

В.О. Шлапак, к.т.н., доц.
А.О. Криворучко, к.т.н., доц.
В.Г. Левицький, к.т.н., доц.
С.С. Іськов, к.т.н., доц.
С.М. Шишко, аспірант

Державний університет «Житомирська політехніка»

Технологічна оптимізація навантажувального обладнання та транспортних систем як фактор підвищення продуктивності й раціоналізації проєктних рішень при видобуванні блочного каменю

У статті розглянуто актуальну проблему підвищення ефективності технологічних процесів та оптимізації проєктних рішень при розробці родовищ блочного каменю. Одним із ключових напрямів підвищення продуктивності та зниження витрат у кар'єрному виробництві визначено удосконалення навантажувально-транспортних схем за рахунок впровадження сучасних фронтальних навантажувачів. Проведено порівняльний аналіз традиційної системи «екскаватор – автосамоскид», комбінованої схеми «навантажувач – автосамоскид» та автономної схеми «навантажувач» під час виконання розкривних робіт. Встановлено, що використання навантажувачів як універсальної техніки для одночасного виїмання, навантажування та транспортування порід дозволяє скоротити кількість операцій, зменшити витрати пального, підвищити маневреність та гнучкість технологічних процесів.

Особливу увагу приділено застосуванню навантажувачів на ділянках видобування та переміщення блоків природного каменю, де вони забезпечують високу точність позиціонування, збереження геометрії блоків і зменшення втрат товарного матеріалу. Підкреслено, що інтеграція таких машин у технологічні схеми видобування сприяє не лише підвищенню продуктивності праці, але й покращенню умов безпеки та екологічної стабільності виробництва.

Отримані результати можуть бути використані на етапах проєктування та техніко-економічного обґрунтування блочних кар'єрів для вибору оптимальних схем розробки, раціонального підбору обладнання та забезпечення балансу між технічною ефективністю, економічною доцільністю і природоохоронними вимогами. Впровадження сучасних фронтальних навантажувачів провідних світових виробників (Caterpillar, Volvo, Komatsu, Liebherr тощо) створює передумови для технологічної модернізації гірничодобувних підприємств, підвищення їх конкурентоспроможності та переходу до більш енергоефективних і екологічно орієнтованих систем виробництва.

Ключові слова: блочні кар'єри; технологічна оптимізація; навантажувальне обладнання; транспортні схеми; продуктивність; проєктні рішення.

Актуальність теми. На сучасному етапі розвитку гірничодобувної промисловості спостерігається стійка тенденція до впровадження універсальних машин і комплексів, здатних поєднувати функції кількох видів технологічного обладнання. Це зумовлено прагненням підприємств до підвищення ефективності виробничих процесів, скорочення експлуатаційних витрат, зниження енергоємності операцій та мінімізації впливу на довкілля.

У провідних країнах світу дедалі частіше замість традиційної технологічної схеми розробки та транспортування гірської маси за допомогою екскаватора й автомобільного транспорту застосовуються потужні фронтальні навантажувачі. Такі машини здатні ефективно виконувати широкий спектр робіт – від розробки уступів і навантаження блочного каменю до його транспортування на короткі відстані та складування. Це значно спрощує організацію робіт у кар'єрі, підвищує маневреність техніки та скорочує кількість задіяних машин.

Навантажувачі провідних світових виробників – Caterpillar, Volvo, Komatsu, Liebherr, Hitachi та інших – вирізняються високою вантажопідйомністю, потужними гідравлічними системами, покращеною ергономікою кабіни оператора, а також сучасними системами керування та моніторингу. Використання інтелектуальних систем стабілізації, автоматичного балансування й контролю навантаження дає змогу забезпечити високу точність позиціонування блоків, що є надзвичайно важливим для збереження їх геометрії, поверхневої цілісності та товарного вигляду.

Застосування навантажувачів сприяє також зменшенню кількості транспортних операцій, скороченню часу технологічного циклу, зниженню рівня шуму та викидів шкідливих речовин. Це не лише підвищує екологічну безпеку виробництва, але й позитивно впливає на умови праці персоналу. Крім того, зменшення

інтенсивності руху техніки на робочих майданчиках знижує ризик аварійних ситуацій і підвищує загальний рівень промислової безпеки.

Таким чином, впровадження фронтальних навантажувачів у технологічні схеми на розкривних та видобувних роботах під час видобування блочного каменю повністю відповідає сучасним вимогам до енергоефективності, надійності, екологічності та технологічної гнучкості гірничих підприємств. Цей напрям є одним із пріоритетних у процесі модернізації технічного парку кар'єрів і розвитку нових проєктних рішень, спрямованих на підвищення продуктивності та конкурентоспроможності видобувної галузі.

Аналіз останніх досліджень та публікацій, на які спираються автори. Проблемам підвищення ефективності роботи екскаваторно-автомобільних комплексів (ЕАК) присвячено значну кількість наукових досліджень і публікацій [1–9]. Більшість науковців, які вивчали питання взаємодії екскаваторів і автосамоскидів у кар'єрних умовах, зазначає, що геометрична місткість кузова автосамоскида є одним із ключових конструктивних параметрів, що визначає узгодженість роботи комплексу. Саме вона забезпечує оптимальне співвідношення між місткістю ковша екскаватора, щільністю гірничої маси та транспортним плечем, впливаючи як на продуктивність, так і на економічність процесів [1–3].

У роботах [2–4] запропоновано формувати склад обладнання ЕАК таким чином, щоб кількість ковшів, необхідних для повного завантаження кузова автосамоскида, забезпечувала максимальний коефіцієнт використання вантажопідйомності при мінімальному часі навантаження. При цьому місткість кузова повинна дозволяти прийняти необхідний об'єм гірничої маси без перевантаження транспортного засобу.

Науковці в [3–9] дійшли висновку, що ефективність роботи ЕАК безпосередньо залежить від узгодженості параметрів гірничотransпортного обладнання.

Окрім екскаваторів, у сучасних кар'єрах все ширше застосовуються фронтальні навантажувачі [1], які можуть ефективно виконувати функції навантаження гірничої маси, особливо у випадках роботи з розсипними, сипкими або фракціонованими матеріалами. Навантажувачі вирізняються вищою маневреністю, універсальністю та можливістю оперативного переміщення між робочими ділянками. У комплексі з автосамоскидами вони дають змогу гнучко організовувати навантажувально-транспортні процеси, скорочувати час простою транспорту і підвищувати коефіцієнт використання робочого часу техніки. При правильному доборі співвідношення між місткістю ковша навантажувача та кузовом автосамоскида (зазвичай у межах 4–6 циклів на одне завантаження) можна досягти оптимального балансу між продуктивністю, паливною економічністю та довговічністю машин.

Таким чином, ефективність роботи екскаваторно- або навантажувально-автомобільних комплексів визначається системним підходом до вибору, узгодження та експлуатації обладнання, що враховує не лише технічні параметри машин, а й специфіку гірничо-геологічних умов, логістику транспортування і організацію виробничих процесів.

Мета статті – обґрунтування доцільності заміни традиційних технологічних схем із використанням екскаваторів та автомобільного транспорту на більш ефективні системи із залученням фронтальних навантажувачів під час виконання розкривних робіт і транспортування блоків природного каменю. Дослідження спрямоване на визначення оптимальних напрямів технологічної та проєктної оптимізації процесів у блочних кар'єрах з метою підвищення продуктивності, зниження енергоспоживання, скорочення експлуатаційних витрат і мінімізації негативного впливу на довкілля.

Для досягнення поставленої мети вирішувалися такі завдання:

- проаналізувати особливості організації робіт при традиційній схемі «екскаватор – автосамоскид»;
- дослідити технічні можливості та переваги використання сучасних навантажувачів у кар'єрах;
- оцінити економічну ефективність переходу на використання навантажувача замість поєднання екскаватора та автомобільного транспорту;
- розробити рекомендації щодо впровадження такої технології в умовах реальних виробництв.

Викладення основного матеріалу.

Фронтальні навантажувачі у сучасних гірничо-технологічних системах

Фронтальний навантажувач є універсальною високопродуктивною машиною, призначеною для виконання широкого спектра землерийних та навантажувально-розвантажувальних робіт. Його основне призначення полягає у переміщенні, навантаженні та транспортуванні різних сипучих і кускових матеріалів – ґрунтів, гірських порід, піску, щебеню, руди, металевої стружки тощо. Завдяки конструктивним особливостям та широкому діапазону робочого обладнання фронтальні навантажувачі все частіше застосовуються на кар'єрах із видобування блочного каменю як альтернатива традиційним схемам «екскаватор – автосамоскид».

Переваги використання фронтальних навантажувачів:

- універсальність і функціональна гнучкість. Машини цього типу здатні не лише здійснювати навантаження і переміщення породи, а й виконувати підготовчі та допоміжні роботи: самостійно розпушувати ґрунти, формувати відвали, здійснювати відсипання насипів і валів, працювати в бульдозерному режимі під час планування робочих майданчиків або копання неглибоких котлованів;

- мобільність і маневреність. Завдяки компактным габаритам, меншим радіусам розвороту та добрій прохідності фронтальні навантажувачі не потребують значних площ для маневрування, що особливо важливо при роботі в обмежених умовах блочного кар'єру. Це суттєво підвищує ефективність роботи в зоні безпосереднього навантаження блоків або відсіву;

- транспортна універсальність. Навантажувачі здатні транспортувати вантажі у ковші, захватах або на піддонах на короткі відстані, а також буксирувати причепи або допоміжне обладнання. Така автономність дає змогу скоротити кількість допоміжних транспортних засобів і спростити логістику всередині кар'єру;

- підвищена ефективність і економічність. Порівняно з екскаваторами аналогічної продуктивності, фронтальні навантажувачі мають меншу масу, споживають менше палива й забезпечують більшу швидкість виконання циклу «завантаження – транспортування – розвантаження». Рациональне співвідношення потужності двигуна, власної ваги та геометричних параметрів сприяє досягненню високої продуктивності при мінімальних експлуатаційних витратах;

- широкий спектр робочого обладнання. Використання змінних робочих органів – ковшів різного типу, гідравлічних захватів, вил, штовхачів, снігоочисного або щіткового обладнання – розширює сферу застосування машин на складах, перевалочних базах, у портах, на промислових підприємствах і в кар'єрах.

На розкривних роботах традиційно застосовується технологічна схема «екскаватор – автосамоскид», яка забезпечує стабільне навантаження великих обсягів гірської маси. Проте ця система характеризується високими експлуатаційними витратами, складною координацією між машинами та значними простоями транспорту під час навантаження. Серед недоліків – обмежена мобільність екскаватора, необхідність постійного облаштування вибоїв, велика тривалість робочого циклу і високі вимоги до планування робочої зони.

Альтернативою є система «навантажувач – автосамоскид», у якій фронтальний навантажувач виконує ті ж функції, що й екскаватор, але з підвищеною маневреністю і швидкістю робочих операцій. Навантажувач може оперативнo змінювати місце роботи, не потребує облаштування спеціальної стоянки, а тривалість циклу «захоплення – підйом – розвантаження» є коротшою. У середньому така схема дозволяє:

- зменшити тривалість циклу навантаження на 20–25 %;
- знизити витрати пального на 15–18 %;
- підвищити коефіцієнт використання робочого часу до 0,85;
- зменшити експлуатаційні витрати на 10–12 %.

Ще більш мобільною і економічно доцільною для невеликих обсягів розкривних робіт є система «навантажувач (самостійна)», у якій машина виконує не лише навантаження, а й транспортування гірської маси на короткі відстані (до 200–400 м). У цьому випадку виключається потреба в автосамоскидах, що знижує загальні експлуатаційні витрати на 25–30 %. Така схема є ефективною при виконанні локальних робіт – розчищення площадок, відсіпання валів, формування тимчасових відвалів.

Її переваги:

- мінімізація кількості техніки;
- відсутність простоїв транспорту;
- зниження витрат на пальне й технічне обслуговування;
- можливість швидкої зміни ділянки роботи без додаткової підготовки майданчика.

Порівняльна характеристика описаних систем на розкривних роботах подана в таблиці 1.

Таблиця 1

Порівняльна характеристика технологічних систем на розкривних роботах

Показник	«Екскаватор – автосамоскид»	«Навантажувач – автосамоскид»	«Навантажувач (самостійна)»
Продуктивність, м³/год	120–140	130–160	80–100
Витрати пального, л/год	35–40	28–32	20–24
Коефіцієнт використання часу	0,71	0,82	0,9
Собівартість 1 м³, грн	10,5–11,0	8,5–9,0	7,5–8,0
Необхідна кількість машин	2–3	2	1

Як показує аналіз таблиці 1, при невеликих обсягах гірничих робіт або коротких транспортних відстанях використання одного навантажувача є найбільш раціональним і економічно доцільним рішенням. Така схема забезпечує достатню продуктивність при мінімальних експлуатаційних витратах і спрощує організацію робочого процесу.

Особливо ефективним цей варіант є для блочних кар'єрів, що характеризуються обмеженою площею гірничих робіт, відносно невеликим об'ємом розкриву та короткими транспортними плечами. У таких умовах застосування важких екскаваторно-автомобільних комплексів часто є економічно недоцільним через великі витрати на утримання автосамоскидів, потребу у значних розворотних майданчиках і складність маневрування. Натомість фронтальні навантажувачі, завдяки своїй маневреності, компактності та універсальності, забезпечують гнучке управління виробничим процесом.

Водночас при збільшенні об'ємів гірничих робіт або довших транспортних відстанях ефективнішою стає комбінована схема типу «навантажувач – автосамоскид», яка дозволяє збільшити продуктивність системи. Такий підхід поєднує оперативність навантажувача при роботі на вибоях з великою вантажопідйомністю автосамоскидів, що забезпечує оптимальне використання техніки і скорочення простоїв при одночасному зниженні собівартості транспортування гірничої маси або блоків природного каменю.

Крім того, є ще один аспект, що вимагає шукати шляхи скорочення персоналу, який задіяний на видобувних роботах, – це воєнний стан та мобілізація. В умовах воєнного стану та триваючої мобілізації питання скорочення чисельності працівників на гірничих підприємствах, зокрема в кар'єрах, набуває особливої актуальності.

Дефіцит кваліфікованих кадрів, спричинений призовом до лав Збройних сил, призводить до зниження доступності робочої сили, ускладнює підтримання безперервності виробничого процесу та збільшує навантаження на наявний персонал.

У таких умовах ключовим завданням стає оптимізація виробничих процесів шляхом впровадження механізації, автоматизації та багатофункціонального обладнання, що дозволяє зменшити потребу у великій кількості операторів без втрати продуктивності. Зокрема, застосування сучасних навантажувачів, екскаваторів та дистанційно керованої техніки дає можливість забезпечити стабільність технологічного циклу навіть за скороченого штату.

Крім того, мінімізація кількості працівників у небезпечних зонах кар'єру позитивно впливає на рівень безпеки, знижує ризик нещасних випадків і дозволяє більш ефективно контролювати виробничу дисципліну.

Таким чином, зменшення чисельності персоналу при одночасному підвищенні технічної оснащеності є не лише вимушеним заходом у період мобілізації, а й важливим напрямом підвищення стійкості та ефективності роботи гірничих підприємств в умовах воєнного часу.

На сучасних фінських блочних кар'єрах з видобутку граніту один навантажувач у середньому обслуговує 10–15 тис. м³ гірської маси, тоді як на італійських мармурових кар'єрах цей показник становить 5–10 тис. м³. Така різниця пояснюється відмінностями у фізико-механічних властивостях гірських порід, технології видобутку та організації виробничого процесу.

Кожен навантажувач комплектується змінним навісним обладнанням, яке встановлюється на перехідному вузлі та дає змогу адаптувати машину до різних технологічних операцій. До складу оснащення входять:

- ківш для транспортування сипких та дрібнофракційних матеріалів;
- два типи вил – стандартні та посилені, призначені для безпечного підйому, переміщення та штабелювання блоків природного каменю;
- скребок для розчищення робочих площадок і видалення залишків гірської маси.

Ківш навантажувача розроблений з урахуванням специфічних умов роботи в кар'єрних забоях: його донна частина посилена подвійними сталевими пластинами, що підвищує зносостійкість, а U-подібна форма дна полегшує занурення під великі уламки породи або некондиційні блоки, забезпечуючи ефективне їх переміщення.

Фронтальні навантажувачі вирізняються високою універсальністю та маневреністю, що дозволяє застосовувати їх у всіх стадіях технологічного процесу – від прибирання розкривних порід до перевезення готових блоків. Використання змінного навісного обладнання значно розширює функціональні можливості машин.

Зокрема, вила забезпечують безпечне захоплення й транспортування блоків навіть на нерівному рельєфі, дозволяючи розташовувати вантаж якомога ближче до центра ваги машини, що підвищує стійкість і безпеку під час виконання робіт.

Таким чином, досвід провідних кар'єрів Фінляндії та Італії демонструє, що раціональне використання навантажувачів із багатофункціональним обладнанням сприяє збільшенню продуктивності, скороченню витрат часу та покращенню умов праці під час видобутку блочного каменю.

Тривалість робочого циклу навантажувача визначається сумарним часом виконання основних операцій: заповнення ковша, транспортування гірничої маси до місця розвантаження, розвантаження та повернення машини у вихідне положення.

Кожна зі складових циклу суттєво впливає на загальну продуктивність, тому важливе значення має раціональний розподіл часу між ними та оптимізація швидкісного режиму. Швидкість руху навантажувачів

залежить від умов роботи, типу ґрунту, стану покриття та довжини транспортної відстані. При роботі у вибоях, коли відстань до місця розвантаження становить не більше 20–30 м, швидкість руху зазвичай коливається в межах 3,5–6 км/год при завантаженому русі та 8–11 км/год під час холостого ходу.

Під час транспортування гірничої маси на більші відстані (50–250 м) по дорогах із твердим покриттям швидкість може досягати 10–15 км/год.

У випадках перегону навантажувача між окремими ділянками кар'єру або при переміщенні без навантаження на значні відстані швидкість руху збільшується до 40 км/год.

Завдяки правильному вибору режиму руху та оптимізації тривалості окремих операцій досягається підвищення ефективності використання навантажувальної техніки і зниження експлуатаційних витрат.

У результаті проведених досліджень та вимірювань у роботі були отримані графічні залежності тривалості руху навантажувачів марки Caterpillar 938 в одному напрямку залежно від ухилу та відстані транспортування при реалізації технологічної схеми «виймання–транспортування» (рис. 1).

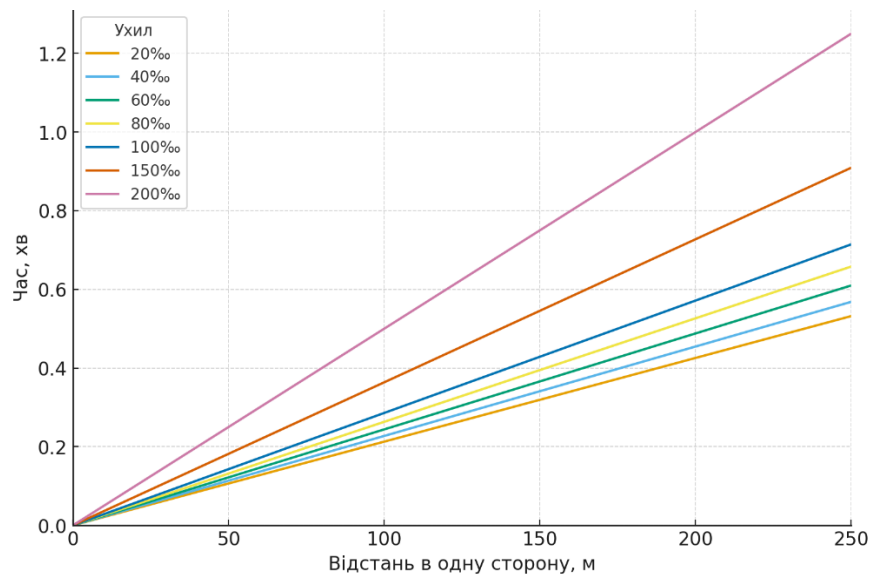


Рис. 1. Тривалість руху навантажувачів фірми Caterpillar 938 в одну сторону при схемі «виймання–транспортування»

Для визначення часу транспортування було одержано та використано спрощену модель залежності середньої швидкості V від локального ухилу i , що виражено в частинах одиниці. Було запропоновано базову форму емпіричної лінійної моделі:

$$V(i) = V_0 \cdot \max(V_{\min}, 1 - k \cdot i), \quad (1)$$

де V_0 – швидкість на ділянці, що досліджували, без ухилу;

k – коефіцієнт чутливості (калібрується);

$V_{\min}$ – граничний відсоток від V_0 (наприклад, 0,2 для умов Пшеничного родовища габро).

Для кар'єрного транспорту k зазвичай лежить в інтервалі 2–5. У роботі було визначено, що для Пшеничного родовища габро $k = 3$ та $V_{\min} = 0,2$. Однак в кожному конкретному випадку дані показники потрібно калібрувати під реальні дані.

Такі залежності дозволяють оцінити вплив рельєфу та організації робочого циклу на продуктивність навантажувальних операцій, а також оптимізувати параметри транспортних маршрутів у межах кар'єру.

Отримані результати можуть бути використані для розрахунку тривалості циклу роботи, планування часу виконання транспортних операцій та вибору раціональних схем взаємодії навантажувального й транспортного обладнання під час проектування кар'єрів.

Висновки та перспективи подальших досліджень. Використання навантажувачів при видобуванні блоків природного каменю є одним із ключових напрямів підвищення ефективності роботи сучасних блочних кар'єрів. Їх застосування зумовлене потребою у гнучкому, мобільному та високопродуктивному обладнанні, здатному виконувати кілька технологічних операцій у межах обмеженої площі робочої зони.

Скорочення кількості працівників за одночасного підвищення рівня технічного оснащення є не лише вимушеним кроком у період мобілізації, але й стратегічним напрямом зміцнення стійкості та підвищення ефективності функціонування гірничих підприємств в умовах воєнного стану.

У проведеному дослідженні було встановлено, що аналітична залежність швидкості руху кар'єрного транспорту від ухилу траси, довжини шляху та режиму руху, що дозволяє більш точно планувати та

оптимізувати транспортні операції у межах кар'єру. Визначені параметри чутливості, зокрема коефіцієнт k та мінімальна швидкість $V_{\min}$, є індивідуальними для кожного родовища й вимагають додаткового калібрування на основі реальних експлуатаційних даних.

Результати моделювання дають змогу оцінити вплив рельєфу та організації робочого циклу на загальну ефективність навантажувально-транспортних процесів, що сприяє підвищенню продуктивності та зниженню витрат.

Подальші дослідження доцільно зосередити на удосконаленні методів калібрування параметрів моделей під конкретні умови експлуатації, а також на розробці адаптивних систем управління транспортними потоками у кар'єрах із врахуванням динаміки зміни рельєфу та виробничих потреб. Застосування сучасних цифрових технологій, таких як автоматизовані системи моніторингу та аналізу даних, може значно підвищити точність прогнозування й ефективність управління транспортними комплексами у гірничодобувній галузі.

Список використаної літератури:

1. Виймально-навантажувальні роботи на кар'єрах : навчальний посібник / В.В. Коробійчук, В.Г. Кравець, С.С. Ісков та ін. – Житомир : ЖДТУ, 2017. – 440 с.
2. Положення про проектування внутрішнього відвалоутворення та складування відходів виробництва в залізничних і флюсових кар'єрах / А.Шapar, П.Копач, В.Романенко та ін. – Дніпропетровськ : Мінерал, 2004. – 50 с.
3. 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.
4. 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.
5. Хоменюк А.В. Оптимізація структури комплексної механізації гірничих робіт на глибоких кар'єрах : автореф. дис. : 8.05030101 / А.В. Хоменюк. – Київ, 2017. – 16 с.
6. 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.
7. Фролов О.О. Оптимізація роботи екскаваторно-автомобільного комплексу при відробці 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.
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. – Vol. 109. – P. 433–439.
9. Czaplicki J. Shovel-Truck Systems: Modelling, Analysis and Calculations / J.Czaplicki. – The Netherlands : CRC Press, 2008. – 170 p.

References:

1. Korobiichuk, V.V., Kravets, V.H., Iskov, S.S. et al. (2017), *Vyimavno-navantazhuvalni roboty na karierakh, navchalnyi posibnyk*, ZhDTU, Zhytomyr, 440 p.
2. Shapar, A., Kopach, P., Romanenko, V. et al. (2004), *Polozhennia pro proektuvannia vnutrishnoho vidvaloutvorennia ta skladuvannia vidkhdov vyrobnytstva v zalizorudnykh i flusovykh karierakh*, Mineral, Dnipropetrovsk, 50 p.
3. 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.
4. 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.
5. Khomeniuk, A.V. (2017), «Optymizatsiia struktury kompleksnoi mekhanizatsii hirnychkykh robiv na hlybokykh karierakh», Abstract of D.Sc. dissertation, 8.05030101, Kyiv, 16 p.
6. 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.
7. Frolov, O.O., Lytvynchuk, I.D. and Ostapchuk, A.O. (2023), «Optymizatsiia roboty ekskavatorno-avtomobilnoho kompleksu pry vidrobtsi fluviohliatsialnykh vidkladiv rozkryvu na karieri Sosnivskoho rodovyscha hranitiv», *Tekhnichna inzheneriia*, No. 1 (91), pp. 366–376, doi: 10.26642/ten-2023-1(91)-366-376.
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*, Vol. 109, pp. 433–439.
9. Czaplicki, J. (2008), «Shovel-Truck Systems: Modelling, Analysis and Calculations», CRC Press, The Netherlands, 170 p.

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.

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

<https://orcid.org/0000-0002-3892-5848>.

Наукові інтереси:

- проектування гірничих підприємств;
- геолого-економічна оцінка родовищ корисних копалин;
- маркшейдерська справа.

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

Іськов Сергій Станіславович – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри маркшейдерії Державного університету «Житомирська політехніка».

<http://orcid.org/0000-0002-9618-489X>.

Наукові інтереси:

- проектування гірничих підприємств;
- геолого-економічна оцінка родовищ корисних копалин;
- маркшейдерська справа.

E-mail: serga.iskov@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., Levytskyi V.G., Iskov S.S., Shyshko S.M.

Technological optimization of loading equipment and transport systems as a factor in increasing productivity and rationalizing design solutions in block stone extraction

The article discusses the topical issue of improving the efficiency of technological processes and optimizing design solutions in the development of block stone deposits. One of the key areas for increasing productivity and reducing costs in quarry production is the improvement of loading and transportation schemes through the introduction of modern front loaders. A comparative analysis of the traditional «excavator-dump truck» system, the combined «loader-dump truck» scheme, and the autonomous «loader» scheme during stripping operations was carried out. It has been established that the use of loaders as universal equipment for simultaneous extraction, loading, and transportation of rock allows for a reduction in the number of operations, lower fuel consumption, and increased maneuverability and flexibility of technological processes.

Particular attention is paid to the use of loaders in areas where natural stone blocks are extracted and moved, where they ensure high positioning accuracy, preservation of block geometry, and reduction of commercial material losses. It is emphasized that the integration of such machines into technological extraction schemes contributes not only to increased labor productivity, but also to improved safety conditions and environmental stability of production.

The results obtained can be used at the design and feasibility study stages of block quarries to select optimal development schemes, rationally select equipment, and ensure a balance between technical efficiency, economic feasibility, and environmental requirements. The introduction of modern front loaders from leading global manufacturers (Caterpillar, Volvo, Komatsu, Liebherr, etc.) creates the conditions for the technological modernization of mining enterprises, increasing their competitiveness, and transitioning to more energy-efficient and environmentally-oriented production systems.

Keywords: block quarries; technological optimization; loading equipment; transport schemes; productivity; design solutions.

Стаття надійшла до редакції 10.09.2025.