

DOI: [https://doi.org/10.26642/ten-2025-2\(96\)-381-389](https://doi.org/10.26642/ten-2025-2(96)-381-389)
УДК 622.271:528.4:658.512.2:656.022

В.О. Шлапак, к.т.н., доц.
А.В. Панасюк, к.т.н., доц.
С.С. Іськов, к.т.н., доц.
А.О. Криворучко, к.т.н., доц.

Державний університет «Житомирська політехніка»

Комплексна оптимізація технологічних систем щебеневих кар'єрів з врахуванням сучасного геодезичного забезпечення, проєктних рішень і транспортно-навантажувальних комплексів

У статті досліджується комплексний підхід до оптимізації технологічних процесів видобування щебеневої сировини через інтеграцію геодезичного моніторингу, транспортної логістики та навантажувальних операцій у єдину цифрову екосистему. Метою дослідження є науково-технічне обґрунтування методів підвищення ефективності щебеневих кар'єрів за рахунок впровадження інтегрованих систем управління на основі сучасних геодезичних технологій.

Методологія дослідження базується на системному аналізі технологічних процесів, математичному моделюванні транспортних потоків, оптимізації розміщення обладнання та інтеграції даних з різних джерел геопросторової інформації. Використано супутникове позиціонування GNSS RTK, наземне лазерне сканування та аерофотограмметрію з безпілотних апаратів для створення актуальної цифрової моделі кар'єру.

Результати дослідження демонструють, що інтеграція геодезичних технологій підвищує продуктивність моніторингу у п'ятнадцять разів при зниженні вартості на сорок відсотків. Оптимізація транспортних комунікацій скорочує середню відстань перевезення на 12–18 % та підвищує коефіцієнт використання автосамоскидів до 0,82–0,87. Раціональне розміщення екскаваторів з мінімізацією кута повороту платформи до 60–75° забезпечує зростання продуктивності обладнання на 12–15 %. Сумарний економічний ефект від впровадження комплексної системи становить зниження собівартості видобутку на 15–18 % та підвищення загальної продуктивності кар'єру на 20–25 %, що підтверджує практичну значущість розробленого підходу для модернізації щебеневої промисловості.

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

Актуальність теми. Щебенева промисловість є базовою галуззю будівельного комплексу України, забезпечуючи критично важливу сировину для дорожнього будівництва та виробництва бетонів. В умовах активного відновлення інфраструктури та зростаючих потреб будівельної галузі питання підвищення ефективності видобування щебеневої сировини набуває особливої актуальності.

Традиційні підходи до організації гірничих робіт характеризуються значними експлуатаційними витратами, серед яких транспортна складова становить 20–40 % загальної собівартості продукції. Неоптимальне розміщення навантажувального обладнання, недосконале трасування транспортних комунікацій та відсутність оперативного контролю просторових параметрів кар'єру призводять до зниження продуктивності технологічних комплексів та зростання питомих витрат на виробництво.

Розвиток цифрових технологій відкриває нові можливості для модернізації щебеневого виробництва. Супутникове позиціонування, наземне лазерне сканування та аерофотограмметрія з безпілотних апаратів дозволяють створювати високоточні просторові моделі кар'єрів та здійснювати моніторинг у режимі реального часу. Однак ці технології традиційно використовуються ізольовано, без системної інтеграції у єдиний технологічний комплекс.

Проблематика полягає у відсутності комплексних підходів до інтеграції геодезичного моніторингу, транспортної логістики та навантажувальних операцій у єдину цифрову екосистему кар'єру. Існуючі дослідження зосереджуються на окремих аспектах виробничого процесу, не враховуючи синергетичного ефекту від системної оптимізації всіх технологічних ланок.

Практична значущість дослідження обумовлена потенціалом зниження собівартості видобутку на 15–18 % та підвищення загальної продуктивності підприємств на 20–25 % через впровадження інтегрованих систем управління. Для вітчизняної промисловості, що потребує технологічної модернізації та підвищення конкурентоспроможності, розробка наукового обґрунтування комплексної оптимізації технологічних процесів видобування щебеню є своєчасним та актуальним завданням, що має значний економічний та соціальний ефект.

Аналіз останніх досліджень та публікацій, на які спираються автори. Комплексна оптимізація технологічних систем щебеневих кар'єрів являє собою багатовекторний процес, що передбачає системну

інтеграцію геодезичного забезпечення, проєктних рішень та транспортно-машинних комплексів з метою максимізації ефективності видобувних операцій та мінімізації виробничих витрат. Сучасний науковий дискурс підтверджує значний потенціал цифровізації гірничих процесів, застосування методів математичного моделювання та впровадження мобільних технологічних рішень у цій галузі.

Першочерговим напрямом оптимізації є інтеграція передових геодезичних технологій, зокрема глобальних навігаційних супутникових систем (GNSS), лазерного сканування та методів аерофотограмметрії. Синергетичне застосування зазначених технологій забезпечує формування актуалізованих цифрових моделей кар'єрних комплексів, що сприяє суттєвому підвищенню точності моніторингу гірничих робіт, оптимізації процесів планування виробничих операцій та скороченню витрат на геодезичне забезпечення виробництва [2, 1].

Паралельним вектором оптимізації є впровадження методів математичного моделювання та комп'ютерної симуляції технологічних процесів, що охоплюють весь виробничий ланцюг від видобутку гірської маси до її дроблення, транспортування та відвантаження. Застосування імітаційного моделювання дозволяє здійснювати науково обґрунтований вибір оптимальних комбінацій технологічного обладнання, раціоналізувати транспортні маршрути та визначати оптимальні режими функціонування виробничих систем, що в сукупності забезпечує підвищення загальної продуктивності та зниження собівартості продукції [3–5, 8].

Економічна ефективність комплексної оптимізації проявляється у суттєвому зниженні собівартості видобувної продукції. Раціоналізація транспортних схем у поєднанні з впровадженням цифрових систем диспетчерського управління виробничими процесами забезпечує редуцію собівартості видобутку на 15–28 %, при цьому конкретні показники ефективності детермінуються глибиною розробки родовища та морфологічними особливостями кар'єрного простору [6, 2, 7].

Мета статті полягає в розробці методики комплексної оптимізації технологічних систем щеленевих кар'єрів, що інтегрує сучасне геодезичне забезпечення, удосконалені проєктні рішення та ефективні транспортно-навантажувальні комплекси.

Викладення основного матеріалу. Сучасне геодезичне забезпечення щеленевих кар'єрів базується на застосуванні трьох ключових технологій, що доповнюють одна одну та створюють комплексну систему моніторингу просторових параметрів гірничих робіт.

Технологія глобального навігаційного супутникового позиціонування дозволяє визначати координати обладнання з точністю до двох-трьох сантиметрів у режимі реального часу. Ця система використовується для моніторингу положення мобільних дробильно-сортувальних комплексів, контролю переміщення гірничотранспортного обладнання та ведення актуальної цифрової моделі місцевості кар'єру. Встановлені на гірничих машинах приймачі безперервно передають координати на диспетчерський пункт, що дозволяє оперативно корегувати режими роботи та оптимізувати маршрути руху транспорту.

Наземне лазерне сканування забезпечує отримання детальної тривимірної моделі робочих уступів та виробленого простору з точністю до п'яти міліметрів. На відміну від традиційних геодезичних методів, лазерне сканування дозволяє за короткий час отримати мільйони точок поверхні, що створює надзвичайно детальну цифрову модель. Ця технологія використовується для визначення обсягів видобутку, контролю стійкості укосів, планування розміщення обладнання та оцінки якості підготовки гірничої маси. Періодичне сканування дозволяє відслідковувати динаміку розвитку гірничих робіт та своєчасно виявляти небезпечні деформації укосів.

Аерофотограмметрія з безпілотних літальних апаратів дозволяє щомісяця створювати актуальні ортофотоплани та цифрові моделі рельєфу кар'єру з роздільною здатністю два-п'ять сантиметрів на піксель. Безпілотники обладнуються високоточними камерами та приймачами супутникового позиціонування, що забезпечує геометричну точність отриманих знімків. Порівняно з традиційною геодезичною зйомкою, аерофотозйомка скорочує час польових робіт на шістьдесят відсотків та дозволяє отримувати інформацію про важкодоступні ділянки кар'єру (табл. 1).

Таблиця 1

Порівняльні характеристики геодезичних методів

Параметр	Традиційна зйомка	GNSS RTK	Лазерне сканування	БПЛА
Продуктивність (га/день)	1,5–2,0	8–12	4–6	20–30
Точність планова (см)	3–5	2–3	0,5–1,0	2–5
Точність висотна (см)	2–3	2–3	0,3–0,5	3–8
Кількість точок (тис/га)	0,05–0,1	0,2–0,5	100–500	50–200
Вартість (грн/га)	2500–3000	1500–2000	3000–4500	1200–1800
Час обробки (днів)	3–5	1–2	1–2	0,5–1

Інтеграція супутникового позиціонування, наземного лазерного сканування та аерофотограмметрії з безпілотних апаратів створює комплексну систему геодезичного забезпечення щеленевих кар'єрів, яка підвищує продуктивність моніторингу у п'ятнадцять разів, знижує вартість робіт на сорок відсотків та забезпечує міліметрову точність контролю просторових параметрів видобування порівняно з традиційними методами геодезичної зйомки (рис. 1).

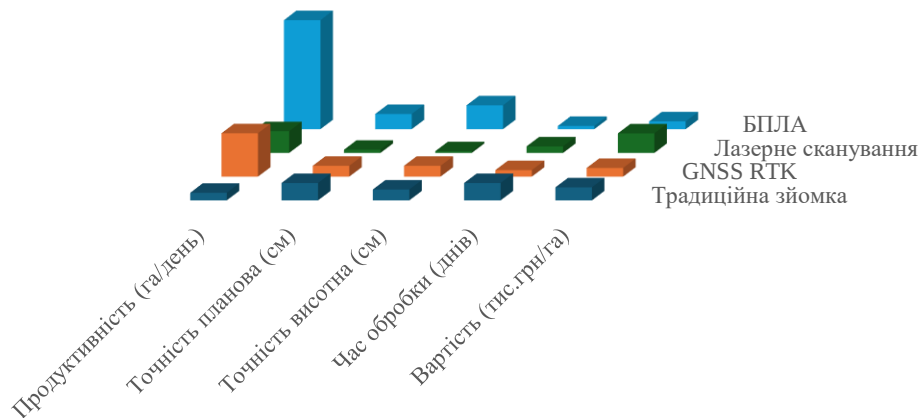


Рис. 1. Порівняльні характеристики геодезичних методів

Транспортна складова технологічної системи видобування щеленевої сировини – транспортування гірничої маси від місця виймання до пунктів переробки та відвантаження – становить серцевину технологічного ланцюга щеленевого кар'єру. Ефективність транспортної системи прямо визначає загальну продуктивність підприємства та істотно впливає на собівартість продукції, оскільки транспортні витрати можуть становити від двадцяти до сорока відсотків загальних операційних витрат.

Оптимізація транспортної системи починається з аналізу просторової конфігурації кар'єру та характеру технологічних потоків. Геоінформаційна модель, створена за допомогою комплексу геодезичних технологій, дозволяє точно визначити відстані між пунктами вантажоутворення та пунктами споживання матеріалу. Однак простої оцінки евклідової відстані між точками недостатньо – необхідно враховувати реальну топологію транспортних комунікацій, включаючи ухили траси, радіуси поворотів, стан дорожнього покриття та можливі перешкоди.

Проектування транспортних комунікацій у кар'єрі вимагає дотримання суворих технічних обмежень. Максимально допустимі повздовжні ухили визначаються типом транспортних засобів та характеристиками дорожнього покриття. Для автосамоскидів великої вантажопідйомності на підйомах ухил зазвичай обмежується вісьмома-десятьма відсотками, тоді як на спусках може сягати дванадцяти відсотків з урахуванням гальмівних характеристик. Радіуси поворотів розраховуються виходячи з габаритів найбільшого транспортного засобу з додатковим запасом безпеки. Ширина проїжджої частини повинна забезпечувати безпечний роз'їзд двох завантажених автосамоскидів з залишенням захисних бERM.

Трасування транспортних шляхів здійснюється з використанням цифрової моделі рельєфу кар'єру. Спеціалізоване програмне забезпечення дозволяє змодельовати різні варіанти траси та оцінити їх з точки зору загальної довжини, сумарного набору висоти, обсягів земляних робіт для влаштування дороги та витрат на експлуатацію. Оптимальний варіант траси забезпечує баланс між мінімізацією відстані транспортування та зменшенням опору руху за рахунок вибору найбільш сприятливого профілю (табл. 2).

Критично важливим аспектом транспортної системи є координація роботи транспортних засобів з навантажувальними та розвантажувальними пунктами. Простої автосамоскидів у очікуванні завантаження або розвантаження призводять до зниження їхньої продуктивності та збільшення питомих транспортних витрат. Система диспетчеризації на основі супутникового позиціонування дозволяє відслідковувати місцезнаходження кожного транспортного засобу та прогнозувати час його прибуття до пункту призначення. Це дає можливість рівномірно розподіляти потік автосамоскидів між різними навантажувальними пунктами та уникати черг.

Важливо розуміти, що транспортна система не є статичною – вона має адаптуватися до зміни конфігурації фронту гірничих робіт. У міру розвитку кар'єру вглиб місця вантажоутворення переміщуються, що вимагає періодичного перегляду схеми транспортних комунікацій. Регулярне геодезичне обстеження та актуалізація цифрової моделі дозволяють своєчасно виявляти потребу у коригуванні транспортної мережі та планувати необхідні зміни з мінімальним впливом на поточне виробництво.

Параметри оптимізації транспортних комунікацій

Параметр	Позначення	Допустимий діапазон	Оптимальне значення	Вплив на продуктивність
Ухил підйому	$i_{\text{під}}$	0–10 %	6–7 %	-1,8 % на кожен 1 %
Ухил спуску	$i_{\text{сп}}$	0–12 %	8–9 %	+0,5 % на кожен 1 %
Радіус повороту	R	15–40 м	25–30 м	-0,3 % при $R < 20\text{м}$
Ширина проїжджої частини	B	10–16 м	12–14 м	-5 % при $B < 11\text{м}$
Швидкість завантаженням	v_z	15–35 км/год	24–28 км/год	Оптимум за графіком
Швидкість порожнім	$v_{\text{п}}$	20–45 км/год	32–38 км/год	+2 % на кожні 5 км/год

Транспортна система щебеневого кар'єру є динамічним технологічним комплексом, що визначає загальну ефективність виробництва через значну частку у структурі витрат (20–40 %) та прямий вплив на продуктивність підприємства. Успішна оптимізація транспортних комунікацій досягається шляхом інтеграції геоінформаційного моделювання, дотримання технічних нормативів проектування (ухили 6–10 %, радіуси поворотів 25–30 м, ширина проїзду 12–14 м) та впровадження систем супутникового диспетчерування, що мінімізують непродуктивні простой (рис. 2). Критичним фактором успіху є не лише первинне проектування оптимальних транспортних трас із врахуванням рельєфу та технологічних потоків, а й здатність системи адаптуватися до поглиблення кар'єру через регулярне геодезичне обстеження та своєчасне коригування транспортної мережі, що забезпечує стабільну продуктивність протягом усього життєвого циклу родовища.

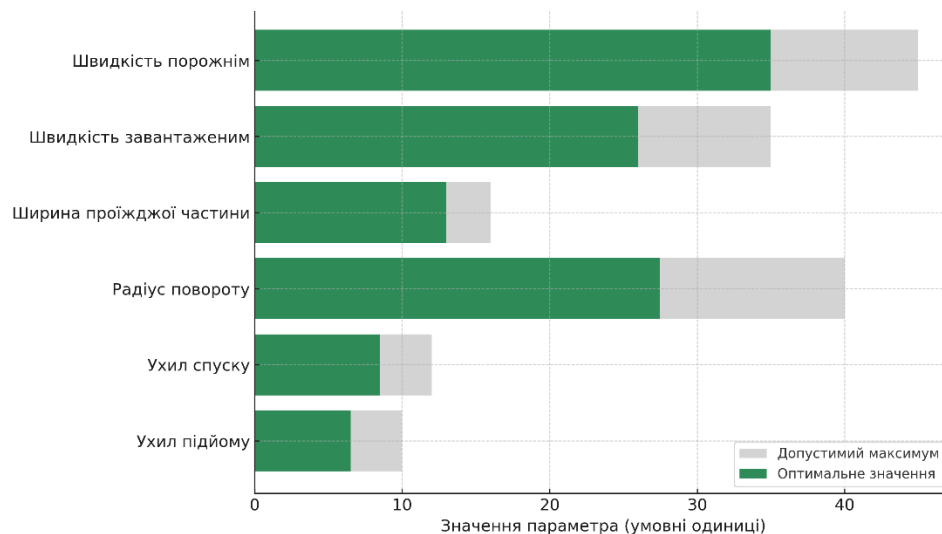


Рис. 2. Параметри оптимізації транспортних комунікацій

Навантажувальні комплекси та оптимізація їх розміщення під час видобування щебеневої сировини – це навантажувальні комплекси, які формують критичні вузли технологічної системи, де відбувається передача гірничої маси від місця виймання до транспортної системи або до переробних установок. Ефективність роботи цих комплексів багато в чому визначає продуктивність усього виробничого ланцюга, оскільки саме тут матеріалізуються втрати часу на маневрування, позиціонування та власне завантаження.

Експлуатаційні комплекси визначають пропускну здатність технологічного ланцюга «вибій – транспорт – переробка». Продуктивність системи залежить від тривалості робочого циклу екскаватора, що складається з чотирьох послідовних операцій: черпання матеріалу, поворот платформи з навантаженням ковшем, розвантаження та зворотний поворот до вихідної позиції.

Кут повороту платформи є визначальним фактором тривалості робочого циклу. Дослідження показують, що мінімізація кута повороту з 90 до 60° забезпечує скорочення часу циклу на 20–25 %. Це досягається шляхом оптимального позиціонування екскаватора відносно транспортних засобів та напрямку розвантаження матеріалу.

Швидкість повороту платформи для щебеневих матеріалів становить 2–3 об/хв при роботі з навантаженим ковшем та на 10–15 % вище для порожнього ковша. Обмеження швидкості обумовлені динамічними навантаженнями на поворотну платформу та вимогами охорони праці.

Коефіцієнт продуктивності враховує всі експлуатаційні втрати, враховуючи час на позиціонування, неповне заповнення ковша, технологічні перерви та очікування транспорту. При оптимальній організації робочого процесу цей коефіцієнт досягає 0,80–0,85; за несприятливих умов знижується до 0,65–0,70.

Оптимізація розміщення екскаваторних комплексів здійснюється поетапно. На першому етапі виконується геодезичне обстеження для створення просторової моделі робочих горизонтів та визначення можливих точок установки обладнання. Другий етап передбачає аналіз матеріальних потоків з визначенням обсягів та напрямків транспортування гірничої маси. Третій етап включає математичну оптимізацію позицій екскаваторів з метою мінімізації кутів повороту платформи та радіусів вивантаження. Завершальний етап передбачає техніко-економічне обґрунтування вибору конкретних моделей обладнання, що забезпечують реалізацію оптимальної технологічної схеми.

Інтеграція GPS-позиціонування у систему керування дозволяє динамічно коригувати положення екскаваторів у міру відпрацювання забою, забезпечуючи адаптацію до поточних умов експлуатації.

Впровадження оптимізованої схеми розміщення екскаваторних комплексів забезпечує підвищення продуктивності обладнання на 12–15 % та зниження собівартості видобутку на 15–18 %. Це дозволяє або скоротити парк необхідного обладнання, або збільшити обсяги виробництва при незмінній кількості техніки.

Таблиця 3

Оптимальні технологічні параметри екскаваторного обладнання

Параметр	Оптимальне значення	Граничне значення
Кут повороту платформи	60–75°	≤ 90°
Швидкість повороту з вантажем	2,5–3,0 об/хв	2,0–3,5 об/хв
Швидкість повороту порожнім	3,0–3,5 об/хв	2,5–4,0 об/хв
Коефіцієнт наповнення ковша	0,85–0,95	≥ 0,80
Коефіцієнт продуктивності	0,80–0,85	≥ 0,70
Радіус вивантаження	8–12 м	6–15 м
Час циклу (для ковша 2–3 м³)	25–30 с	≤ 35 с
Висота вивантаження	3,5–4,2 м	3,0–5,0 м
Кут черпання	30–45°	25–50°
Час очікування транспорту	≤ 5 % робочого часу	≤ 10 %

Наведені в таблиці 3 параметри обґрунтовані експериментальними дослідженнями та промисловим досвідом експлуатації екскаваторних комплексів на підприємствах з видобутку щебеневі сировини. Дотримання оптимальних значень кута повороту платформи, швидкості виконання операцій та радіуса вивантаження забезпечує максимальну продуктивність при мінімальних енергетичних витратах. Систематичне відхилення від рекомендованих параметрів призводить до зниження коефіцієнта продуктивності та збільшення питомих витрат на тону перероблюваного матеріалу, що підтверджує необхідність використання математичних методів оптимізації при проектуванні та експлуатації екскаваторних комплексів (табл. 3, рис. 3).

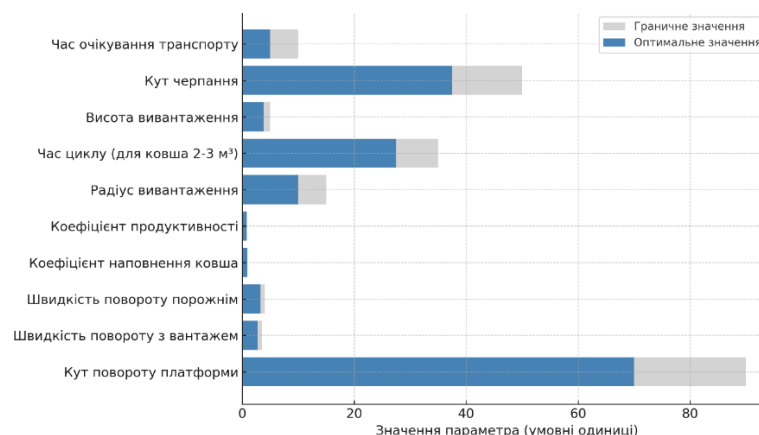


Рис. 3. Оптимальні технологічні параметри екскаваторного обладнання

Комплексне проектне рішення щодо оптимізації видобування щебеню пропонує об'єднати геодезичний моніторинг, транспортну логістику та навантажувальні операції в єдину цифрову екосистему кар'єру. Система функціонує як цілісний організм, де кожен компонент отримує дані від інших і автоматично адаптується до змін у виробничому процесі. Ключовою особливістю є створення єдиної цифрової моделі кар'єру, що оновлюється в реальному часі та використовується всіма технологічними підсистемами одночасно. В основі системи лежить єдина геоінформаційна платформа, що агрегує дані з трьох джерел різної частоти оновлення. Супутникові приймачі GNSS RTK, встановлені на всьому мобільному обладнанні, безперервно передають координати з точністю 2–3 см, формуючи динамічну картину руху техніки. Щотижневе наземне лазерне сканування критичних зон додає детальну геометрію робочих уступів та навантажувальних майданчиків з точністю 0,5–1,0 см. Щомісячна аерофотозйомка з безпілотників створює повну просторову модель кар'єру з роздільною здатністю 2–5 см на піксель. Система автоматично інтегрує всі геодезичні дані в єдину тривимірну модель, оновлюючи її щогодини. Порівняння послідовних станів дозволяє визначати швидкість відпрацювання різних ділянок, обсяги видобутку та зміну конфігурації фронту робіт. Ця інформація безпосередньо використовується модулями оптимізації транспорту та позиціонування екскаваторів.

Центральний оптимізаційний модуль щогодини аналізує геометрію кар'єру, поточне завантаження обладнання та планові обсяги видобутку, генеруючи комплексне рішення для розміщення екскаваторів та маршрутизації транспорту. Алгоритм одночасно розв'язує дві взаємопов'язані задачі: визначення оптимальних позицій екскаваторних комплексів та побудову ефективних транспортних шляхів між ними.

При оптимізації розміщення екскаваторів система мінімізує кут повороту платформи до діапазону 60–75°, що забезпечує скорочення робочого циклу на 20–25 % порівняно зі стандартним кутом 90°. Одночасно враховується радіус вивантаження 8–12 м та необхідність забезпечення коефіцієнта наповнення ковша не менше 0,85. Позиції екскаваторів проєктуються так, щоб напрямок розвантаження максимально збігався з віссю руху автосамоскидів, що додатково скорочує час маневрування транспорту.

Транспортні траси розраховуються з урахуванням технічних обмежень: ухили підйому 6–7 %, спуску 8–9 %, радіуси поворотів 25–30 м, ширина проїжджої частини 12–14 м. Програмний модуль будує граф можливих маршрутів між всіма навантажувальними та розвантажувальними пунктами, оцінюючи кожен варіант за критерієм мінімізації транспортної роботи з урахуванням опору руху та обсягів земляних робіт для влаштування дороги.

GPS-трекери на автосамоскидах безперервно передають координати, швидкість руху та стан завантаження кожної машини. Диспетчерський модуль відстежує положення всього транспорту відносно екскаваторів та пунктів розвантаження, прогножуючи час прибуття з точністю до однієї хвилини. На основі цих прогнозів система динамічно розподіляє автосамоскиди між різними навантажувальними пунктами, балансує завантаження екскаваторів та мінімізуючи черги.

Кожному автосамоскиду, що завершив розвантаження, призначається оптимальний екскаватор з урахуванням поточної черги, відстані до пункту навантаження, планових обсягів видобутку з різних ділянок та прогнозованого часу завершення поточного навантаження. Алгоритм забезпечує завантаження екскаваторів на рівні 90–95 % робочого часу при простоях транспорту не більше 5 %.

Система моніторингу стану кар'єрних доріг використовує акселерометри, встановлені на автосамоскидах. Аналіз вібрацій дозволяє виявляти ділянки з критичним станом покриття та автоматично коригувати маршрути, направляючи транспорт на альтернативні траси до виконання ремонту.

Критичною особливістю системи є здатність автоматично адаптуватися до зміни конфігурації кар'єру. У міру поглиблення виробки та переміщення фронту робіт змінюються відстані транспортування та оптимальні позиції обладнання. Система щотижня виконує повний перерахунок оптимізаційних параметрів на основі оновленої геодезичної моделі. При виявленні істотних відхилень від оптимальної конфігурації генеруються рекомендації щодо переміщення екскаваторів та коригування транспортної мережі. Модуль контролю стійкості укосів аналізує дані лазерного сканування, виявляючи деформації, що перевищують 5 мм за тиждень. При виявленні небезпечних зон система автоматично коригує траси транспортних шляхів та позиції екскаваторів, виключаючи ризиковані ділянки з експлуатації до виконання превентивних заходів. Інтеграція всіх технологічних підсистем в єдину цифрову екосистему забезпечує синергетичний ефект. Продуктивність геодезичного моніторингу зростає у 15 разів при зниженні вартості на 40 % порівняно з традиційними методами. Оптимізація транспортної системи скорочує середню відстань транспортування на 12–18 % та підвищує коефіцієнт використання автосамоскидів до 0,82–0,87. Раціональне розміщення екскаваторів збільшує їх продуктивність на 12–15 % при досягненні коефіцієнта продуктивності 0,80–0,85.

Сумарний економічний ефект становить зниження собівартості видобутку на 15–18 % та підвищення загальної продуктивності кар'єру на 20–25 %. Для підприємства з річним обсягом видобутку 500 тисяч тонн щебеню термін окупності інвестицій оцінюється в 18–24 місяці. Система масштабується для кар'єрів різної продуктивності зі збереженням ключових переваг цифрової інтеграції.

В результаті виконаного дослідження сформовано схему комплексної оптимізації видобування твердих магматичних порід на щебін (рис. 4).

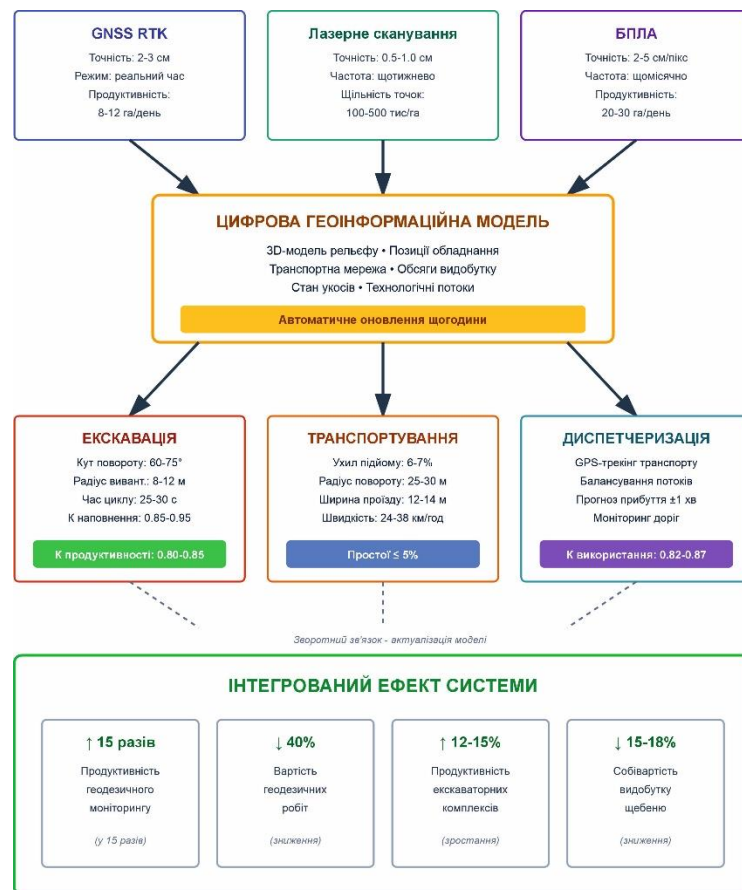


Рис. 4. Інтегрована система оптимізації видобування щебеню

Висновки та перспективи подальших досліджень. Проведене дослідження доводить ефективність комплексного підходу до оптимізації технологічних процесів видобування щебеневої сировини через інтеграцію геодезичного моніторингу, транспортної логістики та навантажувальних операцій у єдину цифрову екосистему. Встановлено, що інтеграція супутникового позиціонування GNSS RTK, наземного лазерного сканування та аерофотограмметрії з безпілотних апаратів підвищує продуктивність геодезичного моніторингу у 15 разів при зниженні вартості робіт на 40 % порівняно з традиційними методами зйомки. Доведено, що оптимізація транспортних комунікацій з дотриманням технічних нормативів (ухили підйому 6–7 %, радіуси поворотів 25–30 м, ширина проїзду 12–14 м) та впровадження GPS-диспетчерування скорочує середню відстань транспортування на 12–18 % та підвищує коефіцієнт використання автосамоскидів до 0,82–0,87. Обґрунтовано, що раціональне розміщення екскаваторних комплексів з мінімізацією кута повороту платформи до діапазону 60–75° забезпечує підвищення продуктивності обладнання на 12–15 % при досягненні коефіцієнта продуктивності 0,80–0,85. Сумарний економічний ефект від впровадження інтегрованої системи становить зниження собівартості видобутку на 15–18 % та підвищення загальної продуктивності кар'єру на 20–25 %, що підтверджує доцільність цифрової трансформації щебеневої промисловості.

Перспективи подальших досліджень включають розробку алгоритмів машинного навчання для прогнозування оптимальних позицій обладнання на основі історичних даних експлуатації; створення систем автоматичного керування гірничотранспортним обладнанням з використанням штучного інтелекту; дослідження можливостей інтеграції технологій Інтернету речей для безперервного моніторингу технічного стану обладнання; розробку методик оцінки екологічного впливу оптимізованих технологічних схем; вивчення адаптації запропонованої системи для кар'єрів з видобування інших видів нерудних будівельних матеріалів; створення цифрових двійників кар'єрів для віртуального моделювання технологічних процесів та прогнозування розвитку гірничих робіт на довгострокову перспективу.

Список використаної літератури:

1. Mining of non-metallic mineral deposits in the context of Ukraine's reconstruction in the war and post-war periods / P.Saik, O.Cherniaiev, O.Anisimov and other // Mining of Mineral Deposits. – 2023. DOI: 10.33271/mining17.04.091.
2. Substantiation of resource-saving technology when mining the deposits for the production of crushed-stone products / O.Cherniaiev, A.Pavlychenko, O.Romanenko, Y.Vovk // Mining of Mineral Deposits. – 2021. DOI: 10.33271/mining15.04.099.

3. Jung D. Development of Stone Production System Simulator Considering Quarrying, Crushing and Shipping Processes / D.Jung, S.Park, Y.Choi // Journal of the Korean Society of Mineral and Energy Resources Engineers. – 2024. DOI: 10.32390/ksmer.2024.61.2.089.
4. Yamashita A. A review of modeling and control strategies for cone crushers in the mineral processing and quarrying industries / A.Yamashita, A.Thivierge, T.Euzébio // Minerals Engineering. – 2021. DOI: 10.1016/j.mineng.2021.107036.
5. Fattouh A. A Real-Time Optimization Model for Production Planning in Quarry Sites / A.Fattouh, M.Bohlin, D.Sundmark // 2021 IEEE 8th International Conference on Industrial Engineering and Applications (ICIEA). – 2021. DOI: 10.1109/ICIEA52957.2021.9436725.
6. Sobko B. Assessment of the using a mobile crushing and sorting plant investment attractiveness at the development of construction material quarries / B.Sobko, O.Lochnikov, V.Kriachek // Mining of Mineral Deposits. – 2024. DOI: 10.33271/mining18.04.034.
7. Fabianová J. Assessment of the economic efficiency of the modernization of crushed stone manufacturing process: case study / J.Fabianová, J.Janeková, M.Fabian // Advances in science and technology research journal. – 2018. DOI: 10.12913/22998624/92299.
8. Вдосконалення технологічних схем відвантаження мінеральної сировини на щебневих кар'єрах / О.О. Анісімов, О.В. Черняєв, П.Б. Саїк, В.Г. Лозинський // Наукові праці ДонНТУ. – 2024.

References:

1. Saik, P., Cherniaiev, O., Anisimov, O. et al. (2023), «Mining of non-metallic mineral deposits in the context of Ukraine's reconstruction in the war and post-war periods», *Mining of Mineral Deposits*, doi: 10.33271/mining17.04.091.
2. Cherniaiev, O., Pavlychenko, A., Romanenko, O. and Vovk, Y. (2021), «Substantiation of resource-saving technology when mining the deposits for the production of crushed-stone products», *Mining of Mineral Deposits*, doi: 10.33271/mining15.04.099.
3. Jung, D., Park, S. and Choi, Y. (2024), «Development of Stone Production System Simulator Considering Quarrying, Crushing and Shipping Processes», *Journal of the Korean Society of Mineral and Energy Resources Engineers*, doi: 10.32390/ksmer.2024.61.2.089.
4. Yamashita, A., Thivierge, A. and Euzébio, T. (2021), «A review of modeling and control strategies for cone crushers in the mineral processing and quarrying industries», *Minerals Engineering*, doi: 10.1016/j.mineng.2021.107036.
5. Fattouh, A., Bohlin, M. and Sundmark, D. (2021), «A Real-Time Optimization Model for Production Planning in Quarry Sites», *2021 IEEE 8th International Conference on Industrial Engineering and Applications (ICIEA)*, doi: 10.1109/ICIEA52957.2021.9436725.
6. Sobko, B., Lochnikov, O. and Kriachek, V. (2024), «Assessment of the using a mobile crushing and sorting plant investment attractiveness at the development of construction material quarries», *Mining of Mineral Deposits*, doi: 10.33271/mining18.04.034.
7. Fabianová, J., Janeková, J. and Fabian, M. (2018), «Assessment of the economic efficiency of the modernization of crushed stone manufacturing process: case study», *Advances in science and technology research journal*, doi: 10.12913/22998624/92299.
8. Anisimov, O.O., Cherniaiev, O.V., Saik, P.B. and Lozynskyi, V.H. (2024), «Vdoskonalennia tekhnolohichnykh skhem vidvantazhennia mineralnoi syrovyny na shchebenevykh karierakh», *Naukovi pratsi DonNTU*.

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;
- маркшейдерська справа;
- переробка та збагачення корисних копалин.

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

Панасюк Андрій Вікторович – кандидат технічних наук, доцент Державного університету «Житомирська політехніка».

<https://orcid.org/0000-0001-7468-2022>.

Наукові інтереси:

- маркшейдерія, геодезія;
- дистанційне зондування землі;
- математичне моделювання;
- підземні гірничі роботи;
- оцінка ресурсів.

E-mail: panasiuk@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.

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

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

Наукові інтереси:

- гірничі машини та комплекси;
- геометрія надр;
- видобування блочного каменю.

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

Shlapak V.O., Panasiuk A.V., Iskov S.S., Kryvoruchko A.O.

Comprehensive optimization of technological systems of crushed stone quarries considering modern geodetic support, design solutions, and transport-loading complexes

The article investigates a comprehensive approach to optimizing technological processes of crushed stone raw material extraction through the integration of geodetic monitoring, transport logistics, and loading operations into a unified digital ecosystem. The aim of the study is the scientific and technical substantiation of methods for improving the efficiency of crushed stone quarries through the implementation of integrated management systems based on modern geodetic technologies.

The research methodology is based on systematic analysis of technological processes, mathematical modeling of transport flows, optimization of equipment placement, and integration of data from various geospatial information sources. GNSS RTK satellite positioning, terrestrial laser scanning, and aerial photogrammetry using unmanned aerial vehicles were employed to create an up-to-date digital model of the quarry.

The research results demonstrate that the integration of geodetic technologies increases monitoring productivity fifteen-fold while reducing costs by forty percent. Optimization of transport communications reduces the average transportation distance by 12–18 % and increases the utilization coefficient of dump trucks to 0,82–0,87. Rational placement of excavators with minimization of the platform rotation angle to 60–75° ensures equipment productivity growth of 12–15 %. The total economic effect of implementing the comprehensive system amounts to a reduction in extraction costs by 15–18 % and an increase in overall quarry productivity by 20–25 %, which confirms the practical significance of the developed approach for the modernization of the crushed stone industry.

Keywords: crushed stone quarries; geodetic support; technological optimization; loading equipment; transport schemes; productivity; design solutions.

Стаття надійшла до редакції 17.09.2025.