

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
КРИВОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
КАФЕДРА ВІДКРИТИХ ГІРНИЧИХ РОБІТ

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

до випускної роботи

на здобуття освітньо-кваліфікаційного рівня магістра
зі спеціальності 184 “Гірництво” ОПП «Відкриті гірничі роботи»

На тему: **«Дослідження зв’язків основних технологічних процесів при
екскаваторному способі розробки родовищ корисних копалин»**

Виконав ст. групи ГІВ-23-1м _____

/Остапчук П.В./

Керівник _____

/Григор’єв Ю.І./

Завідувач кафедри _____

/Жуков С.О./

Кривий Ріг

2024 р.

РЕФЕРАТ

Магістерська робота на тему «Дослідження зв'язків основних технологічних процесів при екскаваторному способі розробки родовищ корисних копалин» викладена на 51 стр., містить 9 рис., 6 таблиць, 37 джерел літератури.

Актуальність теми. У сучасних умовах розвитку гірничодобувної промисловості зростає потреба в ефективних та безпечних методах видобутку корисних копалин. Особливо це стосується розробки крутоспадних залізорудних родовищ, які характеризуються складними гірничо-геологічними умовами та підвищеними вимогами до технологічних процесів.

Актуальність даного дослідження обумовлена необхідністю вдосконалення екскаваторного способу розробки, який залишається одним із найпоширеніших методів видобутку. Вивчення зв'язків між основними технологічними процесами дозволяє виявити резерви підвищення продуктивності та зниження витрат. Оптимізація цих процесів має прямий вплив на економічну ефективність діяльності гірничодобувних підприємств.

Крім того, зростаючі вимоги до якості сировини та підвищення конкурентоспроможності на світовому ринку вимагають від гірничодобувних підприємств впровадження передових технологій. Аналіз та оптимізація технологічних процесів при екскаваторному видобутку залізної руди з крутоспадних родовищ є ключовими для досягнення цих цілей. Це дозволить не тільки задовольнити попит на високоякісну руду, але й забезпечити стійкий розвиток галузі в довгостроковій перспективі.

Таким чином, дослідження, спрямоване на виявлення та оптимізацію зв'язків між основними технологічними процесами при екскаваторній розробці крутоспадних родовищ, є надзвичайно актуальним.

Мета й завдання роботи. Метою даного магістерського дослідження є наукове обґрунтування оптимальних параметрів технологічних процесів при екскаваторному способі розробки родовищ. Для досягнення поставленої мети в роботі сформовані **основні задачі дослідження:**

1. Виконати аналіз теоретичних основ і досвіду експлуатації комплексів механізації при екскаваторному способі розробки родовищ.
2. Встановити і обґрунтувати зв'язки параметрів основних технологічних процесів відкритих гірничих робіт.
3. Встановити залежності параметрів буропідричних робіт та подальших технологічних процесів, які б забезпечили найкращі техніко-економічні показники розробки.

Об'єкт дослідження – основні технологічні процеси відкритих гірничих робіт при екскаваторному способі розробки родовищ.

Предмет дослідження – взаємозв'язки параметрів основних технологічних процесів відкритих гірничих робіт при екскаваторному способі розробки родовищ.

Ідея. Підвищити ефективність екскаваторного способу розробки родовищ за рахунок обґрунтування оптимального гранулометричного складу підірваних гірських порід.

Методи дослідження. Аналіз і синтез літературних джерел - для вивчення теоретичних основ і досвіду експлуатації комплексів механізації при екскаваторному способі розробки; метод кореляційно-регресійного аналізу – для встановлення залежностей параметрів експлуатації екскаваторно-автомобільних комплексів від якості вибухової підготовки.

Наукове значення роботи полягає у аналізі теорії і практики екскаваторного способу розробки родовищ, а також математичному моделюванні основних технологічних процесів відкритих гірничих робіт.

Практичне значення роботи полягає у встановленні регресійних залежностей параметрів продуктивності обладнання від гранулометричного складу підірваних гірських порід.

ЕКСКАВАТОР, ГРАНУЛОМЕТРИЧНИЙ СКЛАД, ПРОЦЕСИ ВІДКРИТИХ ГІРНИЧИХ РОБІТ, РОЗМІР СЕРЕДНЬОГО КУСКА, ТРИВАЛІСТЬ ЦИКЛУ, БУРОПІДРИВНІ РОБОТИ.

ЗМІСТ

ВСТУП	6
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ МЕТОДИЧНИХ ПРИНЦИПІВ ОПТИМІЗАЦІЇ ПАРАМЕТРІВ ЕКСКАВАТОРНО-АВТОМОБІЛЬНИХ КОМПЛЕКСІВ	8
1.1 Принципи оптимізації параметрів екскаваторно-автомобільного комплексу	8
1.2 Методичні основи оптимізації параметрів екскаваторно-автомобільних комплексів	16
РОЗДІЛ 2. ВСТАНОВЛЕННЯ ВЗАЄМОЗВ'ЯЗКІВ ПАРАМЕТРІВ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ	18
РОЗДІЛ 3. ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ БУРОВИБУХОВИХ РОБІТ НА ПАРАМЕТРИ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ	22
3.1 Вивчення існуючих технологій буропідривних робіт для забезпечення необхідного гранулометричного складу порід	22
3.2 Аналіз програмного забезпечення для визначення оптимальної якості вибухової підготовки	28
3.3 Автоматизоване дослідження гранулометричного складу порід після вибуху	33
РОЗДІЛ 4. ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ГРАНУЛОМЕТРИЧНОГО СКЛАДУ ПОРІД НА ПРОДУКТИВНІСТЬ ЕКСКАВАТОРНО-АВТОМОБІЛЬНОГО КОМПЛЕКСУ	38
ВИСНОВКИ	46
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	48

ВСТУП

Сучасний розвиток гірничодобувної промисловості характеризується зростанням вимог до ефективності, екологічної безпеки та раціонального використання природних ресурсів. Зростання світового попиту на корисні копалини та виснаження легкодоступних родовищ стимулюють пошук нових підходів до видобутку, а також вдосконалення існуючих технологій. У цьому контексті екскаваторний спосіб розробки родовищ залишається одним із найбільш поширених та ефективних методів видобутку.

Екскаваторний спосіб дозволяє здійснювати масштабні гірничі роботи з високим рівнем механізації та автоматизації процесів. Проте сучасні гірничі підприємства стикаються з низкою викликів, пов'язаних із складністю гірничо-геологічних умов, необхідністю зниження витрат на видобуток та підвищенням вимог до екологічної безпеки. Це вимагає глибокого аналізу та оптимізації основних технологічних процесів, що супроводжують екскаваторний видобуток.

Актуальність даного дослідження обумовлена необхідністю підвищення ефективності гірничих робіт шляхом оптимізації взаємодії між технологічними процесами. Розуміння зв'язків між процесами розробки, навантаження, транспортування та відвалювання породи дозволяє не лише збільшити продуктивність, але й знизити експлуатаційні витрати та негативний вплив на навколишнє середовище.

Розробка крутоспадних залізрудних родовищ є однією з найбільш складних та технологічно вимогливих завдань у гірничодобувній промисловості. Крутоспадні залягання порід створюють додаткові труднощі при видобутку, такі як підвищений ризик обвалів, складність проведення гірничих робіт та необхідність використання спеціалізованого обладнання, особливо в робочій зоні нижніх горизонтів. Екскаваторний спосіб при таких умовах потребує особливої уваги до планування та координації

технологічних процесів, зокрема в стиснених гірничо-технічних умовах ведення відкритих гірничих робіт.

Сучасний стан гірничих робіт характеризується впровадженням новітніх технологій, таких як автоматизовані системи управління технікою, використання високопродуктивних екскаваторів та оптимізація логістичних схем. Проте без комплексного підходу до аналізу та вдосконалення всіх ланок технологічного ланцюга досягти максимального ефекту неможливо. Тому дослідження зв'язків між основними технологічними процесами є ключовим для подальшого розвитку галузі.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ МЕТОДИЧНИХ ПРИНЦИПІВ ОПТИМІЗАЦІЇ ПАРАМЕТРІВ ЕКСКАВАТОРНО-АВТОМОБІЛЬНИХ КОМПЛЕКСІВ

1.1 Принципи оптимізації параметрів екскаваторно-автомобільного комплексу

Розвиток оптимізації параметрів екскаваторно-автомобільних комплексів тісно пов'язаний з еволюцією гірничодобувної техніки та методів видобутку корисних копалин. Після Другої світової війни з розвитком дизельних та електричних екскаваторів, а також важких вантажівок, розпочався новий етап у розвитку екскаваторно-автомобільних комплексів. Вже у 1950-1960-х роках питання оптимізації параметрів таких комплексів набуло особливої актуальності, адже різноманітність типів техніки вимагала ретельного підходу до вибору оптимальних параметрів роботи. У цей період почали з'являтися перші математичні моделі та методи оптимізації роботи екскаваторів та транспорту. Основною задачею було забезпечення синхронності між об'ємом видобутої руди та можливостями її транспортування, що вимагало розробки нових підходів до управління процесом видобутку [1, 2].

У 1970-х роках, з початком впровадження комп'ютерних технологій у гірничодобувну галузь, оптимізація параметрів екскаваторно-автомобільних комплексів набула якісно нового рівня. Комп'ютерне моделювання дозволило значно підвищити точність розрахунків і швидкість прийняття рішень. Цей період ознаменувався активним використанням лінійного програмування для вирішення завдань планування та оптимізації роботи комплексів.

З 1980-х років наукові дослідження в області оптимізації гірничих робіт отримали новий імпульс завдяки стрімкому розвитку комп'ютерних технологій і математичного моделювання. Особлива увага почала приділятися розробці методів, які дозволяють враховувати складні

взаємозв'язки між технологічними процесами на відкритих гірничих роботах, включаючи роботу екскаваторно-автомобільних комплексів (ЕАК). У цей період було сформовано декілька ключових напрямків наукових досліджень, які вплинули на розвиток сучасної практики оптимізації. З 1980-х років почалося широке впровадження методів лінійного та нелінійного програмування для вирішення завдань гірничого планування. Роботи вчених того часу були зосереджені на пошуку оптимальних рішень щодо розміщення і руху екскаваторів та автомобілів в межах кар'єру, з урахуванням геометрії кар'єру, умов його розширення та обсягів виробництва. Дослідження показали, що лінійне програмування дозволяє оптимізувати маршрутні зв'язки автомобільного транспорту, але мало обмежений потенціал у складних, динамічних умовах видобутку. У цей період науковці розробляли перші моделі, які враховували динамічні зміни у гірничому виробництві [3, 4].

Також почали з'являтися перші спроби використання стохастичних моделей для вирішення проблем невизначеності в процесі видобутку, таких як зміна якості руди або непередбачувані простої техніки. Важливим етапом стало використання теорії ймовірностей та статистичних методів для прогнозування результатів гірничих операцій.

Впровадження комп'ютерних технологій в управління гірничими роботами дозволило науковцям працювати з великими обсягами даних та використовувати чисельні методи для оптимізації процесів. Системи автоматизованого проектування (САПР) стали важливим інструментом для планування гірничих робіт, дозволяючи моделювати різні сценарії видобутку і транспортування руди, а також виконувати складні розрахунки для оцінки ефективності роботи екскаваторів та автомобілів [5].

Однією з важливих подій стало застосування методів дискретної оптимізації, що дозволили створювати моделі для пошуку оптимальних рішень у розподілі ресурсів і техніки. Такі методи допомагали оцінювати

найкращі траєкторії руху техніки та мінімізувати витрати на перевезення руди при максимізації продуктивності [6, 7].

У 2000-х роках ГІС почали відігравати ключову роль в оптимізації екскаваторно-автомобільних комплексів. Ці системи дозволили інтегрувати географічні дані, моделі кар'єру та інформацію про технічний стан обладнання для створення комплексних моделей гірничих робіт. ГІС системи надають можливість візуалізувати роботу кар'єру у режимі реального часу, що дозволяє оперативно коригувати маршрути транспорту і план видобутку в залежності від поточних умов.

Крім того, розвиток систем управління в реальному часі дозволив підвищити ефективність взаємодії екскаваторів і автомобілів, мінімізуючи час простою техніки і покращуючи координацію робіт. Завдяки таким системам можна точно контролювати продуктивність екскаваторів, знижувати витрати пального і запобігати перевантаженню техніки [8].

З 2010-х років дослідження у сфері оптимізації гірничих робіт почали активно використовувати технології машинного навчання та аналізу великих даних. Ці підходи дозволяють системам самостійно вдосконалювати процеси видобутку, аналізуючи історичні дані про роботу техніки, геологію кар'єру і змінні виробничі умови. Алгоритми машинного навчання допомагають прогнозувати потреби у техніці, оцінювати ризики та ефективно розподіляти ресурси.

Великі дані дозволяють підвищити точність моделей, які використовуються для оптимізації параметрів ЕАК, зокрема шляхом аналізу взаємозв'язків між різними технологічними процесами. Це допомагає гірничодобувним підприємствам приймати більш обґрунтовані рішення щодо планування робіт та управління ресурсами [9, 10].

Оптимізація параметрів екскаваторно-автомобільного комплексу (ЕАК) є важливою складовою раціонального планування та ефективної організації гірничих робіт. Основна мета оптимізації полягає у досягненні

максимального продуктивного використання техніки при мінімізації витрат і забезпеченні стабільного постачання руди на збагачувальні підприємства.

Одним із ключових принципів оптимізації є забезпечення збалансованості між виробничою потужністю екскаваторів та пропускною здатністю автомобільного транспорту. Це досягається шляхом правильного підбору кількості та типу екскаваторів і автомобілів з урахуванням умов конкретного родовища, таких як відстань між робочими забоями і місцем складування руди, а також геометричні параметри кар'єру.

Ще одним важливим аспектом є мінімізація холостих пробігів автомобілів і простоїв екскаваторів, що безпосередньо впливає на економічну ефективність гірничих робіт. Це може бути досягнуто шляхом впровадження адаптивних систем управління транспортними потоками та оптимізації розміщення техніки в кар'єрі. Важливим інструментом є використання сучасних інформаційних технологій, які дозволяють у режимі реального часу контролювати роботу екскаваторів та автомобілів, швидко реагувати на відхилення від плану та оперативно коригувати завдання.

Також слід враховувати принцип гнучкості системи, що дозволяє адаптувати роботу ЕАК до змінних умов експлуатації, таких як коливання обсягів видобутку, погодні умови, технічний стан обладнання тощо. Використання математичних моделей та методів оптимізації дозволяє знаходити найбільш ефективні режими роботи комплексу, зокрема шляхом застосування генетичних алгоритмів для пошуку оптимальних рішень у складних умовах.

Мета оптимізації полягає в тому, щоб із можливих варіантів рішень вибрати найкращий за прийнятим критерієм у конкретних умовах. Оптимальним варіантом вважається той, у якому протягом планового періоду виконуються необхідні умови технологічного процесу, а значення функції досягає екстремуму, тобто найвищого результату за даних витрат або

заданого результату при мінімальних витратах. Оптимізація насамперед зводиться до вибору таких параметрів процесів, які мінімізують питомі витрати, але забезпечують необхідні вимоги щодо якості продукції. У зв'язку з цим, оптимізація параметрів технологічних комплексів кар'єру полягає у визначенні мінімуму сумарних питомих витрат на розробку для всієї технології та параметри кожного з процесів для застосовуваних технічних засобів з урахуванням фізико-механічних властивостей порід, що розробляються, які забезпечують оптимальні умови його експлуатації, а також технологічного обладнання, що при цьому використовується. Враховуючи широкий діапазон параметрів гірничих робіт в сучасних глибоких кар'єрах, набір обладнання також характеризується широким асортиментом (таблиця 1).

Таблиця 1.1 – Основне технологічне обладнання глибоких кар'єрів

Устаткування	Продуктивність обладнання, млн. т/рік		
	10	15	20
Бурові верстати	СБШ-250	СБШ-250; СБШ-320	СБШ-250; СБШ-320
Екскаватори	ЕКГ-8І, ЕКГ-10	ЕКГ-8І; ЕКГ-10, ЕКГ-12,5	ЕКГ-8І; ЕКГ-10; ЕКГ-12,5, ЕКГ-15
Автосамоскиди	БелАЗ-548	БелАЗ-549	БелАЗ-549; БелАЗ-7519
Дробарки	ЩЦП-1500х2100; КПД-1200/180	ЩЦП-1500х2100; КПД-1500/180	КПД-1500/180; КВКД-1200/200
Конвеєри: ширина, мм; швидкість, м/с	1400 2,5; 3,15	1600 2,5; 3,15	1600; 2000 2,5; 3,15
Потяги: зчіпна маса, т; думпкари, т	240 105	240 105	240 105
Відвальне обладнання	ЗШС-2000/60; ЕКГ-10; ЕКГ-12,5; ДЕТ-250	01ПС-2000/60; ЕКГ-10; ЕКГ-12,5; ДЕТ-250	ЗШС-2000/60; ЕКГ-10; ЕКГ-12,5; ДЕТ-250

На рисунку 1.1 наведені ілюстрації відповідного виймально-навантажувального обладнання.



А



Б



В



Г

Рис. 1.1 – Одноковшеві екскаватори, що застосовуються на глибоких потужних кар'єрах: а) ЕКГ-15; б) Komatsu PC-3150; в) Hitachi-EH-3600; г) P&H-4100 XPC

На рисунку 1.2 наведені ілюстрації поширеного гірничотранспортного обладнання.

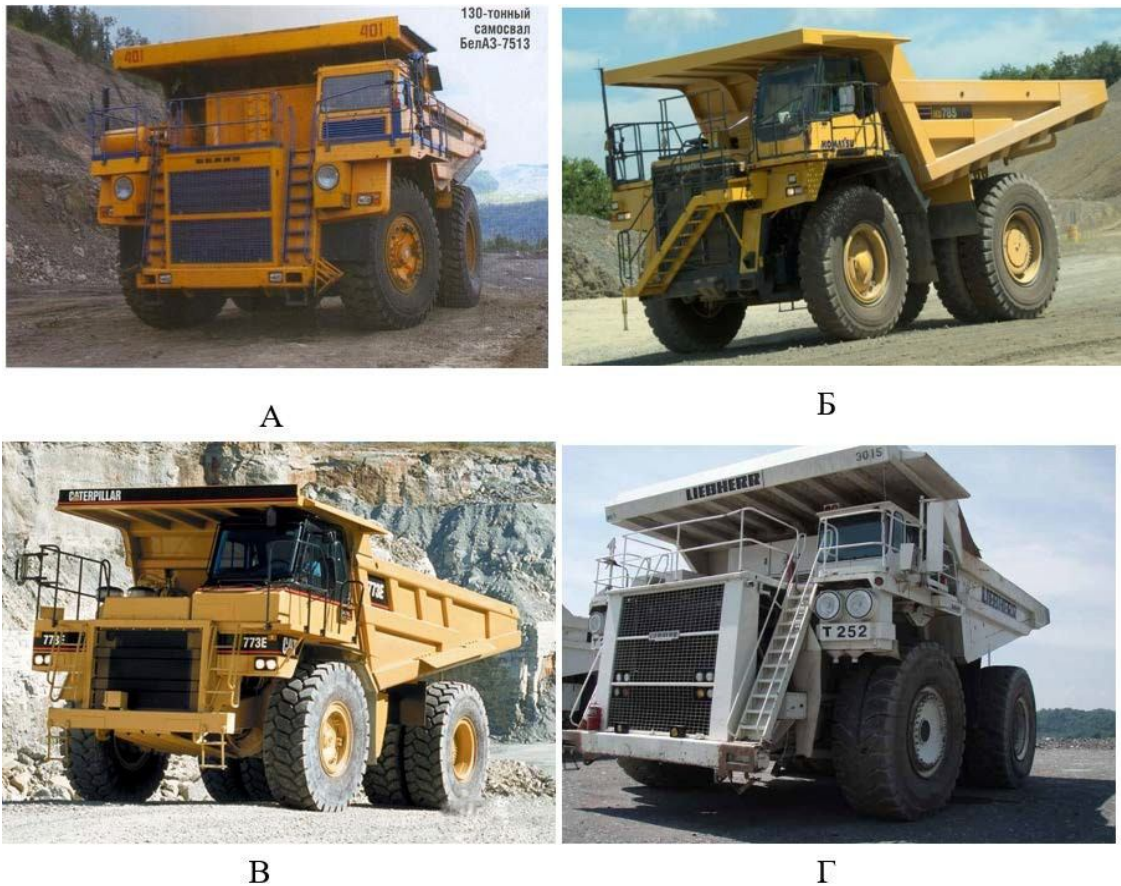


Рис. 1.2 – Автосамоскиди глибоких кар'єрів: а) БелАЗ-7513; б) Komatsu HD 1200; в) CAT-789D; г) Liebherr LTM1300

Побудовою графічної залежності зміни питомих витрат на розробку розкриття за кожним процесом застосовуваної технології (БВР, екскавацію, транспортування та відвалоутворення) від величини середньозваженого розміру куска підірваної розкривної породи, при підсумовуванні цих витрат, може бути визначена зона мінімуму загальних витрат. З іншого боку, величина середньозваженого розміру шматка підірваної розкривної породи визначає параметри кожного з процесів для технічних засобів, що застосовуються, з урахуванням фізико-механічних властивостей порід, які забезпечують оптимальні умови експлуатації всього комплексу [11-13].

Дослідженнями доведено, що цей параметр – величина середньозваженого розміру шматків підірваних розкривних порід - $D_{св}$

характеризує всю сукупність фракцій, гранулометричного складу підірваних порід [14] і визначає технологічні параметри БВР і, отже, витрати [15].

Інтенсифікація гірничих робіт на кар'єрах зазвичай здійснюється за рахунок застосування виймального обладнання великої одиничної потужності, зокрема екскаватор EX3600-6, що добре зарекомендував себе. У зв'язку з цим доцільно оцінити можливу експлуатаційну продуктивність екскаватора, що застосовується в кар'єрі, з урахуванням якості вибухового дроблення гірничої маси. Такий розрахунок експлуатаційної продуктивності відрізняється від результатів за загальноприйнятими методиками [16-17] та більшою мірою відповідає умовам експлуатації обладнання. Для процесу екскавації гранулометричний склад порід, що розробляються, також є визначальним. Від кусковатості підірваних порід залежить продуктивність екскаватора, а точніше величина коефіцієнта екскавації та час, що витрачається на набір ковша (при достатній висоті уступу), і продуктивність визначає величину витрат за процесом [8].

Раніше проведені дослідження за ступенем впливу кусковатості підірваних порід на продуктивність екскаватора об'єктом дослідження визначили сучасні потужні гідравлічні екскаватори [6, 8, 18]. Для корінних порід рудних кар'єрів величина середньої природної окремоті в масиві практично завжди менша від розрахункового значення розміру негабариту, проте, без БВР вести гірничі роботи не можна. Отже, традиційний підхід визначення продуктивності екскаватора в залежності від виходу великих фракцій підірваної породи в нашому випадку навряд чи є доцільним.

В умовах продуктивність транспортних засобів переважно залежить від організацій виймально-навантажувальних робіт, а якість підірваної гірничої маси впливає у вигляді зміни часу навантаження автосамоскида. Кускуватість підірваних порід, насамперед, впливає на час набору ковша, ступінь завантаженості автосамоскида і, як наслідок, визначає витрата палива. У цьому ступінь завантаженості автосамоскида безпосередньо

залежить від кусковатості порід, а визначається під час навантаження. Природно, що перевантаження – це, з одного боку, помилка машиніста екскаваторника, а з іншого – неправильний вибір місткості ковша екскаватора. При прийнятій на кар'єрах схемі організації виймально-навантажувальних робіт, ефективність автотранспорту багато в чому залежить від часу навантаження автосамоскида.

Якість підірваної гірничої маси на процес відвалування впливає опосередковано, залежно від продуктивності екскаватора та транспортних засобів, т.к. ці процеси визначає кількість породи, що укладається у відвал. Економічні витрати на процес встановлюються відповідно до продуктивності екскаваторно-автомобільного комплексу, прийнятої технологією відвалоутворення та застосовуваними на підприємстві технічними засобами (бульдозерами).

Таким чином, основний принцип оптимізації полягає в тому, що побудовою графічної залежності зміни питомих витрат на розробку розкриву по кожному процесу застосовуваної технології (БВР, екскавацію, транспортування та відвалоутворення) від величини середньозваженого розміру куски підірваної породи, при підсумовуванні цих витрат, може бути визначено зону мінімуму сумарних витрат. Це дозволяє встановити оптимальні параметри кожного з процесів для застосовуваних технічних засобів з урахуванням фізико-механічних властивостей порід, що розробляються, які забезпечують мінімум питомих витрат для всієї технології.

1.2 Методичні основи оптимізації параметрів екскаваторно-автомобільних комплексів

Будь-яке наукове дослідження, зокрема й щодо оптимізації параметрів технологічних процесів відкритих гірничих робіт являє собою

інформаційний процес, який можна подати у вигляді логічного ланцюжка: збір вихідної (первинної) інформації, аналіз та переробка цієї інформації відповідно до логіки та методології дослідження та збирання (отримання) нової недостатньої інформації для реалізації прийнятої логіки процесу дослідження.

Методологія роботи як сукупність методів, закономірностей, критеріїв, що характеризують основні процеси досліджуваної технології, пропонує розглядати загальнотеоретичні аспекти, що базуються на досягненнях науки в цілому. Це означає, що в процесі дослідження слід спиратися на раніше проведені роботи вітчизняних та зарубіжних вчених, присвячених подібним проблемам або окремим розділам досліджень, що проводяться. Методологія повинна ґрунтуватися на визначальних теоретичних положеннях, фундаментальних розробках та результатах та вже відомих закономірностях, базуватися на виділенні та обліку особливих тенденцій, закономірностей та факторів. Критерієм достовірності дослідження є системний підхід до аналізу предмета дослідження та різні статистичні методи: порівняльний аналіз, метод екстраполяції тощо.

До кожного процесу, що становить досліджувану технологію, розглянемо існуючий і відповідний проголошеним принципам дослідження науково-методичний апарат, тобто частина загальної теорії у вигляді арсеналу процедурних знань, основними елементами яких є методи, алгоритми, методики, імітаційні моделі, технології вирішення наукових та практичних завдань.

РОЗДІЛ 2. ВСТАНОВЛЕННЯ ВЗАЄМОЗВ'ЯЗКІВ ПАРАМЕТРІВ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ

Питання оптимізації параметрів екскаваторно-автомобільних комплексів проводилися неодноразово та відроджувалися, у міру розвитку та вдосконалення основних процесів та механічного обладнання, що застосовується на кар'єрах. Головне питання, що потребує вирішення при оптимізації – це вплив гірничо-технічних умов на продуктивність головної машини (з огляду на зміни її конструкції, форми та місткості ковша тощо), що визначає продуктивність технологічної схеми та величину питомих витрат. Використання на залізородних кар'єрах Кривбасу екскаваторів типу ЕКГ, якісно змінило діапазон впливу вихідних даних, тобто гірничо-технічних умов на параметри процесів екскаваторно-автомобільних комплексів.

Узагальнення матеріалів та дослідження зміни головного параметра процесу буровибухової підготовки порід до виїмки питомої витрати ВР залежно від щільності порід, їх властивостей міцності (коефіцієнта міцності за шкалою проф. М.М. Протодияконова, а також тріщини і блочності вибухових порід), дозволило встановити взаємозв'язки гірничотехнічних факторів і параметрів екскаваторно-автотранспортного комплексу (рис. 2.1). Головними факторами, які характеризують фізико-механічні властивості порід, що розробляються і визначальні параметри екскаваторно-автотранспортного комплексу є: щільність порід - ρ , їх пористість - m , коефіцієнт міцності за шкалою проф. М.М. Протодияконова - f , а також коефіцієнт тріщинуватості - K_t і блочність вибухових порід, яка оцінюється за величиною e - діаметру середньої природної окремої вибухового блоку розкривних порід.

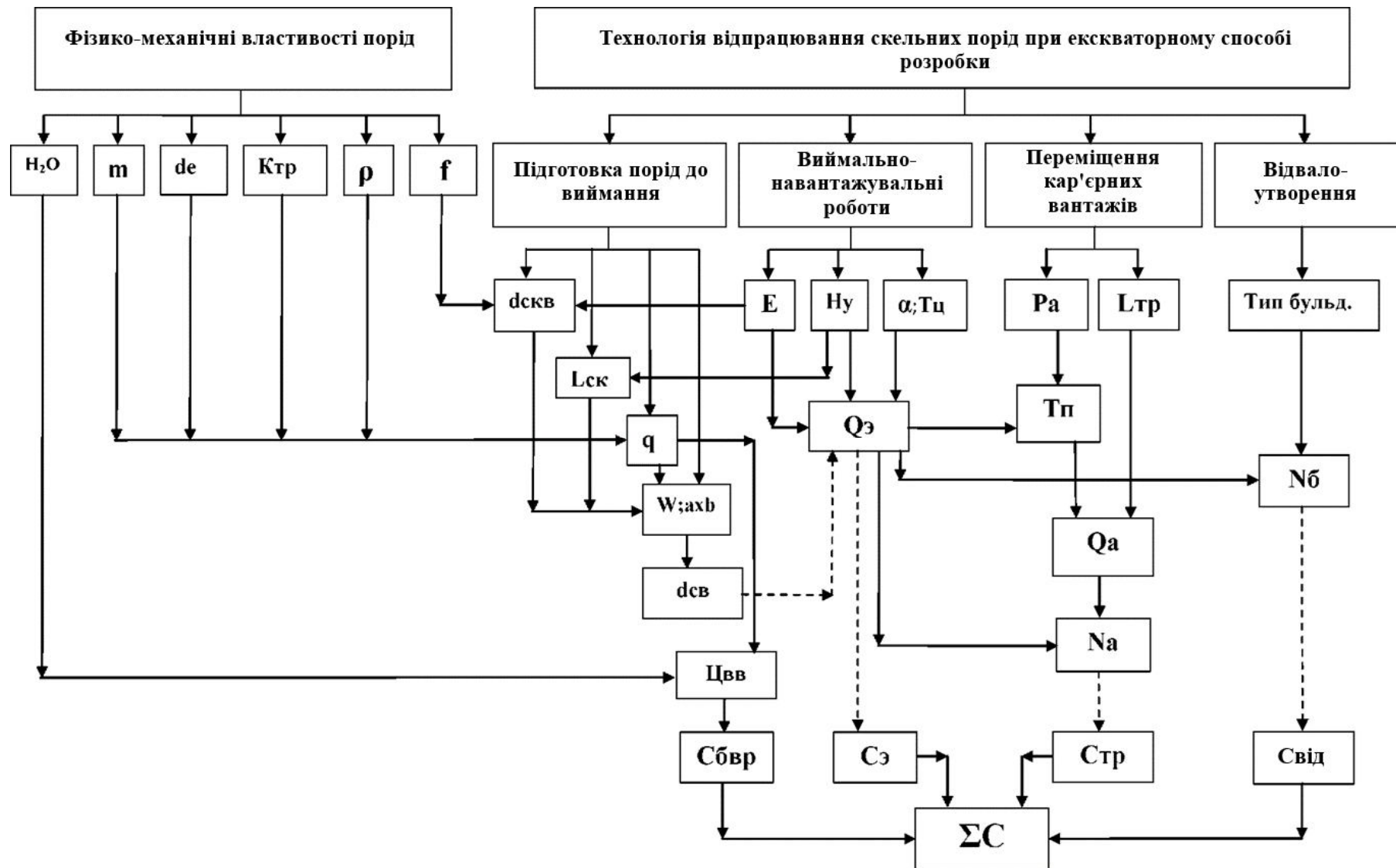


Рис. 2.1 – Взаємозв'язки гірничотехнічних факторів та параметрів процесів технології відкритих гірничих робіт

Ці параметри використовуються у аналітичних розрахунках і сучасному програмному забезпеченні для визначення параметрів БВР та кусковатості підірваної гірської маси. На схемі показано стрілкою, що саме їх величина визначає питому витрату ВР - q , сітку свердловин (a, b, w) і $d_{св}$ - середньозважений розмір кусків підірваних порід і продуктивність екскаватора Q_e .

Параметр, позначений на рис. 2.1 як H_2O безпосередньо не включений до зазначеної методики, але він характеризує ступінь обводненості вибухового масиву і визначає тип ВР, які (з урахуванням необхідної бризантності ВР) впливає на витрати по цьому процесу - Цвв.

Якщо характеризувати основні процеси досліджуваної технології, то основним вважатимуться процес буровибухової підготовки порід до виїмки. Він може бути охарактеризований такими параметрами, як $d_{скв}$ - діаметр свердловин, $L_{скв}$ - глибина свердловини і ще такими параметрами, які згадані вище ($q, a, w, w, d_{св}$).

Процес екскавації характеризується такими параметрами, як E - місткість ковша екскаватора, H_y - висота уступу, що розробляється, T_c - часом циклу екскаватора при відповідній організації робіт (α - кут повороту екскаватора при завантаженні), які впливають на продуктивність екскаватора - Q_e і витрати на процес. Саме їх зміна в залежності від середньозваженого розміру кусків підірваних порід дозволить встановити мінімум сумарних витрат за технологією та її оптимальні параметри.

Крім того, величина Q_e пов'язана і визначає основні параметри наступного процесу - переміщення кар'єрних вантажів, впливаючи на T_p - час навантаження одного автосамоскида і N_a - кількість автосамоскидів. З іншого боку кількість автосамоскидів залежить від Q_a - продуктивності одного автосамоскида, а вона визначається його вантажопідйомністю P_a , відстанню транспортування $L_{тр}$ і, знову ж таки, T_p , яка також залежить від неї і визначають витрати на автотранспорт - $C_{тр}$.

Процес відвалоутворення та витрати на процес - $C_{\text{від}}$ безпосередньо залежить від Q_e , т.к. визначають кількість бульдозерів при прийнятій системі організації процесу.

Таким чином, відповідно до прийнятої побудови роботи, можна визначити в залежності від величини \bar{V} - середньозваженого розміру кусків підірваної гірської маси як окремі витрати по основним процесам: підготовка порід до виймання $C_{\text{бвр}}$, виймка та навантаження C_e , переміщення кар'єрних вантажів $C_{\text{тр}}$, відвалування C_t , і $\sum C$ - сумарні витрати з технології загалом. Встановивши їх мінімальне значення і відповідне значення величини $d_{\text{св}}$, «зворотнім ходом» можна визначити параметри кожного з процесів, які забезпечують мінімальні витрати даної технології в прийнятих до розрахунку гірничо-технічних умовах експлуатації комплексу.

Суцільними лініями на схемі зображені стрілки взаємозв'язку параметрів процесів і гірничо-технічних умов математичні залежності між якими можна вважати встановленими, а пунктирними лініями показані ті взаємозв'язки, які для реалізації поставленої в роботі мети слід встановити. Головною та найбільш трудомісткою з них є залежність зміни продуктивності екскаватора від кусковатості підірваних порід.

РОЗДІЛ 3. ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ БУРОВИБУХОВИХ РОБІТ НА ПАРАМЕТРИ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ

3.1 Вивчення існуючих технологій буропідривних робіт для забезпечення необхідного гранулометричного складу порід

Перший та основний виробничий процес оптимізованої технології – підготовка порід до виймання, а у випадку крутоспадних родовищ Кривбасу – це фактично буропідривні роботи. Цей процес досить добре вивчений [23-25], постійно вдосконалюється, але його можливості досить обширні. Відповідно до прийнятих принципів дослідження акцентуємо увагу на методах регулювання та наукового обґрунтування кускуватості підірваних гірських порід.

Одним із методів регулювання кускуватості є короткосповільнене підривання (КСП). Під КСП розуміється почергове підривання зарядів або групи зарядів вибухових речовин (ВР) з таким малими уповільненнями за часом спрацювання, при яких вдається використовувати залишкові напруги і додаткові оголені поверхні, викликані в масиві вибухом попереднього заряду (або групи зарядів) [26-27]. КСП застосовується для:

- зниження сейсмічного ефекту вибуху;
- поліпшення ступеня дроблення гірничої маси та зменшення виходу негабариту;
- збільшення виходу гірничої маси з одиниці довжини свердловини та зменшення витрати ВР;
- зменшення ширини, зміни напрямку або форми розвалу підірваної гірничої маси;
- для зменшення розмірів зон заколів, макротріщин та мікротріщин, а також збільшення кута укосу уступу;
- для забезпечення гарного опрацювання опору підшоною уступу при багаторядному розташуванні свердловинних зарядів ВР.

Поліпшення дроблення гірських порід при КСП досягається за рахунок

подовження періоду дії вибуху на масив, утворення додаткових відкритих поверхонь, зіткнення гірських порід під час вибуху та меншої невирішеності тильної частини масиву порівняно з миттєвим підриванням.

Вибух у затиснутому середовищі – метод ведення вибухових робіт, при якому завдяки наявності перешкод (підірвана гірська маса або цілик) зменшується бічне зміщення вибухового масиву в період руйнування, що сприяє збільшенню тривалості дії вибуху на масив і, як наслідок, поліпшенню дроблення порід [23-28]. Ефективність методу підривання в затиснутому середовищі проявляється тільки при багаторядному КСП та наявності не менше чотирьох-п'яти рядів свердловин. Однак, у всіх варіантах завдяки підпірній стінці і меншій швидкості зміщення, тривалістю дії вибуху на середовище підвищується коефіцієнт корисного використання енергії вибуху. У цьому полягає фізична сутність підривання у затиснутому середовищі.

Можливо внаслідок здвоювання або зтроювання уступів суміжних горизонтів, коли загальна глибина свердловини досягає 45 м, і підривання свердловинних набоїв на всю висоту поєднаних уступів. Крім того, виходячи з умови, що на інтенсивність руйнування вибухом гірських порід поряд з напругою, впливає тривалість дії вибухового імпульсу на середовище, що руйнується, було досліджено вплив висоти уступу (довжини колонки заряду) на основні фізичні фактори руйнування порід вибухом (залежність тривалості дії вибухового імпульсу від висоти уступу) [25]. Переваги підривання високих (здвоєних) уступів:

- забезпечення великих запасів підірваної гірничої маси за нестачі робочих берм;
- скорочення обсягу бурових робіт внаслідок зменшення перебудів: при суміщенні n уступів число перебудів \sim скорочується на $n-1$, зменшується обсяг буріння;
- скорочення витрат на з'єднання зарядів на поверхні;

- скорочення витрати обсадних труб;
- скорочення числа переїздів верстата від свердловини до свердловини;
- підвищення продуктивності вантажно-транспортного обладнання на збиранні підірваної гірничої маси.

Додаткову ефективність БВР можна досягти при застосуванні паралельно-зближених зарядів. Це пояснюється тим, що при цьому методі підривання вже в безпосередній близькості від зарядів на відстанях, що становлять біля відстані між зарядами в парі циліндричні фронти хвилі напруг першого і другого зарядів починають взаємодіяти, формуючи при цьому плоский фронт. З метою збільшення енергії свердловинних зарядів ВР, особливо для якісного дроблення та опрацювання підошвенної частини високих уступів може бути впроваджений метод підривання паралельно зближеними свердловинними зарядами. Сутність методу полягає у наступному. Обурення вибухового уступу проводиться групами з декількох вертикальних або похилих свердловин, розташованих паралельно один до одного на відстані шести діаметрів заряду один від одного [29]. Розташовуються паралельно зближені заряди в одну лінію (парно зближені) або у вигляді пучка з трьох (у вершинах рівностороннього трикутника) і більше свердловин (квадрат, еліпс та ін форми). Орієнтовані пучок або пара паралельно-зближених зарядів паралельно лінії уступу. Таким чином, формується еквівалентний заряд ВР великого діаметра, який збільшує ефективність вибухових робіт. З переходом на такий метод підривання є можливими при обмеженому виборі діаметрів зарядів (215, 250, 270 мм) утворювати за допомогою бурових верстатів, що є на підприємстві, паралельно-зближені свердловинні заряди, що імітують заряд необхідного діаметра і енергії ВР [24, 30].

Одним із сучасних методів регулювання дроблення гірських порід вибухом є забійка, яка служить для утримання продуктів вибуху в зарядній

порожнині.

Основні призначення набійки:

- запобігає хімічним втратам у процесі детонації промислових ВР;
- сприяє повноті детонації та вивільняє максимальну частку потенційної енергії промислових ВР;
- керує геометричним розміром розвалу підірваної гірничої маси вибухом промислових ВР;
- знижує вихід негабаритних шматків підірваної гірничої маси;
- керує дробленням гірських порід за висотою уступу;
- знижує ударно-повітряну хвилю, що утворюється під дією детонаційної хвилі вибуху заряду ВР;
- збільшує ККД енергії вибуху;
- збільшує розміри зон ослаблення гірничого масиву;
- сприяє зменшенню кількості отруйних газів у продуктах вибуху.

Довжина набійки має бути такою, щоб витікання через тріщини в стінках свердловини не перевищували витік через набійку. Подальше збільшення довжини набійки не доцільно, це не позначається на покращенні дроблення, оскільки основні витіки відбуваються через стінки свердловини. Так як зі збільшенням довжини набійки верхня частина уступу виявляється віддаленою від заряду і погано дробиться, довжину набійки слід приймати такою, щоб величина витіку продуктів вибуху через набій не перевищувала витіків через стінки свердловин.

При виборі типу ВР необхідно враховувати фізико-механічні властивості гірських порід, обводненість вибоїв і необхідну механізацію заряджання свердловин. Застосування ВР з існуючого асортименту найбільш повно відповідає вимогам розтягування дії вибухового імпульсу в процесі вибуху одного заряду та регулювання об'ємної концентрації енергії ВР.

Одним із сучасних методів регулювання дроблення гірських порід вибухом є конструкція заряду та форма, яка значно впливає на тривалість дії

вибухового імпульсу на середовище. Роботами [31-32] доведено, що у разі застосування розосередженого заряду з повітряним проміжком відбувається запирання продуктів детонації основного заряду. Це призводить до подовження впливу вибуху на масив. В даний час, можуть бути широко рекомендовані конструкції зарядів з повітряними проміжками між зарядами, а також між зарядом і набійкою [30-32]. Розподіл заряду та застосування укорочених свердловин дозволило зменшити розвал гірської маси, збільшити вихід кондиційних 0-700 мм на 8-10%, знизити вихід негабариту з 18 до 8-10%, зменшити середній діаметр куска і тим самим збільшити ступінь дроблення на 30-32%. Збільшення ступеня дроблення дало можливість на 20-25% збільшити продуктивність дробарок та екскаваторів та на 30% знизити витрати на вторинне дроблення. В даний час підривання гірських порід похилими свердловинними зарядами широко застосовуються на відкритих гірничих роботах.

Переваги методу відбійки гірських порід похилими свердловинними зарядами полягають у наступному:

- забезпечує поліпшення якості дроблення масиву та більш повне опрацювання підшви;
- рахунок рівномірного розподілу енергії вибуху за висотою уступу в похилих свердловинах, дає можливість збільшення ЛОПП і відстані між рядами і зменшення глибини перебуру проти вертикальних свердловин.

Наведений вище науково-методичний апарат багаторазово використовувався рядом науковців для вирішення оптимізаційних завдань у конкретних гірничо-технічних умовах роботи екскаваторно-автотранспортного комплексу. Зокрема у роботах [29] визначався гранулометричний склад для умов для застосування екскаваторів ЕКГ- 6,3УС та ЕКГ-8І на Житикаринському кар'єрі в Казахстані та ступеня його впливу на час циклу та коефіцієнти розпушення порід та наповнення ковша.

В роботі [28] виходячи з експериментальних досліджень на

Гіннівському кар'єрі ВАТ «Північний ГЗК» визначалася ефективність дроблення гірничої маси як критерій ефективності роботи всього підприємства. Встановлено формулу для визначення змінної продуктивності екскаватора ЕКГ-10 в комплексі з автосамоскидами БЕЛАЗ вантажопідйомністю 130 т. При середній витраті вибухових речовин 0,89 кг/м передбачали середній вихід негабариту 2,1 %.

У роботі [33] автори, критикують спосіб прогнозування кусковатості методом створення класифікацій гірських порід за вибухом, в яких гірські породи підрозділялися на групи (категорії) по одному з впливових факторів. І тут у межах однієї категорії вплив класифікаційної ознаки на кускуватість, на думку авторів, нівелюється і превалює вплив іншого чинника. Особливо часто це проявляється для окремо взятого гірничого підприємства – на кожному з них є своя класифікація гірських порід за вибуховістю, в якій для кожної категорії порід дослідним шляхом встановлено раціональну питому витрату вибухових речовин, що застосовуються, що задовольняє їх вимогам до якості дроблення гірських порід. Авторі рекомендують свою класифікацію по подрібнюваності вибухом, яка представлена в табл. 3.1.

Таблиця 3.1 – Класифікація порід за дробимістю вибухом

Категорія порід	Міцність	Питома витрата, кг/м куб	Щільність, г/см куб	Вміст у масиві окремоостей, %		Середн. відст. між тріщинами, м	Розмір очік. середнього куска в розвалі, м
				Понад 500	Понад 1500		
1	20	0,277	1,4-1,9	0-2	0	0,08-0,12	0,08-0,12
2	50	0,551	2,00-2,35	2-15	0	0,13-0,16	0,13-0,16
3	80	0,785	2,4-2,8	10-50	0-1	0,16-0,19	0,16-0,19
4	110	0,997	2,85-2,9	75-95	2-10	0,20-0,23	0,20-0,23
5	140	1,194	2,95-3,05	90-100	10-15	0,23-0,25	0,23-0,25
6	170	1,381	3,05-3,2	100	20-45	0,25-0,27	0,25-0,27
7	200	1,561	3,2-3,3	100	40-60	0,28-0,3	0,28-0,3
8	230	1,733	3,3-3,4	100	45-65	0,3-0,33	0,3-0,33
9	260	1,899	3,4-3,5	100	60-80	0,34-0,36	0,34-0,36
10	290	2,062	3,5-3,6	100	70-90	0,37-0,39	0,37-0,39
11	320	2,220	>3,6	100	90-100	0,39-0,42	0,39-0,42

На основі цієї класифікації гірських порід по дробності була

розроблена та запропонована формула для розрахунку середнього розміру куска в розвалі порід:

$$D_{cp} = (K \cdot D_{cp}^{0,61} \cdot f^{0,2} \cdot \Delta^{0,25}) : (Q_{BB}^{0,75} \cdot q), \text{ мм} \quad (3.1)$$

де K - розмірний коефіцієнт, який залежить від міцності порід, кДж/кг;

D_{cp} - середній розмір блоку в масиві порід, м;

f - коефіцієнт міцності порід за М.М. Протодіяконову;

Δ - щільність заряджання, кг/м³ ;

$Q_{вр}$ - теплота вибуху (енергія) ВР, кДж/кг;

q - питома витрата ВР, кг/м³ .

Формула дозволяє встановити залежність зміни середньозваженого розміру куска від питомої витрати ВР у певних гірничо-геологічних умовах кар'єру.

Розроблено алгоритм оптимізації параметрів буропідричних робіт, який передбачає використання похилих свердловин для перших двох рядів та дає можливість розрахувати параметри БВР для досягнення необхідної якості дроблення у гірничотехнічних умовах конкретного кар'єру [34]. Маючи вхідні дані щодо властивостей породи, характеристик ВР і бурового обладнання, можна розрахувати оптимальну сітку свердловин. Очевидно, що не обов'язково розраховані за цим алгоритмом параметри забезпечать оптимальні умови роботи всієї технології відкритих гірничих робіт. Дана публікація скоріше цікава своєю оцінкою існуючих закономірностей енергетичного руйнування гірських порід, запропонованих для механічного дроблення матеріалу.

3.2 Аналіз програмного забезпечення для визначення оптимальної якості вибухової підготовки

Створений науковий доробок з питань буропідривного розпушування гірських порід дозволив комплексно поєднати розрахункові залежності визначення кусковатості підірваних порід і параметрів БВР, причому реалізований цей комплекс з урахуванням сучасних комп'ютерних технологій. Для ефективного ведення БВР необхідно мати максимально повну інформацію про геологічну будову масиву, що підривається. Одним із способів отримання додаткових відомостей про структуру та властивості міцності масиву гірських порід є використання даних, одержуваних з бурових верстатів безпосередньо в процесі буріння вибухових свердловин [35]. Такий спосіб, реалізований у програмно-технічному комплексі «Blast Maker» (ПТК «Blast Maker») привабливий тим, що не порушує існуючу технологію проведення робіт на кар'єрі і не вимагає додаткових витрат на проведення геологічних досліджень. Одночасно стає можливим автоматичний збір та накопичення об'єктивної виробничої інформації по кожному буровому верстату та екіпажу (пробурені метри та свердловини, продуктивно витрачений час і час на очікування та виконання ремонту, заправки або техобслуговування, витрата палива, використання шарошок та застосовувані режими буріння та інші відомості). Безперервний збір та концентрація одержуваних даних в єдиній інформаційній базі дозволяє враховувати фактичні властивості масиву гірських порід та стежити за динамікою їх зміни, аналізувати виробничу діяльність бурового цеху та суміжних з ним підрозділів, оперативно планувати та оптимізувати гірничі роботи та в результаті знижувати їх собівартість.

Пакет САПР БВР «Blast Maker» забезпечує оперативність створення багатоваріантних проектних рішень масового вибуху та вибір найбільш оптимального з них в умовах високої інтенсивності гірничих робіт. Використання САПР БВР дозволяє враховувати геометрію блоку та властивості міцності складових порід, а також раціонально розподіляти свердловинні заряди для ефективного руйнування масиву. При цьому

створення проекту на буріння проводиться на основі прогнозних значень про властивості міцності порід вибухового блоку, а створення проекту на вибух проводиться по фактично пробуреним свердловин і за даними про характеристики міцності порід, отриманих в процесі буріння цих свердловин.

Пакет САПР БВР складається із набору модулів, обмін інформацією між якими здійснюється через єдину базу даних. Пакет поєднує в собі цифрову модель родовища, математичну модель взаємодії заряду з середовищем, засоби обробки інформації про масив і засоби, що забезпечують підготовку необхідної проектної документації для виробництва масових вибухів. Цифрова модель родовища є інформаційною основою пакету, що акумулює основні геометричні, технологічні та фізико-механічні властивості гірського масиву в кар'єрі. Інформаційне наповнення бази даних пакету САПР БВР здійснюється на основі:

- проектної геологічної інформації, отриманої під час розвідувального буріння;
- уточнюючих геологічних даних під час експлуатаційного буріння;
- даних про енергетичні параметри буріння свердловин на вибухових блоках;
- експертних висновків про фактично здійснені вибухи на розрізі.

Застосування пакету САПР БВР у процесі впровадження та експлуатації комплексу здійснюється поетапно

На етапі первинної підготовки даних здійснюється введення до бази даних отриманих від відповідних служб гірничодобувного підприємства відомостей про геометрію та геологічну структуру розрізу.

На основі цифрової моделі рельєфу, що надається маркшейдерською службою підприємства в одному з цифрових форматів (AutoCAD та ін) у пакеті САПР БВР створюється модель рельєфу.

До цієї моделі здійснюється прив'язка інформації від геологічних служб підприємства (на першому етапі) та даних про енергоємність буріння блоків (на наступних етапах) для виділення областей з різними типами порід. Після цього з'являється можливість здійснювати автоматизоване проектування бурових робіт.

При розробці проекту на буріння проводиться розрахунок сіток свердловин та компоновання схеми розміщення свердловинних зарядів у межах проектованого блоку з урахуванням його прогнозованих властивостей міцності.

Результатом роботи є комплект технічної документації (паспорт на буріння, графічна схема збурення блоку, технічний розрахунок і т.д.), що відображає набір координат і глибин проектних свердловин, які при заданих параметрах зарядів забезпечують якісне опрацювання підосви і оптимальне насичення енергією ВВ, що вибухає.

На наступних етапах геометрія розрізу, що змінюється в процесі розробки родовища, повинна постійно і своєчасно оновлюватися в базі даних за інформацією, що надається маркшейдерською службою підприємства.

На другому етапі, в процесі експлуатації комплексу, системою збору даних ПТК проводиться безперервна реєстрація та обробка параметрів буріння на кожному з елементарних відрізків (порядку 0,1 м) свердловин у прив'язці до їх глибин та до тривимірних координат усть свердловин. За даними, одержуваним у процесі буріння свердловин і зареєстрованим у базі даних системи «Кобус», автоматично розраховується розподіл питомої енергоємності буріння та пов'язаних з нею фізико-механічних характеристик гірських порід - міцності, буримості, вибуховості за об'ємом блоків. На цьому етапі, після завершення збурення блоку та отримання від маркшейдерської служби додаткових фактичних даних про обсіпання та обводненої пробурених свердловин, з'являється можливість створення проекту на вибух.

Проектування та підготовка документації для проведення масового вибуху з використанням системи «Blast Maker» включає послідовне виконання наступних стадій:

1. Розробка проекту на буріння на основі прогностичних значень про властивості міцності порід вибухового блоку.
2. Підготовка проекту на вибух за фактично пробуреними свердловинами та даними вимірювань характеристик міцності складових порід.

У процесі розробки проекту на буріння проводиться компонування схеми розміщення свердловинних зарядів у межах вибухового блоку з урахуванням його властивостей міцності. розрахунок параметрів сіток свердловин для областей з різними типами порід базується на інформації від геологічних служб кар'єру, а також даних про енергоємність буріння вищележачих і сусідніх блоків. Результатом проекту є список координат і глибин свердловин, які при заданих типах ВВ забезпечують опрацювання підосви і необхідний гранулометричний склад підірваної гірської маси. Загалом, через структурні неоднорідності масиву, проектні свердловини можуть розташовуватися у вузлах нерегулярної сітки зі змінним кроком.

Підготовка проекту на вибух здійснюється на основі фактичних даних про координати та глибини пробурених свердловин. За результатами вимірювань, що виконуються після завершення збурення блоку, проводиться коригувальний розрахунок характеристик свердловинних зарядів (тип ВР, маса та конструкція заряду) з метою досягнення прийнятної якості вибуху по середньому виходу кондиційних шматків заданого розміру.

Основним принципом проектування параметрів масового вибуху в системі «Blast Maker» є максимально можливе використання об'єму свердловин для розміщення зарядів. Як базові параметри під час виконання розрахунків служать питомі витрати ВР всім типів порід блоку, які

забезпечують гарантоване дроблення одиничних обсягів гірничої маси до необхідного розміру окремоостей.

Залежно від отриманої питомої витрати ВР і діаметра свердловин, визначаються параметри розташування і характеристики свердловинних зарядів для окремих ділянок вибухового блоку з різними властивостями порід.

Розроблена та ефективно застосовується на кар'єрах геоінформаційна система K-MINE [36, 37]. Пропонований в системі модуль проектування і моделювання буро-підривних робіт в повній мірі забезпечує потреби гірничих інженерів-підривників, оскільки «... до складу модуля входить ряд процедур, що дозволяють значно полегшити та прискорити процес проектування свердловин. При цьому враховуються фізико-механічні властивості порід, технологія підривання, параметри зарядів та комутації блоків» [37].

Даний блок геоінформаційної системи дає змогу автоматизувати типові розрахунки при проектуванні масових вибухів і може бути корисним для лабораторій і технічних відділів гірничодобувних підприємств, що займаються розробкою паспортів на виконання вибухів, включаючи проектування конструкції зарядів, розміщення вибухових свердловин і комутації вибухової мережі.

3.3 Автоматизоване дослідження гранулометричного складу порід після вибуху

Для оцінки якості виконаних буровибухових робіт важливо точно визначити гранулометричний склад порід, що утворилися в результаті вибуху. Цей показник є ключовим, оскільки він безпосередньо впливає на подальші етапи обробки та транспортування матеріалу, а також на

економічну ефективність усього процесу видобутку. Визначення гранулометричного складу може бути проведено за допомогою різноманітних програмних інструментів, які дозволяють провести детальний аналіз розподілу розмірів часток породи. Використання таких інструментів надає можливість з високою точністю оцінити структуру фрагментів і, як наслідок, забезпечити відповідність результатів буровибухових робіт поставленим вимогам.

Окрім перелічених вище, відомий ряд інших спеціалізованих програмних рішень для аналізу гранулометричного складу порід після буровибухових робіт:

1) Split-Desktop – програма для аналізу фрагментації порід на основі обробки цифрових зображень. Вона дозволяє точно визначати розміри часток та фрагментів порід безпосередньо на місці вибуху.

2) WipFrag – інструмент для аналізу розмірів часток порід із використанням фотографій. Підходить для швидкого отримання результатів в умовах кар'єрів та шахт, забезпечує високу точність завдяки алгоритмам розпізнавання форм.

3) FRAGLYTICS – програмне забезпечення, що застосовується для аналізу фрагментації матеріалів у гірничій справі. Дає змогу проводити автоматизовану обробку зображень і визначати розподіл розмірів часток.

4) IPACS – комплексна система, яка забезпечує аналіз і контроль гранулометричного складу матеріалу в режимі реального часу. Широко використовується на переробних підприємствах для моніторингу процесу подрібнення.

Розглянемо програмний функціонал ГІС K-Mine більш детально. Програмний модуль «Гранулометричний склад» у K-MINE надає широкий набір інструментів для аналізу якості буровибухових робіт через оцінку розміру часток гірської маси. Це рішення дозволяє детально вивчати фрагментацію порід, що виникає після вибухів, і коригувати параметри для

покращення ефективності.

Основні можливості модуля включають:

1) Модуль надає засоби для визначення розподілу розмірів часток гірської маси після буровибухових робіт. Результати такого аналізу дозволяють оцінювати відповідність розмірів породи запланованим параметрам, що сприяє коригуванню подальших робіт.

2) Програмне забезпечення здатне аналізувати фотографії, отримані з дронів, для визначення фракційного складу порід на різних ділянках, включаючи важкодоступні зони (рис. 3.1). Це підвищує точність вимірювань гранулометричного складу.



Рис. 3.1 – Аналіз фотографій розвалу підірваної гірничої маси з дронів [37]

3) Результати аналізу зберігаються в базі даних, що дозволяє відстежувати зміни в розподілі фракцій з часом та проводити аналіз тенденцій у проведених буровибухових роботах.

4) Інструмент підтримує автоматичні алгоритми розпізнавання часток породи з можливістю ручного коригування, що забезпечує гнучкість при обробці даних в умовах, коли освітлення чи інші зовнішні фактори можуть впливати на точність аналізу (рис. 3.2).

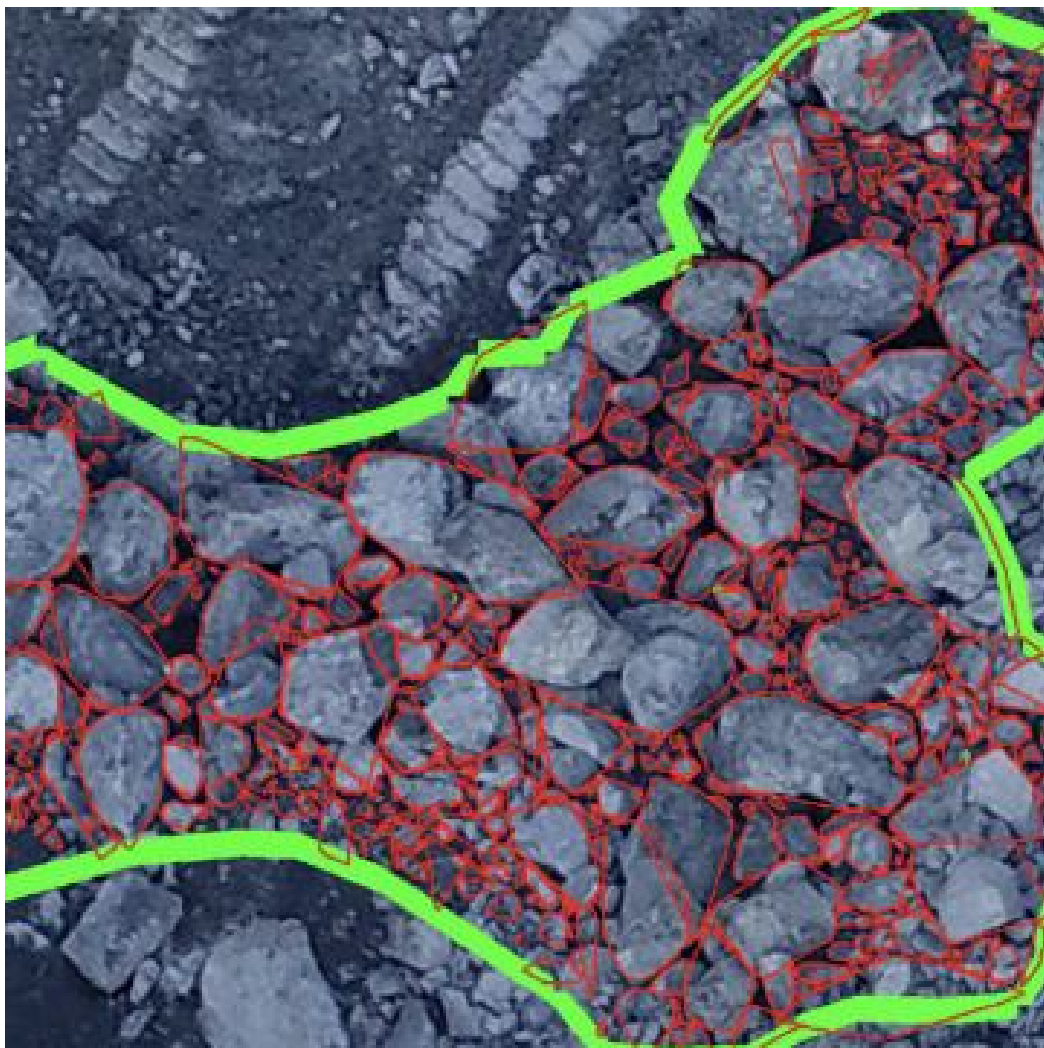


Рис. 3.2 – Фракційний аналіз буровибухових робіт в ГІС K-Mine [37]

5) Система може проводити фракційний аналіз часток у кузовах, ковшах або на стрічкових конвеєрах, надаючи інформацію, що може бути використана для оперативного коригування процесів видобутку.

б) Програма формує звіти, які включають графічне та табличне представлення розподілу фракцій, надаючи систематизовані дані для подальшого аналізу (рис. 3.3).

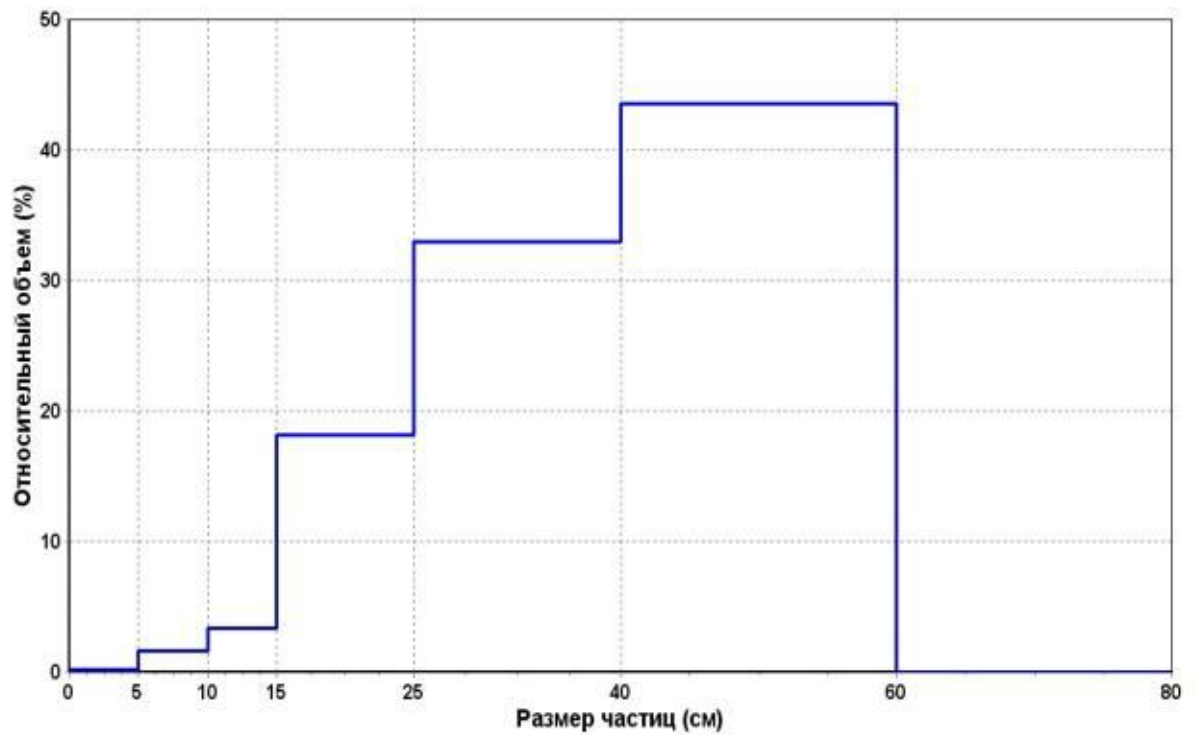


Рис. 3.3 – Приклад звіту аналізу гранулометричного складу розвалу порід

Результати проведеного гранулометричного аналізу можуть бути використані у дослідженні продуктивності виймально-навантажувального і транспортного обладнання.

РОЗДІЛ 4. ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ГРАНУЛОМЕТРИЧНОГО СКЛАДУ ПОРІД НА ПРОДУКТИВНІСТЬ ЕКСКАВАТОРНО-АВТОМОБІЛЬНОГО КОМПЛЕКСУ

Для дослідження впливу гранулометричного складу порід на продуктивність екскаваторно-автомобільного комплексу була проведена типізація кусковатості підірваних порід за величиною середньозваженого розміру кусків порід ($D_{св}$) відповідно до результатів проведених раніше промислових експериментів. Для чіткого візуального поділу всього діапазону кусковатості порід у даних гірничотехнічних умовах грансостав підірваних розкривних порід був поділений на 5 груп.

Типізація кускуватості дозволила здійснювати визначення гранулометричного складу подрібнених порід на підставі візуального порівняння з еталонними фотоплаграмами. Можливі помилки візуального поділу компенсовані великою кількістю дослідів, а застосування методів математичної статистики дозволило отримати достовірний результат та прийнятність даних. Один із прикладів застосування запропонованого способу оперативного визначення величини $D_{св}$ – середньозваженого розміру шматків підірваної гірської маси та ступеня її впливу на вагу породи в ковші екскаватора Hitachi EX3600-6, який безпосередньо впливає на його продуктивність, представлений у таблиці 4.1.

При проведенні хронометражних спостережень досліджуваний технологічний параметр фіксувався залежно від кусковатості. Результати хронометражних вимірів зміни ваги породи в ковші екскаватора від величини середньозваженого розміру кусків підірваної гірничої маси наведено в табл. 4.1.

Таблиця 4.1 – Результати хронометражних досліджень

№ з/р	Група гран. складу, (еталон)	Вага породи в ковші (хроном.), тонн	№ з/р	Група гран. складу, (еталон)	Вага породи в ковші (хроном.), тонн
1	1	49	34	3	37,5
2	1	44	35	3	36
3	1	46	36	3	36,5
4	1	43	37	3	32,5
5	1	44	38	3	38
6	1	43,5	39	3	35
середня	$D_{св} = 19,2\text{см}$	45,16	40	3	36,5
7	2	43,5	41	3	36,5
8	2	36	42	3	33
9	2	41	середня	$D_{св} = 48,5\text{см}$	35,61
10	2	42	43	4	31
11	2	40	44	4	33,5
12	2	40,5	45	4	32
13	2	38	46	4	30,5
14	2	38	47	4	32
15	2	41,5	48	4	32
16	2	40,5	49	4	30,5
17	2	42,5	50	4	32
18	2	39	51	4	33
19	2	40,5	52	4	32,5
20	2	41,5	53	4	32
21	2	41,5	54	4	32
22	2	40	55	4	34,5
23	2	39,5	56	4	34,5
18	2	39	57	4	33,5
24	2	38,5	58	4	32
20	2	43,5	59	4	32,5
середня	$D_{св} = 35,0\text{см}$	40,325	середня	$D_{св} = 70,0\text{см}$	37,5
25	3	33,5	60	5	36
26	3	38,5	61	5	36,5
27	3	36,5	62	5	32,5
28	3	33,5	63	5	38
29	3	34,5	64	5	35
30	3	36,5	65	5	36,5

31	3	36,5	66	5	36,5
32	3	36,5	середня $D_{св} = 105,0\text{см}$		33
33	3	33,5			

Дані таблиці візуалізовано на графіку (рис. 4.1). Далі за допомогою методу регресійного аналізу було отриману функцію, що найкращим чином описую дану залежність.

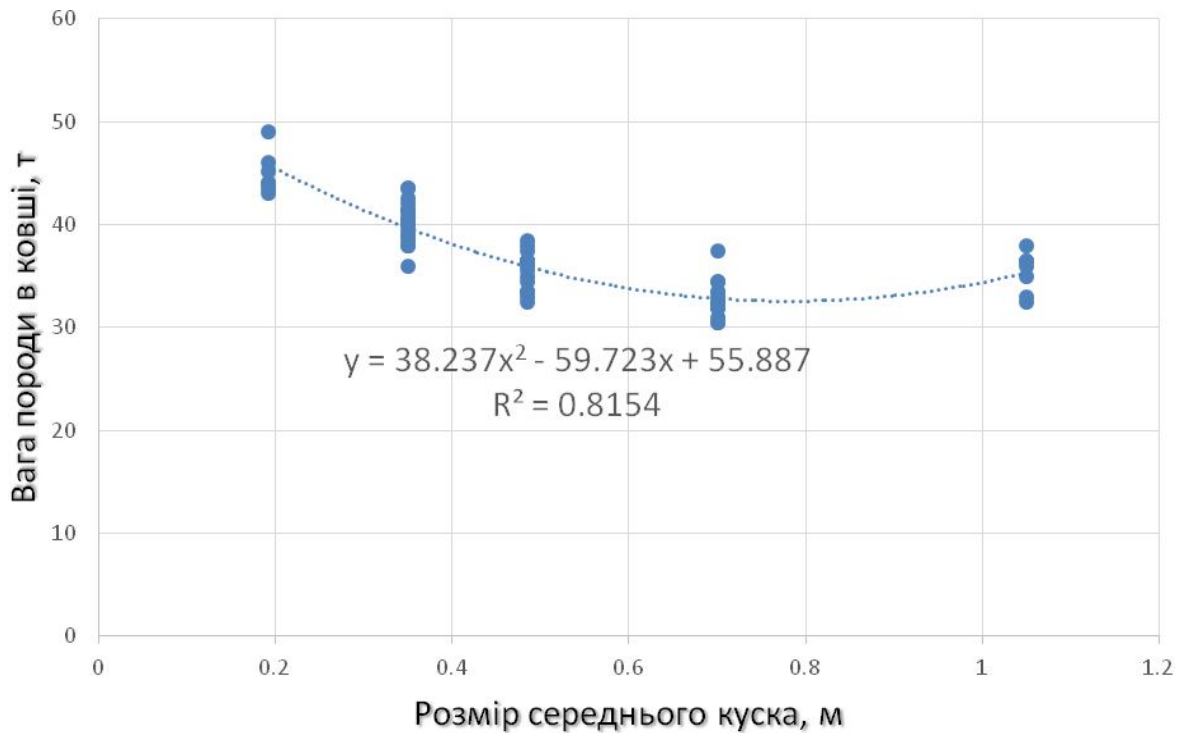


Рис. 4.1 – Залежність ваги породи в ковші від розміру середнього куска в розвалі

Отримана аналітична залежність може бути описана формулою (4.1):

$$G = 38,237d^2 - 59,723d + 55,887 \quad (4.1)$$

де G – вага породи в ковші, т;

d – розмір середнього куска в розвалі, м.

Таблиця 4.2 – Хронометраж тривалості циклу для різного гранулометричного складу порід

№ з/р	Екскавація								
	Цикл №1			Цикл №2			Цикл №3		
	Грансклад	Час		Грансклад	Час		Грансклад	Час	
		t _н	T _ц		t _н	T _{ц, сек}		t _н	T _ц
1	3,4	9,26	45,25	3,4	11,79	33,44	3,4	9,27	27,78
	-	-	-	3,4	12,78	22,35	4	13,16	28,90
3	3	7,20	14,91	3	13,01	21,04	3	12,06	34,04
4	3	11,20	21,82	3	9,75	32,16	4	10,68	31,98
5	3	16,83	27,90	3	8,54	31,5	4	11,02	36,23
6	4	15,14	22,43	3	12,36	31,18	3,4	10,53	29,07
7	3	12,40	16,95	3,4	15,76	33,43		9,82	32,73
8	4	13,57	22,88	4	12,51	34,91	4	12,36	36,06
9	3	8,55	20,51	3	11,72	36,68	3,4	10,29	32,33
10	3	12,53	21,11	3	11,71	32,77	3	10,53	30,01
11	3,4	12,18	22,10	3,4	16,08	36,1	4	9,41	31,15
12	4	17,75	49,62	3	10,13	33,18	3	8,83	32,69
13	3	11,34	25,20	4	14,13	36,72	3,4	8,89	28,12
14	3,4	12,61	23,44	3,4	10,39	33,02		10,44	31,33
15	3,4	16,21	30,46	3,4	9,86	33,99	3,4	10,42	34,53
16	3	11,46	22,26	3,4	14,19	37,17	3,4	12,07	32,87

Аналогічно попередній методиці, отримаємо емпіричну залежність тривалості навантаження від діаметру середнього куска (4.2):

$$(4.2)$$

Для побудови графіка розрахуємо тривалість набору ковша при різних значеннях діаметру середнього куска:

Таблиця 4.3 – Розрахункові значення тривалості циклу для різного розміру середнього куска

d, м	t _н , с	d, м	t _н , с
0,2	10,4	0,3	11,1
0,4	11,9	0,5	12,8
0,6	13,7	0,7	14,7
0,8	15,8	0,9	16,9
1,0	18,1	1,05	18,8

Але цикл екскаватора окрім наповнення ковша включає також час на поворот стріли і розвантаження. Якщо величину t_p можна вважати незалежною від кусковатості підірваних порід, то тривалість повороту ймовірно залежить від ваги породи в ковші екскаватора, який визначає грансостав гірської маси, оскільки при певній потужності приводу швидкість повороту екскаватора з різною завантаженістю ковша буде різною. У тому випадку, коли метою роботи є оптимізація параметрів певної технологічної схеми роботи екскаватора (при виконанні хронометражу кут повороту становив приблизно 90°), доцільно прийняти вигляд формули для розрахунку часу циклу екскаватора $T_{\text{ц}}=t_{\text{н}}+A$, де $A=2t_{\text{п}}+t_p$. Виходячи з даних хронометражу, $A=17,94$ с.

Для отриманих значень побудуємо графік залежності тривалості навантаження і, як наслідок, тривалості циклу, при різних значеннях діаметра середнього куска в розвалі (рис. 4.2).

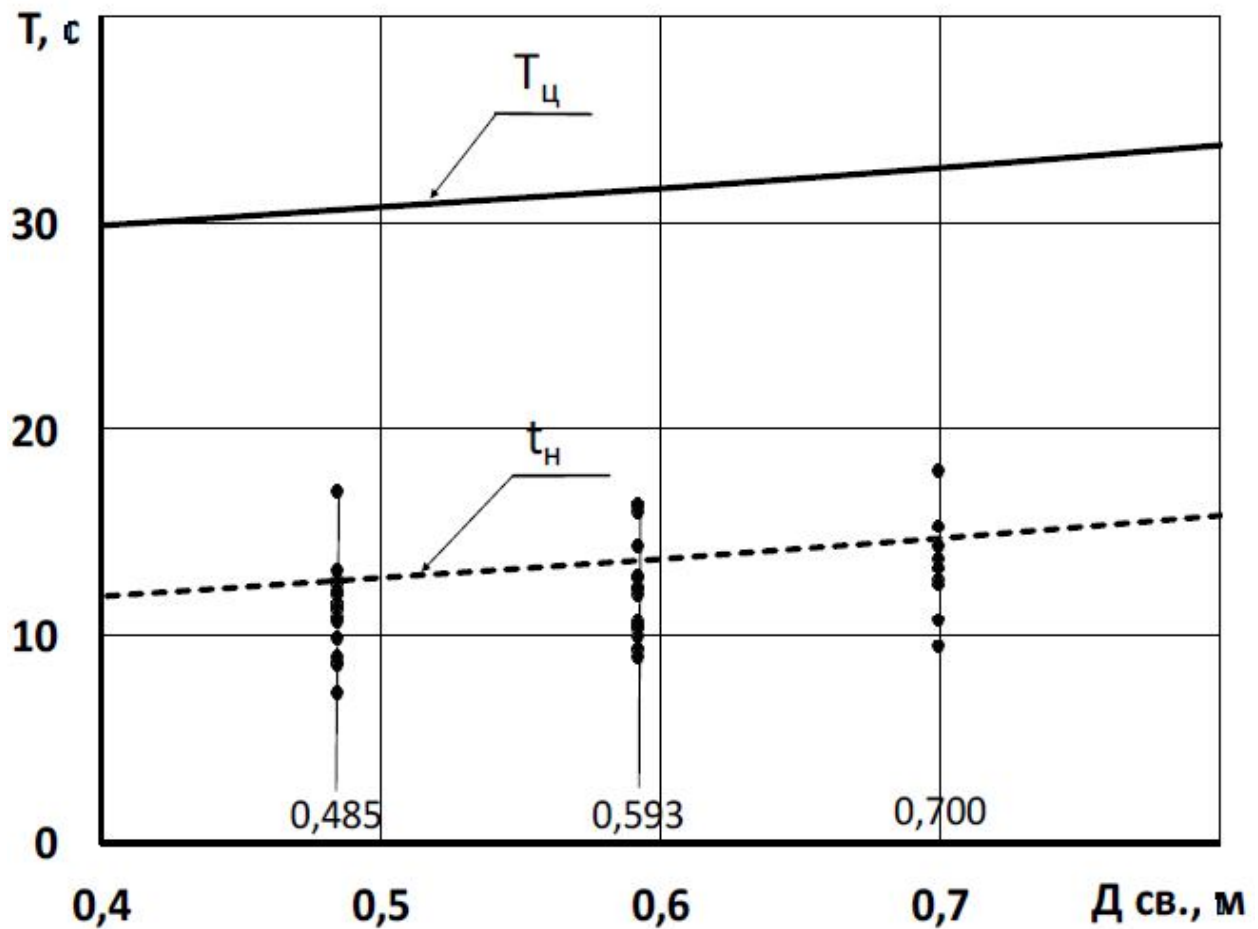


Рис. 4.2 – Залежність тривалості циклу від діаметра середнього куска в розвалі

Тепер виконаємо розрахунок продуктивності екскаватора з урахуванням отриманої залежності. Розрахункова формула виглядатиме наступним чином:

$$, \text{м}^3/\text{рік} \quad (4.3)$$

де α – коефіцієнт використання екскаватора у часі;

$T_{ц}$ – тривалість зміни, год.

n – кількість змін на добу;

Таблиця 4.4 – Розрахунок продуктивності екскаватора Hitachi EX-3600-6 в залежності від розміру середнього куска в розвалі

№	dсв, м	G, т	Тц, с	Qекс, т/рік
1	0,1	45,1	27,59	23 386 615
2	0,2	45,0	28,34	22 754 999
3	0,3	40,0	29,04	19 731 073
4	0,4	36,8	29,84	17 678 002
5	0,5	34,6	30,74	16 115 546
6	0,6	32,8	31,64	14 844 953
7	0,7	31,4	32,64	13 772 152
8	0,8	30,2	33,74	12 835 328
9	0,9	29,2	34,84	12 001 351
10	1	28,3	36,04	11 248 170

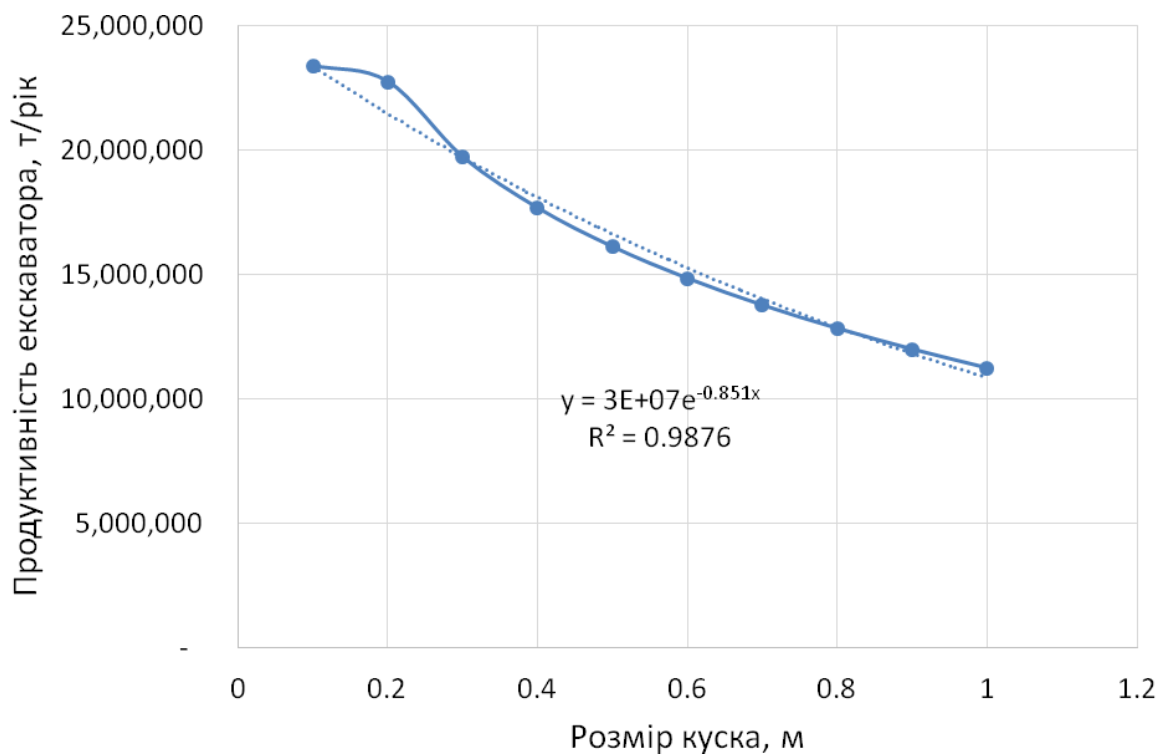


Рис. 4.3 – Залежність продуктивності екскаватора Hitachi EX-3600-6 від розміру середнього куска в розвалі

Наведений графік наочно демонструє експоненційне падіння продуктивності екскаватора при зниженні якості буропідривної підготовки гірських порід до виймання. В подальшому це безпосереднім чином призведе до падіння продуктивності транспортного обладнання.

ВИСНОВКИ

Перший розділ магістерського дослідження присвячений аналізу методичних принципів оптимізації параметрів екскаваторно-автомобільних комплексів глибоких кар'єрів. Зокрема, виконано ретроспективний аналіз розвитку питання оптимізації параметрів екскаваторно-автомобільних комплексів. Проведено аналіз сучасного стану гірничих робіт на кар'єрах України та світу, зокрема особлива увага приділялася основному технологічному обладнанню, що при цьому використовується. Окреслено тенденцію до переходу на потужне крупногабаритне обладнання: екскаватори ЕКГ-15, Komatsu PC-3150, Hitachi-EH-3600, P&H-4100 ХРС, а також автосамоскиди вантажопідйомністю понад 130 т виробників БелАЗ, Komatsu, CAT, Liebherr. В цьому ж розділі проаналізовані методичні основи оптимізації параметрів екскаваторно-автомобільних комплексів: критерієм достовірності дослідження є системний підхід до аналізу предмета дослідження та різні статистичні методи: порівняльний аналіз, метод екстраполяції тощо.

Другий розділ був присвячений встановленню взаємозв'язків параметрів технологічних процесів. Результати дослідження візуалізовано на схемі і встановлено, що гранулометричний склад порід, зокрема розмір середнього куска породи після вибуху, в найбільшій мірі впливають на ефективність наступних технологічних процесів через коефіцієнти наповнення та розпушення породи.

В третьому розділі було проведено дослідження впливу буровибухових робіт на параметри технологічних процесів. Особлива увага була приділена вивченню існуючих технологій буропідривних робіт для забезпечення необхідного гранулометричного складу порід. Аналіз виконано на прикладі крутоспадних родовищ світу і зокрема – Кривбасу. Розглянуто доцільність і ефективність використання основних технічних підходів: короткосповільненого підривання, використання підпірної стінки, підривання

здвоєних уступів, використання набійки та розосередженого заряду, а також метод похилих свердловин. Проаналізовано математичні підходи до прогнозування якості буропідривної підготовки в залежності від гірничо-геологічних факторів. Виконано аналіз існуючого програмного забезпечення, що для визначення оптимальної якості вибухової підготовки. До такого програмного забезпечення було віднесено K-MINE, Blast Maker, Split-Desktop, WipFrag, FRAGLYTICS, IPACS. Більш ретельно досліджено використання ГІС K-MINE і оцінено його великий потенціал для автоматизованої оцінки гранулометричного складу порід після вибуху.

В останньому розділі було досліджено вплив гранулометричного складу порід на продуктивність екскаваторно-автомобільного комплексу. Спочатку було проаналізовано результати хронометражних досліджень ваги породи в ковші при різних значеннях розміру середнього куска: 19,2 см, 35 см, 48,5 см, 70 см, 105 см. Побудовано графік і за допомогою кореляційно-регресійного аналізу отримано математичну залежність ваги породи в ковші від розміру середнього куска в розвалі: $G = 38,237d^2 - 59,723d + 55,887$.

Далі в результаті хронометражних досліджень було оцінено тривалість циклу для різного гранулометричного складу порід і аналогічним чином отримано залежність: .

На основі проведених математичних перетворень було запропоновано математичну формулу продуктивності екскаватора, яка враховує гранулометричний склад порід в розвалі з отриманням відповідних графічних залежностей. Залежність демонструє експоненційне падіння продуктивності екскаватора при зниженні якості буропідривної підготовки гірських порід до виймання, що в подальшому безпосереднім чином призведе до падіння продуктивності транспортного обладнання.

Бібліографія.

1. Demirel N., Ta Q.B. Optimization of the Excavator-and-Dump Truck Complex at Open Pit Mines // E3S Web of Conferences. 2018. № 41. С. 01006. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20184101006>
2. Nehring M., Andrews C. Optimization of Cycle Time for Loading and Hauling Trucks in Open-Pit Mines // Academia. 2017. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.academia.edu>
3. Та Q.B., Munirathinam M., Barve S. Simulation and Optimization of Haulage System of an Open-Pit Mine // ResearchGate. 2018. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.researchgate.net>
4. Munirathinam M. Global Optimization of Open-Pit Mining Complexes // Academia. 2022. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.academia.edu>
5. Andrews C. Unified Modelling and Simultaneous Optimization of Open Pit Mining Complexes // McGill eScholarship. 2020. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://escholarship.mcgill.ca>
6. Bell J., Chanda E. Application of Optimisation Techniques in Open-Pit Mining // Springer. 2016. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://link.springer.com>
7. Barve S., Demirel N. Optimization-Based Dispatching Policies for Open-Pit Mining // Springer. 2018. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://link.springer.com>
8. Nuray D., Samanta B. Investigation of Excavator Performance Factors in Open-Pit Mining // Scientific Research Publishing (SCIRP). 2020. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.scirp.org>
9. Samanta B., Barve S. Smart Truck Distribution in Open-Pit Mining // International Open Technologies and Practices Engineering Journal (IOTPE). 2018. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://iotpe.com>

10. Chanda E. Stochastic Optimization for Long-Term Planning of a Mining Complex // Springer. 2020. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://link.springer.com>
11. Дубінкін, Д.М. Дослідження процесу транспортування розкривних порід та вугілля на розрізах / Д.М. Дубінкін, В.Ю. Садівець, Г.О. Котієв, А.В. Карташов // Техніка и технологія гірничої справи. – 2019. – №3. – С. 50-66.
12. Cuning J., Hawley M. Guidelines for mine waste dump and stockpile design. Boca Raton: CRC Press, 2017. 384 p.
13. Блізнюков В.Г., Луценко С.О., Пижик А.М. Гірнича справа: Навчальний посібник. Кривий Ріг: Видавець ФОП Чернявський Д.О. 2014, 412 с.
14. Відкриті гірничі роботи: Ч. I. Процеси відкритих гірничих робіт: навч. посіб. для студ. спеціальності 184 «Гірництво»/ О.О.Фролов, Т.В.Косенко; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. – 151 с.
15. Відкриті гірничі роботи: підручник / А.Ю. Дриженко; М-во освіти і науки України, Нац. гірн. ун-т – Д.: НГУ, 2014. – 590 с.
16. Бизов В.Ф. Основи технології гірничого виробництва. – Т. IV “Виробничі процеси”: Підручник для студентів вищих навчальних закладів за напрямком “Гірництво”. - Кривий Ріг: Мінерал, 2000. – 247 с. з іл..
17. Бизов В.Ф. Основи технології гірничого виробництва. – Т. V “Технологічні засоби”: Підручник для студентів вищих навчальних закладів за напрямком “Гірництво”. - Кривий Ріг: Мінерал, 2000. – 270 с. з іл.
18. Сінгхал Р., Місра Дж. Surface Mining Operations // Proceedings of the International Symposium on Mining Technology. 1995. С. 45-58.
19. Бахтавар Е., Ораї А., Шахріар М. Optimization of haulage system in open pit mines // International Journal of Mining Science and Technology. 2012. Т. 22, № 2. С. 165-170.

20. Кецюевич Л., Комленович Д. Haul truck fuel consumption and CO₂ emission under various engine load conditions // *Mining Engineering*. 2010. Т. 62, № 9. С. 44-50.
21. Кізіл М. С., Топал Т. Г. Utilizing pre-stripping overburden methods for reducing haulage costs // *Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy*. 2005. Т. 105, № 4. С. 243-250.
22. Сінґх Р. С. К., Дар Б. Б. Environmental issues of coal mining // *Mining Science and Technology*. 1994. Т. 19, № 1. С. 33-45.
23. Mosin, A.E. On the damage zone surrounding a single blasthole. // *Proceedings 2nd International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting - 1986*. - №.5 - Pp.22-34.
24. Rosskamp, M. Steinruchverhältnisse in den USA. / M. Rosskamp, W. Oerter // *Naturstein ind.* - 1973. - №1-2. - Pp.29-34.
25. Руйнування гірських порід енергією вибуху // Під ред. Е.І. Єфремова. – К.: Наук. думка, 1987. – 264 с.
26. Buki, P. Tightening the best on production cost / P. Buki, B. Nischk // *Pit and Quarry*. – 1986.–№ 3. – Pp. 38–44.
27. Leng, Z., Fan, Y., Gao, Q., & Hu, Y. (2020a). Evaluation and optimization of blasting approaches to reducing oversize boulders and toes in open-pit mine. *International Journal of Mining Science and Technology*, 30(3), 373–380. <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2020.03.010>
28. Швець Є.М. Оптимізація вибухового подрібнення скельних порід на залізрудних кар'єрах: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 05.15.03 „Відкрита розробка родовищ корисних копалин” / Є. М. Швець. – Кривий Ріг, 2013. – 23 с.
29. Ракишев Б.Р. Прогнозирование технологических параметров взорванных пород на карьерах. Алма-Ата: Наука, 1983. С.239.

30. Onederra, I., Esen, S. & Jankovic, A. 2004. Estimation of fines generated by blasting – applications for the mining and quarrying industries. *Mining Tech Trans Inst Min Metall A*:113, A1-A11
31. Saharan, M.R. & Mitri, H.S. 2008. Numerical procedure for dynamic simulation of discrete fractures due to blasting. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 41(5): 641–670.
32. Yang J.H., Lu W.B., Chen M., Yan P. & Li P. Rjco. An equivalent simulation method for whole time-history blasting vibration / 10th Int Symp. on Rock Fragmentation by Blasting: 473-483. New Delhi, India.
33. Шапурин А. В., Васильчук Я. В. Качество дробления горных пород как результат комплексного влияния различных факторов // Вестник КТУ. 2011. № 29. С. 13–17.
34. Шапурин А.В, Швец Е.М., Остапенко С.А., Ушаков В.Л. Анализ существующего опыта интегрального подхода к добыче и переработке полезных ископаемых. Разработка рудных месторождений, Криворожский технический университет, вып.94, 2011. С. 3-6.
35. Геоинформационная система K-MINE: Пособие пользователя. Графическое ядро. - Кривой Рог: «КРИВБАССАКАДЕМИНВЕСТ», 2012. - 372 с.: ил.
36. Автоматизированная система управления горными работами современного предприятия на базе геоинформационной системы K-MINE / М.В. Назаренко, С.А. Хоменко // Маркшейдерский вестник. – 2009. – №5. – С. 30-37.
37. Гранулометричный склад [Электронный ресурс] // K-MINE. – Режим доступа: <https://k-mine.com/ru/produkty/granulometricheskij-sostav>