ETC) at open-pit mining enterprises, in particular at gravel pits. It analyzes modern approaches to the formation of fleets of excavators and quarry dump trucks, the impact of the imbalance of transport and loading equipment on the level of their use and the amount of downtime. It has been established that a significant part of working time losses is caused by imperfect organizational decisions, the use of outdated cargo flow management schemes, and the lack of operational dispatching.

The necessity of transitioning to intelligent transport process management systems that ensure the rational distribution of dump trucks between loading and unloading points, minimize equipment downtime, and optimize the cost of transporting rock mass is substantiated. We suggest ways to improve the productivity of the EAK, including the use of digital monitoring technologies, traffic optimization algorithms, and real-time modeling of production situations. Implementing these measures will help reduce the cost of extraction, improve the technical and economic performance of enterprises, and ensure their competitiveness in the face of modern challenges.

Keywords: excavator-truck complex; open-pit mining; quarry dump trucks; excavators, productivity; equipment downtime; cargo flow optimization; quarry digitalization.

Стаття надійшла до редакції 30.09.2025.