

ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»

Гірничо-металургійний факультет  
Кафедра гірничої справи

«Допущено до захисту»  
Гарант ОПП

Ігор ГРИГОР'ЄВ

## КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня магістра

за підсумками виконання  
освітньо-професійної програми  
«Технології відкритої розробки родовищ»  
за спеціальністю 184 Гірництво

**на тему: Дослідження впливу умов експлуатації обладнання на  
ефективність виймально-навантажувальних робіт**

Керівник роботи

Сергій ЛУЦЕНКО

Консультант від бази практики

Антон КУЗНЕЦОВ

*Кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень.  
Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають  
посилання на відповідне джерело*

Здобувач

Максим СУЛТАНОВ

Підсумкова оцінка за атестацію			
--------------------------------	--	--	--

Голова ЕК

Ігор ТОНЄВ

Запоріжжя 2026



6. Консультанти по роботі (проєкту), із зазначенням розділів роботи, що стосуються їх.

Розділ	Консультант (прізвище та ініціали, посада)
1	Луценко С.О., доцент кафедри ГС
2	Луценко С.О., доцент кафедри ГС

#### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи
1	Аналіз теоретичних основ взаємозв'язку якості буропідливних робіт і ефективності роботи виймально-навантажувального обладнання	01.12.25 – 19.12.25
2	Вплив технологічних характеристик вибухового дроблення на показники роботи виймально-навантажувального комплексу кар'єру	22.12.25 – 09.01.26
3	Висновки, перелік посилань, вступ, зміст, реферат	12.01.26 – 16.01.26
4	Подання завершеної роботи. перевірка на академічний плагіат	19.01.26 – 23.01.26
4	Рецензування завершеної роботи. Захист	26.01.26 – 30.01.26

Здобувач

Максим СУЛТАНОВ

Керівник роботи

Сергій ЛУЦЕНКО

## ЗМІСТ

РЕФЕРАТ.....	3
ВСТУП.....	6
Розділ 1 Аналіз теоретичних основ взаємозв'язку якості буропідривних робіт і ефективності роботи виймально-навантажувального обладнання .....	10
1.1. Гірничотехнічні умови експлуатації технологічного обладнання в глибоких кар'єрах України.....	10
1.2. Вивчення досвіду процесу екскавації в залізородних кар'єрах Кривбасу.....	13
1.3. Дослідження факторів впливу на продуктивність виймально-навантажувального обладнання .....	15
Розділ 2 Вплив технологічних характеристик вибухового дроблення на показники роботи виймально-навантажувального комплексу кар'єру .....	42
2.1. Взаємозв'язок параметрів буровибухової підготовки гірничої маси з ефективністю функціонування гірничотехнічного комплексу.....	42
2.2. Оптимізація гранулометричного складу гірничої маси як чинника підвищення продуктивності виймально-навантажувальних комплексів.....	50
Загальні висновки та рекомендації.....	61
Бібліографія.....	64

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до магістерської роботи на тему «Дослідження впливу умов експлуатації обладнання на ефективність виймально-навантажувальних робіт» складається з: 65 с., 15 рис., 52 джерела інформації.

"Випускна робота на здобуття освітньо-кваліфікаційного рівня магістра. Кривий Ріг, 2025. - 65 с."

**Актуальність теми.** Ефективність функціонування наявного гірничотранспортного обладнання значною мірою визначається якістю підготовленої гірничої маси, тобто ступенем її дроблення та придатністю до подальшого навантаження, транспортування і переробки. Ключовим критерієм цієї якості є ступінь дроблення, який оцінюється за середнім розміром окремоностей у розвалі відбитої породи або за співвідношенням дрібних та негабаритних фракцій.

У структурі собівартості видобутку 1 м<sup>3</sup> гірничої маси на кар'єрах кольорової металургії частка буровибухових робіт становить у середньому 15–25 %, а в окремих випадках може досягати 30–40 %. Переважний обсяг гірничої маси (70–80 %, інколи до 100 %) в таких кар'єрах виймається саме шляхом застосування буровибухового способу.

Фізико-механічні та структурні властивості гірських порід і руд характеризуються значною варіабельністю: показник міцності за шкалою Протодьяконова змінюється у діапазоні 5–18; акустична жорсткість — від  $3 \cdot 10^5$  до  $16\text{--}18 \cdot 10^5$  г/см<sup>2</sup>·с; розміри окремоностей можуть коливатися від кількох сантиметрів до 1,5–2 м і більше. Зі збільшенням глибини кар'єрів закономірно зростає частка важкорозбурюваних та дуже важкорозбурюваних порід, що ускладнює

процес їх руйнування буровибуховими засобами та висуває підвищені вимоги до параметрів вибуху.

Собівартість видобутку тісно пов'язана з тим, наскільки інтенсивно подрібнюється гірська порода під час вибуху. Проте надмірне підвищення ступеня дроблення призводить до збільшення питомих витрат на буровибухові роботи. Тому доцільність застосування методів посиленого вибухового руйнування порід визначають, виходячи з балансу технічних та економічних показників.

Економічна оцінка вибухових робіт на кар'єрах базується на принципі мінімізації загальних витрат, які формуються комплексом основних виробничих операцій: бурінням, здійсненням вибуху, навантаженням гірничої маси, її транспортуванням та необхідним вторинним подрібненням.

Слід підкреслити, що витрати на окремі технологічні операції безпосередньо залежать від ступеня дроблення гірничої маси. Зокрема, у процесах буріння та вибухового руйнування рівень витрат визначається питомою витратою вибухових речовин, яка формується під впливом параметрів буропідривних робіт, фізико-механічних характеристик порід та обраної технології виконання вибуху.

Витрати на виїмку породи та її додаткове дроблення безпосередньо залежать від того, наскільки якісно подрібнена гірнична маса після вибуху. При цьому продуктивність екскаватора слугує інтегральним показником, що відображає вплив ступеня дроблення на подальші транспортні витрати.

**Мета й завдання роботи.** Основною метою магістерської роботи є встановлення того, яким чином гірничотехнічні умови та параметри експлуатації обладнання впливають на його фактичну продуктивність під час виконання виймально-навантажувальних операцій.

Тематика дослідження — передбачає аналіз факторів, що визначають результативність роботи машин у реальних виробничих умовах.

Для досягнення поставленої мети в роботі сформовані **основні задачі дослідження**:

1) проаналізувати наукові дослідження, що стосуються впливу гірничотехнічних факторів на продуктивність та ефективність роботи виймально-навантажувальних машин;

2) проаналізувати, яким чином параметри та якість підривної підготовки гірничої маси впливають на продуктивність роботи виймально-навантажувальних машин.

Об'єкт дослідження – система взаємозв'язків між фракційним складом гірничої маси та робочими параметрами техніки для її виїмки й навантаження.

Ідея дослідження полягає у підвищенні продуктивності та економічної результативності відкритої розробки родовищ шляхом встановлення такого параметра кускуватості гірничої маси, який забезпечує оптимальні умови роботи виймально-навантажувального устаткування та максимізує його технологічну ефективність.

**Методи дослідження.** У процесі роботи було застосовано комплекс взаємодоповнювальних підходів, який включав критичний аналіз і систематизацію даних попередніх наукових досліджень, аналітичні методи опрацювання матеріалу, а також сучасні інструменти математичної обробки результатів експериментальних випробувань.

**Ключові слова:** БУРОВИБУХОВІ РОБОТИ, СТУПІНЬ ДРОБЛЕННЯ, ВИЙМАЛЬНО-НАВАНТАЖУВАЛЬНІ РОБОТИ, ПРОДУКТИВНІСТЬ ЕКСКАВАТОРІВ, ГІРНИЧА МАСА, ПІДГОТОВКА ПОРІД, ЕФЕКТИВНІСТЬ ГІРНИЧОТРАНСПОРТНОГО КОМПЛЕКСУ, ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНА ОЦІНКА.

## **ВСТУП.**

Раціональна експлуатація гірничотранспортного обладнання на кар'єрах значною мірою залежить від якості оперативного планування, організації та управління основними технологічними процесами. Серед цих процесів ключовими є виїмка та навантаження гірничої маси, а також комплекс робіт, що забезпечує її належну підготовку до відпрацювання.

На сучасних залізородних підприємствах, що розробляють глибокі та крутоспадані поклади, сформовані міцними гірськими породами та орієнтовані на значні обсяги видобутку, основний комплекс виймально-навантажувальних операцій забезпечується великою кількістю екскаваторів циклічної дії.

Організація та оперативне планування цих процесів належать до найбільш технологічно складних елементів гірничого виробництва. Складність визначається як множинністю гірничотехнічних факторів, що одночасно впливають на параметри робіт, так і внутрішньою неоднорідністю родовища, де руди різної якості розташовані просторово нерівномірно.

Результативність планування та організації виймально-навантажувальних процесів значною мірою визначається точністю встановлення технічно досяжної продуктивності екскаваторів у конкретних гірничо-технологічних умовах.

Складна геологічна будова залізородних родовищ, що проявляється у значній мінливості умов залягання та широкому спектрі фізико-механічних характеристик руд і вмісних порід, істотно ускладнює процеси планування й організації виймально-

навантажувальних робіт. Властивості гірських порід, а також морфологія рудних тіл безпосередньо визначають рівень технічної продуктивності екскаваторного обладнання, яке є базовою величиною для розрахунку режимів роботи добувних ділень.

Додаткові труднощі виникають через просторову неоднорідність рудних інтервалів, зокрема через чергування ділянок із різним вмістом корисного компонента. Така нерівномірність ускладнює формування стабільного потоку рудної маси заданої якості на дробильно-збагачувальний комплекс, що потребує ретельного оперативного планування та коригування схем подачі матеріалу.

Оцінювання технічно досяжної продуктивності екскаваторів безпосередньо пов'язане з характеристиками гірничої маси у вибоях, передусім із її кускуватістю та гранулометричним складом. Оскільки результати буровибухових робіт формують структуру розпушеної породи, саме вони визначають умови роботи екскаваторів і значною мірою впливають на їхню можливу продуктивність та необхідну кількість машин у забої.

Фактична продуктивність екскаваторів, у свою чергу, суттєво впливає на узгодженість роботи навантажувальної та транспортної ланок. Від рівня цієї збалансованості залежить загальна ефективність виймально-навантажувальних процесів, а відтак і виробнича спроможність кар'єру щодо видобутку гірничої маси.

Собівартісні показники відкритої розробки суттєво залежать від того, якої інтенсивності дроблення досягають під час буровибухового руйнування масиву. Разом із тим надмірне зменшення фракційного складу породи супроводжується зростанням питомих витрат на виконання вибухових операцій.

Ефективність вибухових робіт на кар'єрах визначають, виходячи з принципу мінімізації сумарних витрат на основні технологічні етапи — буріння, підривання, навантаження, транспортування та необхідне

вторинне дроблення. При цьому кожен із цих процесів чутливо реагує на якість первинного подрібнення масиву.

Зокрема, у бурінні та підриванні витрати формуються під впливом питомої витрати вибухових речовин, величина якої визначається комплексом параметрів буровибухових робіт, фізико-механічними властивостями порід та прийнятою технологічною схемою проведення вибухів.

Теоретико-методологічною основою дослідження стали фундаментальні напрацювання провідних наукових шкіл у галузі відкритої розробки родовищ, механіки руйнування гірських порід та технології видобування корисних копалин. Значний внесок у формування наукових підходів, використаних у роботі, зроблено класичними та сучасними дослідниками, серед яких можна відзначити О.І. Арсентьєва, Л.І. Барона, О.С. Мечнікова, М.Ф. Друкованного, І.Ф. Жарікова, М.М. Кузнецова, Б.М. Кутузова, , М.І. Ройзмана, Б.П. Юматова, М.М. Пахомова, Г.В. Родіонова, К.Є. Вінницького, Н.Я. Репіна, В.В. Перегудова, О.В. Колтунова та багатьох інших учених, чії праці стали базовими для розвитку сучасних наукових положень у гірничій справі.

До кола авторів, що істотно вплинули на сучасну теорію та практику відкритих гірничих робіт, також можна віднести дослідників нових поколінь, зокрема: С.М. Кузьменка, О.В. Ковальчука, М.О. Бондаренка, А.В. Гуржія, Р. Драгана, О.С. Сторожука, а також зарубіжних фахівців, таких як Е. Ноек, J. Read, В. Brady, R. Stacey, M. Hustrulid, T. Katsabanis, роботи яких суттєво розширили наукові уявлення про моделювання руйнування порід, оптимізацію буровибухових процесів та проектування гірничих систем.

Попри значний обсяг опублікованих досліджень, низка аспектів, пов'язаних із визначенням раціональної ступені подрібнення гірських порід та удосконаленням організації виймально-навантажувальних

процесів за участю великої кількості екскаваторів, залишається недостатньо опрацьованою. Саме наявність таких невирішених питань і формує наукову проблему, що визначає головну мету цього дослідження.

Обґрунтоване вирішення зазначеної проблеми забезпечує можливість істотного зростання ефективності виробничих операцій та зменшення витрат, пов'язаних із видобутком залізорудної сировини.

**Мета й завдання роботи.** Основною метою магістерської роботи є встановлення того, яким чином гірничотехнічні умови та параметри експлуатації обладнання впливають на його фактичну продуктивність під час виконання виймально-навантажувальних операцій.

Для досягнення поставленої мети в роботі сформовані **основні задачі дослідження:**

1) проаналізувати наукові дослідження, що стосуються впливу гірничотехнічних факторів на продуктивність та ефективність роботи виймально-навантажувальних машин;

2) проаналізувати, яким чином параметри та якість підривної підготовки гірничої маси впливають на продуктивність роботи виймально-навантажувальних машин.

# **РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ ТЕОРЕТИЧНИХ ОСНОВ ВЗАЄМОЗВ'ЯЗКУ ЯКОСТІ БУРОПІДРИВНИХ РОБІТ І ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ ВИЙМАЛЬНО- НАВАНТАЖУВАЛЬНОГО ОБЛАДАННЯ**

## ***1.1. Гірничотехнічні умови експлуатації технологічного обладнання в глибоких кар'єрах України***

Ретроспективний аналіз функціонування гірничо-металургійного комплексу України демонструє критичне стиснення обсягів видобутку залізорудної сировини. Станом на 2025 рік, показники вилучення гірничої маси та виробництва товарного концентрату в порівнянних цінах скоротилися до рівня 20–30 % від аналогічних параметрів 2010 року. Генезис цієї рецесії обумовлений суперпозицією двох груп факторів: військово-політичних обмежень, що диктують умови воєнного стану, та системних макроекономічних зрушень, викликаних глобальною нестабільністю сировинних ринків.

Незважаючи на суттєву деградацію виробничих потужностей, галузь зберігає статус фундаментального елемента експортного потенціалу національної економіки. Питома вага залізорудної продукції у структурі валютних надходжень країни за 2025 рік сягнула 23 %, що підтверджує стратегічну імперативність підтримання життєздатності гірничодобувних підприємств.

«Технологічний уклад вітчизняного залізорудного підгалузі характеризується абсолютною домінантою відкритого способу розробки родовищ, що забезпечує понад 80 % валового видобутку. Експлуатація родовищ зосереджена в межах глибоких кар'єрів, де ефективність функціонування виймально-навантажувального комплексу детермінується ускладненням геометричних параметрів

робочої зони та погіршенням гірничо-геологічних умов. Моніторинг динаміки гірничих робіт за останнє десятиліття дозволяє виділити низку закономірностей, що безпосередньо впливають на продуктивність екскавації» [53].

«Спостерігається стійка тенденція до пониження гірничих робіт: у межах Криворізького басейну та Полтавського гірничопромислового вузла середньозважена глибина кар'єрів збільшилася на 45 м, досягнувши відмітки 400 м. На окремих об'єктах, зокрема в кар'єрах Північного та Інгулецького ГЗК, глибина розробки наблизилася до критичних значень у 470 м та 460 м відповідно. Такі гіпсометричні параметри вимагають суворого дотримання паспортів ведення робіт через зростання проявів гірничого тиску та зміни напружено-деформованого стану приконтурного масиву» [53].

«Багаторічний вплив динамічних навантажень від масових вибухів призвів до техногенної зміни властивостей масиву, зокрема розвитку тріщинуватості та зростання опору порід руйнуванню, що, у свою чергу, вимагає підвищення питомих витрат вибухових речовин. Водночас конфігурація фронту очисних робіт зазнала різновекторних змін: на підприємствах Північного, Центрального та Полтавського ГЗК зафіксовано суттєве зменшення довжини фронту, особливо на рудних уступах. Натомість на Південному ГЗК прослідковується тенденція до інтенсифікації розробки зі збільшенням протяжності фронту робіт у 1,75–1,8 рази» [53].

«Суттєво змінилися параметри робочих майданчиків. Середня їх ширина по скельному розкриву зменшилася з 49,4 м у 2010 році до 36,6 м у 2019 році, а по руді – з 52,5 м до 42,5 м. На деяких кар'єрах (ЦГЗК, НКГЗК, частково ІНГЗК) ширина робочого майданчика звузилася до 20–25 м, що ускладнює розміщення та маневрування технологічного обладнання, особливо великогабаритних екскаваторно-

автомобільних комплексів, і потребує додаткових заходів щодо організації безпечних умов роботи» [53].

Висота добувних уступів на більшості підприємств становить переважно 15 м. Винятком є Полтавський ГЗК, де відпрацювання рудної зони здійснюється шарами, утвореними кількома уступами висотою 10 м, що дозволяє зменшити обсяги буріння та оптимізувати витрати. Висота уступів у скельному розкритті на різних кар'єрах варіюється в інтервалі 10–15 м відповідно до структурно-геологічних особливостей масиву та прийнятої системи розробки.

«Аналіз сучасних умов ведення гірничих робіт свідчить про стабільну та довготривалу тенденцію до звуження робочих площадок, що безпосередньо пов'язано зі станом і темпами розкриття робіт. Унаслідок цього на багатьох об'єктах буріння блоків здійснюється у три–чотири, а подекуди й у два ряди свердловин, що зумовлює формування блоків неправильної конфігурації з нерівномірною шириною по фронту. Найбільш проблемними виявляються перехідні зони, де змінюється кількість рядів свердловин: саме на цих ділянках спостерігається істотне погіршення якості дроблення, оскільки втрачаються технологічні переваги класичних багаторядних схем уповільненого підривання» [53].

«Зіставлення параметрів глибинного розвитку кар'єрів із динамікою зміни властивостей гірських порід вказує на суттєву невідповідність: відносно невелике поглиблення робіт супроводжується відчутним зростанням міцності масиву та збільшенням питомої витрати вибухових речовин. Ключовим чинником цього є збільшення частки масиву, який піддається повторному підриванню після впливу попередніх вибухів. Ступінь порушеності порід у таких зонах суттєво варіює – від ділянок зі зруйнованими структурними зв'язками до блоків, де породи зберігають залишкову монолітність і чинять підвищений опір руйнуванню» [53].

«За цих умов істотні переваги демонструють низькоенергетичні неелектричні системи ініціювання, що активно використовуються у Кривбасі. Їх застосування дозволяє більш стабільно контролювати характер розвитку тріщинуватості та параметри руйнування, що особливо актуально в умовах неоднорідної міцнісної структури масиву. Відповідно до сучасних вимог технологічного регламенту, вибухова підготовка має забезпечувати формування гірничої маси зі строго визначеними характеристиками, придатними для подальшої переробки й транспортування» [53].

Вивчення гірничотехнічних умов виконання буропідричних робіт у кар'єрі №1 ЦГЗК з урахуванням проектного поглиблення дозволило встановити низку важливих особливостей [1]. Відпрацювання здійснюється уступами різної висоти, причому зміна цього параметра можлива навіть у межах одного блока, що потребує гнучкого перерахунку бурових та підричних параметрів залежно від реальних геометричних умов. Близько половини робочих площадок мають ширину, меншу за проектну, що створює додаткові ускладнення під час обурювання блоків і часто унеможлиблює дотримання інструктивних вимог щодо розміщення бурових та навантажувальних засобів.

«Важливою характерною ознакою сучасного етапу розвитку гірничих робіт у великих залізородних кар'єрах є повернення у відпрацювання ділянок кар'єрних полів, які раніше були виведені на проектні контури відповідно до етапів розробки. Таке явище пояснюється насамперед відставанням розкривних робіт та необхідністю підтримувати стабільні обсяги рудовидобутку. Подібна ситуація характерна для більшості глибоких кар'єрів Кривбасу, однак найвиразніше проявляється в кар'єрі №1 ЦГЗК та Першотравневому кар'єрі ПівнГЗК. Скорочення темпів розкривних робіт також спричинило поширення практики здвоювання уступів і подальше зменшення

розмірів робочих площадок, що, своєю чергою, потребує ретельного вибору раціональних технологічних рішень при проектуванні та виконанні буропідривних робіт у таких особливо складних умовах [2]» [53].

## ***1.2 Вивчення досвіду процесу екскавації в залізорудних кар'єрах Кривбасу***

На сучасному етапі розвитку гірничих робіт у кар'єрах гірничо-збагачувальних комбінатів Кривбасу виймально-навантажувальні операції виконуються переважно екскаваторами циклічної дії, серед яких домінують моделі типу механічної лопати ЕКГ-10 та потужні модифікації гідравлічних екскаваторів останнього покоління. Провідними машинам цього класу залишаються екскаватори ЕКГ-10, ЕКГ-12,5 та ЕКГ-15, а також великовантажні гідравлічні екскаватори «НІТАСНІ» з місткістю ковша 15 м<sup>3</sup>, що забезпечують високий рівень продуктивності при відпрацюванні як рудних, так і розкривних горизонтів. Екскаватори меншої місткості, зокрема ЕКГ-5, широкого застосування набули на перевантажувальних площадках, у розробці пухких та наносних порід, а також при формуванні проміжних складів, де не вимагається надвеликий об'єм ковша.

В останнє десятиліття екскаваторні парки підприємств Кривбасу інтенсивно модернізуються: ПівнГЗК та ЦГЗК ввели в експлуатацію декілька екскаваторів ЕКГ-15, що дозволяє скоротити цикл навантаження та підвищити добову продуктивність при роботі на глибоких горизонтах понад 400 м. Полтавський ГЗК, за аналогією, активно впроваджує техніку з ковшами 12–15 м<sup>3</sup>, орієнтуючись на зниження питомих витрат на екскавацію.

Транспортні схеми кар'єрів Криворізького басейну істотно різняться залежно від структури кар'єра, глибини розробки та

прийнятої системи відвезення гірничої маси. Південний ГЗК традиційно використовує залізничний транспорт, орієнтований на застосування важких думпкарів, що забезпечують стабільність перевезень на великих відстанях. ІнГЗК, навпаки, робить ставку на автомобільний транспорт, експлуатуючи автосамоскиди великої вантажопідйомності, що дозволяє оперативно маневрувати при роботі на ділянках зі складною геометрією. НКГЗК, ЦГЗК і ПівнГЗК застосовують комбіновані автомобільно-залізничні транспортні системи, які поєднують гнучкість автотранспорту у межах уступів з ефективністю залізничних перевезень на головних плечах транспортування.

Особливості вибору транспортного засобу зумовлюють і типи навантажувального обладнання. При роботі з думпкарами вантажопідйомністю 105 та 140 т екскаватори формують навантажувальний цикл відповідно до габаритів кузова та вимог рівномірності розподілу маси. Для автосамоскидів вантажопідйомністю 120 та 136 т застосовуються ті самі моделі екскаваторів, але з оптимізованою траєкторією черпання, що дозволяє мінімізувати час підходу та відходу техніки.

На більшості кар'єрів Кривбасу домінує одностороннє нижнє фронтальне навантаження, яке забезпечує найліпші умови формування забою, оптимальний цикл роботи екскаватора й високу безпеку маневрових операцій. У глибоких кар'єрах (зокрема на Першотравневому кар'єрі ПівнГЗК та кар'єрі ІнГЗК) така схема навантаження дозволяє зменшити радіус розвороту техніки та забезпечити роботу в умовах мінімальної ширини робочих площадок, що є критичним фактором при теперішньому звуженні фронтів гірничих робіт.

За сукупністю технічних параметрів і фактичної організації виробничого процесу виймально-навантажувальні комплекси Кривбасу характеризуються високим рівнем механізації, але водночас —

підвищеною чутливістю до зміни гірничотехнічних умов, що визначає актуальність удосконалення як експлуатації обладнання, так і технологічних схем транспортування.

### ***1.3 Дослідження факторів впливу на продуктивність виймально-навантажувального обладнання***

«До цієї групи належать дослідження, що охоплюють поглиблений аналіз взаємозв'язку між гірничо-геологічними умовами, геометрією екскаваторного вибою та фактичною продуктивністю виймально-навантажувальних комплексів, а також роботи, спрямовані на вивчення методів визначення кусковатості порід і її впливу на ефективність роботи екскаваторів. Значення цих питань є визначальним, оскільки гранулометричний склад гірничої маси безпосередньо впливає на тривалість робочого циклу, стабільність навантажувального процесу та ступінь використання технічного потенціалу екскаваторів у складних умовах відкритого видобутку» [53].

«У сучасній практиці відкритих робіт використовують декілька методів оцінки кусковатості гірничої маси — лінійний, фотолінійний і фотопланіметричний. Найбільш точним, хоча й малопридатним для регулярних вимірювань через надмірну трудомісткість, є метод прямого підрахунку та сортування кусків за класами крупності. Саме тому цей спосіб рекомендують застосовувати як еталонний — для верифікації результатів, отриманих більш оперативними та зручними методами» [53].

Лінійний метод, розроблений Е. Л. Зурковим [3] у 1951 р. для оцінки якості вибухів за розвалом порід, передбачає вимірювання довжин відрізків на поверхні відбитої маси вздовж паралельних або діагональних ліній. Вимірюються розміри окремих шматків та сумарна довжина зон, зайнятих дрібною фракцією. Незважаючи на простоту,

метод має низку суттєвих недоліків: невисоку точність через нерівномірний розподіл кусків за висотою й площиною розвалу, а також підвищену небезпеку, пов'язану з необхідністю пересування по нестабільній поверхні масиву.

Фундаментальним розвитком тематики стали фотопланіметричний і фотолінійний методи, запропоновані Л. І. Бароном [3] у 1947 та 1957 роках. Суть фотопланіметричного підходу полягає у вимірюванні сумарних площ горизонтальних проєкцій шматків різної крупності на поверхні розвалу з подальшим визначенням об'ємів фракцій. Для цього використовують фотопланограми — спеціальні масштабовані зображення, що дають змогу значно підвищити точність аналізу та мінімізувати людський фактор.

«Фотолінійний метод базується на нанесенні на фотознімок серії паралельних ліній — індикатрис — уздовж яких визначається сумарна довжина фракцій кожного класу крупності. Частка окремої фракції в загальній масі обчислюється як відношення сумарної довжини шматків цього класу до загальної довжини всіх індикатрис. Така методика забезпечує високу оперативність оцінки та повторюваність результатів, що робить її суттєво ефективнішою за аналогічні польові лінійні вимірювання» [53].

«Комплексне використання наведених методів дає змогу формувати достовірну картину гранулометричного складу гірничої маси, що має ключове значення для встановлення раціональних режимів роботи екскаваторів, вибору типорозмірів ковшів, оптимізації параметрів черпання та забезпечення стабільності навантажувального процесу в різних гірничо-геологічних умовах» [53].

«Крім уже відомих підходів до оцінювання гранулометричного складу, у науковій практиці застосовують також фотограмметричний метод визначення кусковатості гірничої маси, розроблений фахівцями

кафедри геодезії гірничого інституту [3-5]. Методика спирається на принципи аналітичної та стереоскопічної фотограмметрії, які передбачають заміну натурних вимірювань просторових параметрів масиву аналізом його зображень на стереопарах. За рахунок цього формується можливість реконструювати об'ємно-планову структуру розвалу без необхідності виконання небезпечних польових робіт. Водночас практичне застосування фотограмметричного методу у виробничих умовах суттєво ускладнене високою трудомісткістю побудови проєктивних сіток, складністю математичних перетворень та необхідністю використання дорогого спеціалізованого обладнання, що обмежує його поширення» [53].

Висновки Л. І. Барона [3], В. В. Лосицького, В. Ф. Макаревича [5], С. Л. Іофіна, Л. М. Преображенського, Ф. І. Шкурка [3, 6], М. І. Ройзмана [7] та інших дослідників переконливо засвідчили, що точності фотолінійного та фотопланіметричного методів загалом достатньо для їх ефективного застосування у промисловому контролі. Крім того, ці методи забезпечують низку суттєвих переваг: можливість аналізувати кусковатість у будь-якій зоні поверхні розвалу, виконувати оброблення фотоматеріалів у лабораторних умовах, повторно перевіряти отримані дані та організувати систематичний контроль якості вибухових робіт без потреби проводити вимірювання безпосередньо в забої.

У згаданих дослідженнях було докладно опрацьовано питання побудови індикатрис та масштабних сіток для різних положень оптичної осі фотокамери — із її відхиленнями у вертикальній площині або одночасно у вертикальній та горизонтальній, що має ключове значення для коректного перерахунку геометрії розвалу при перспективних спотвореннях.

«Хоча фотолінійний метод забезпечує прийнятну точність для практичних оцінок гранулометричного складу, у загальному випадку він поступається фотопланіметричному, оскільки з його допомогою

досліджуються лише лінійні перетини масиву. Однак саме ця спрощеність і забезпечує йому певні переваги: мінімальні вимоги до підготовки фотознімків, зручність виконання вимірювань та значно менший обсяг обробки даних у порівнянні з фотопланіметричним методом» [53].

«Разом із тим фотолінійний підхід має специфічне обмеження: вимірювання проводяться тільки в тих напрямках, якими індикатриси перетинають шматки порід. Таким чином, фіксуються переважно середні лінійні розміри кусків, а окремі фракції, що становлять незначну частку у гранулометричному складі, можуть не потрапити на жодну індикатрису. У результаті можливе формування викривленої оцінки кусковатості, що важливо враховувати при аналізі якості вибухових робіт та прогнозуванні продуктивності виймально-навантажувального обладнання» [53].

«У дослідженнях, присвячених оцінюванню якості руйнування гірської маси, простежується поширена практика виконання вимірювань кусковатості в різних точках технологічного циклу — на поверхні розвалу після вибуху, на укосах вибоїв, у межах відвалів або безпосередньо в транспортних ємностях. Більшість дослідників вважають такі дані достатньо репрезентативними для характеристики гранулометричного складу порід. Подібний підхід є прийнятним у разі проведення порівняльної оцінки ступеня подрібнення вибухом, проте він втрачає надійність, коли об'єктом вивчення стає функціональний зв'язок між розмірними характеристиками шматків і продуктивністю навантажувального обладнання. Для таких експериментів необхідна однорідність умов вимірювань, оскільки зміна місця спостереження істотно впливає на структуру фіксованої вибірки» [53].

«Проблема коректності вибору ділянки вимірювання має особливе практичне значення для екскаваторного вибою. Поверхня гірничої маси на різних ділянках блока — у верхній частині розвалу, в

зоні укошу чи в місці підходу техніки — може демонструвати істотно відмінний гранулометричний склад. Породні фракції, що накопичуються в нижніх горизонтах через природне осідання або переміщення під час маневрування техніки, характерним чином відрізняються від тих, що залишаються у верхніх шарах. Унаслідок цього дані, отримані на різних поверхнях масиву, не можуть вважатися еквівалентними при визначенні фактичної кусковатості саме в зоні роботи екскаватора, де вона безпосередньо впливає на тривалість циклу черпання та швидкість формування чергової західки» [53].

«Крім того, у наявній технічній літературі, присвяченій методам визначення гранулометричного складу, відсутні чіткі вказівки щодо мінімально необхідної площі вимірювань для отримання достовірної оцінки кусковатості в межах вибою. У практиці ж часто використовують надто малі ділянки, які не забезпечують репрезентативності вибірки, або, навпаки, необґрунтовано великі площі, що збільшують трудомісткість досліджень без суттєвого підвищення точності» [53].

Питання впливу ступеня подрібнення гірничої маси на продуктивність навантажувальних машин розглядається у значній кількості робіт [4-15]. Проте підходи авторів до характеристики фракційного складу суттєво різняться. Для оцінювання використовуються такі параметри, як питома витрата вибухових речовин, вихід негабаритних брили, частка крупнокускових фракцій, середній діаметр шматка тощо. Водночас далеко не в усіх дослідженнях ці показники адекватно співвіднесено з фактичними умовами роботи екскаватора та структурою масиву, що часто призводить до спрощення або навіть викривлення оцінки реального впливу кусковатості на продуктивність навантажувального циклу.

«Найбільш змістовно питання взаємозв'язку між розмірними характеристиками гірничої маси та продуктивністю екскаваторів

розкрито в роботах Б. П. Юматова, М. І. Ройзмана, а також В. В. Лосицького та В. Ф. Макаревича [5, 7]. У цих дослідженнях вперше було системно сформовано уявлення про те, як саме зміна гранулометричного складу впливає на параметри робочого циклу — час наповнення ковша, величину холостих ходів, коефіцієнт використання черпального зусилля та реальну продуктивність екскаватора при різних типах вибою» [53].

«У проаналізованих дослідженнях критерієм оцінювання ступеня подрібнення гірничої маси здебільшого приймають вихід крупнокускових фракцій. Саме ця характеристика вважається визначальною для тривалості операції черпання — ключового елементу робочого циклу екскаватора — та суттєво впливає на коефіцієнт екскавації. Дослідники також підкреслюють, що під час визначення продуктивності навантажувальних машин необхідно додатково враховувати втрати часу, які виникають у процесі вибірки та відсортування негабаритних брил, оскільки саме ці операції часто зумовлюють найбільші затримки при роботі в забої» [53].

«Однак аналіз висновків різних авторів показує, що залежності між продуктивністю екскаватора та кількістю крупнокускових фракцій значно варіюють — як за формою функціонального зв'язку, так і за числовими параметрами. Причиною цього є відсутність єдиного підходу до визначення нижньої межі крупнокускової фракції. Розбіжності у параметрах класифікації неминуче призводять до суттєвих відмінностей у результатах, а отже — у висновках щодо впливу ступеня подрібнення на фактичну продуктивність обладнання. До цього слід додати, що на окремих кар'єрах, де відпрацьовуються скельні породи різних міцностей, фракції з такими розмірами практично не зустрічаються, що робить відповідний критерій неуніверсальним» [53].

Суттєві розбіжності в отриманих кількісних залежностях також пояснюються тим, що тривалість черпання визначається не лише кусковатістю масиву. На процес впливають міцність порід, ступінь порушеності масиву після вибуху, наявність тріщин, а також елементи залягання — зокрема кут падіння нашарувань у напрямку до екскаватора. Ці фактори або мають враховуватись у комплексі з гранулометричними характеристиками, або, за можливості, мають бути виключені з аналізу шляхом спеціальної організації експерименту. Стан вибою, що визначає продуктивність екскаваторів циклічної дії, формують передусім три параметри: кусковатість, міцність порід та орієнтація нашарування відносно горизонту. За багаторядного уповільненого підривання структурні елементи залягання зазвичай зберігають первинну орієнтацію у товщі підірваної маси, за винятком першої західки при відбійці по підібраному вибою.

«Незважаючи на очевидну важливість параметрів міцності та геометрії залягання для прогнозування продуктивності екскаваторів, у науковій літературі цим питанням приділено недостатньо уваги. Переважно наведено лише довідкові класифікації, де слабкі породи групують за труднощами розробки, а скельні — поділяють на добре та погано висаджувані [14-16]. Такий підхід не може бути визнаний задовільним для родовищ типу Криворізьких, де міцність скельних порід коливається у дуже широкому діапазоні — від 5 до 20 одиниць за шкалою М. М. Протодьяконова. У таких умовах універсальні класифікації втрачають інформативність, а адекватне оцінювання впливу геомеханічних властивостей на роботу екскаватора потребує значно детальнішої систематизації параметрів масиву» [53].

«Дослідженню впливу геометричних і технологічних параметрів екскаваторного вибою на продуктивність одноківшових екскаваторів присвячено значну кількість робіт, серед авторів яких — Л. Д. Шевяков, Н. В. Мельников, А. С. Красніков, К. Е. Віницький, А. С. Красніков, А. М.

Мустафіна [20, 25], Ф. Г. Дорошенко, Н. І. Смірнов [21], Б. А. Сімкін, Н. П. Сієнов [22], Н. І. Смірнов [23], В. Т. Маркелов [24], В. С. Хохряков [11] та інші дослідники. У цих роботах проблема розглядається як у загальному методологічному аспекті, так і в контексті конкретних виробничих умов на різних типах родовищ» [53].

«Частина робіт спрямована на вивчення впливу окремих параметрів вибою — зокрема, його ширини або висоти — на технічну продуктивність екскаваторів циклічної дії. Найбільш ґрунтовно комплексний вплив геометрії вибою на продуктивність машин досліджено в працях А. С. Краснікова та А. М. Мустафіної, де параметри розглядаються не ізольовано, а як взаємопов'язані фактори, що формують загальну структуру навантажувального процесу» [53].

«Для умов розробки як м'яких, так і скельних порід А. С. Красніков виконав аналітичне обґрунтування раціональних параметрів вибою. Його метою було визначити оптимальні параметри системи розробки при підготовці масиву до виїмки за допомогою однорядного миттєвого підривання. Запропонована ним раціональна ширина заходки враховує необхідність повного відвантаження розвалу за ціле число робочих проходів екскаватора — вимога, що була особливо актуальною в умовах застосування таких схем вибухової підготовки» [53].

«З появою багаторядного уповільненого підривання ця вимога втратила свою жорсткість, оскільки сучасні схеми відбійки забезпечують достатню рівномірність та порушеність масиву, що дозволяє екскаватору відпрацьовувати вибій без потреби у строго фіксованій кількості проходів» [53].

У працях А. М. Мустафіної вплив параметрів вибою на продуктивність одноківшових екскаваторів визначався графоаналітичними методами, після чого отримані залежності були

перевірені шляхом експериментальних досліджень на кар'єрах Соколовсько-Сарбайського ГЗК. Автором розроблено низку графічних залежностей, що дають змогу визначати ширину заходки, за якої екскаватор досягає максимально можливої продуктивності. Особливістю цих досліджень є їх практичний характер, оскільки вони виконані безпосередньо на виробництві, що забезпечило високу достовірність отриманих висновків.

У зарубіжній технічній літературі увагу привертає робота Clarc G. B. та Reiter G. L. [26], присвячена аналізу функціонування електричної мехлопати "Marion 5560" під час відпрацювання розкривних порід. Автори виконали детальні вимірювання тривалості окремих операцій робочого циклу та реєстрацію кутів повороту машини спеціальними приладами. Отримані результати свідчать, що структура витрат часу в межах циклу має такий розподіл:

- черпання — 43%;
- поворот у бік вибою та назад — 53%;
- розвантаження ковша — 4%.

Таким чином, більша частина часу циклу витрачається саме на поворотні операції екскаватора. Автори також навели графік залежності тривалості циклу від величини кута повороту, однак конкретних рекомендацій щодо оптимізації ширини заходки або раціонального кута повороту машин у статті не подано, що залишає подальші можливості для дослідження цих питань з урахуванням сучасних технологічних рішень та гірничотехнічних умов.

«Аналіз доступних зарубіжних публікацій показує, що більшість іноземних досліджень, присвячених роботі однокішових екскаваторів на вибоях складної конфігурації, мають переважно описовий характер і не містять узагальнених методик визначення технічно можливої продуктивності машин у кар'єрах зі складною будовою та крутопадними руйнівними структурами. На сьогодні відсутній науково

обґрунтований підхід, який би дозволяв встановлювати максимально досяжну продуктивність екскаваторів циклічної дії з урахуванням неоднорідних геометричних параметрів вибою, значного діапазону міцності руд і вміщуючих порід та особливостей формування розвалу після вибуху» [53].

У класичних роботах академіка В. В. Ржевського уперше було встановлено, що збільшення середнього діаметра шматка гірничої маси з 350 до 700 мм призводить майже до двократного зниження продуктивності екскаваторів. Дослідження професорів М. Ф. Друкованого, Е. І. Єфремова, В. М. Коміра та Б. Н. Тартаковського [27-29] переконливо показали, що для циклічної технології видобутку оптимальний гранулометричний склад повинен відповідати середньому діаметру шматка, близькому до 200 мм, оскільки саме за таких умов забезпечується мінімальна собівартість екскавації. Ці автори вважають, що для циклічно-потоківих схем розробки породи доцільно подрібнювати до середнього діаметра 150–200 мм, а частка фракцій понад 400 мм не повинна перевищувати 15%. Такі характеристики найбільш ефективно узгоджуються з роботою навантажувального, транспортного та дробильного обладнання.

«Результати роботи [30] демонструють високу чутливість продуктивності екскаваторів до зміни крупності породи. Зниження виходу негабариту з 1,4 до 0,3% забезпечило приріст продуктивності екскаватора на 24,6%. Для екскаватора ЕКГ-4 збільшення середнього діаметра шматка з 155 до 312 мм (удвічі) призводить до падіння продуктивності з 333 до 183 м<sup>3</sup>/год, тобто на 82%. Особливо наочні результати досліджень у ПГЗК, де зменшення середнього діаметра шматка в 2,4 раза зумовило зростання продуктивності екскаватора ЕКГ-4,6 у 2,5–3 рази та одночасне збільшення міжремонтного періоду машин у 1,5–2 рази. Ці дані підтверджують, що ефективність екскавації

прямо залежить не лише від фізико-механічних властивостей масиву, а й від якості вибухової підготовки» [53].

«Поглиблення подрібнення масиву позитивно відбивається і на роботі транспортних систем. Відповідно до [31-34], зменшення середнього діаметра шматка з 300 до 100 мм забезпечує приріст продуктивності автомобільного транспорту на 5–10% залежно від довжини плеча транспортування. Для залізничного транспорту ефект є ще значнішим: продуктивність локомотивопотягів зростає на 15–30%. У дослідженні [35] наведено показовий приклад: зменшення середнього діаметра шматка з 350 до 200 мм дозволило збільшити річну продуктивність залізничного складу з 1216 до 1724 тис. т, а собівартість транспортування знизити з 2,96 до 1,21 коп. за тонну» [53].

«Подальше підвищення однорідності кускового складу позитивно впливає на ефективність роботи дробильного обладнання. Дослідження [36-40] показують, що інтенсифікація подрібнення руди безпосередньо в кар'єрі спричиняє зростання продуктивності дробарок першої стадії з 1050 до 1490 м<sup>3</sup>/год при зменшенні середнього діаметра кусків з 400 до 200 мм. Крім того, зменшується кількість надвеликих шматків на заключних стадіях подрібнення, що позитивно впливає на роботу всієї технологічної лінії та сприяє зниженню аварійності й підвищенню ресурсу основного обладнання» [53].

«У роботі [40] попередньо розглянуто також вплив гранулометричного складу на процеси збагачення, зокрема на продуктивність млинів. Проте ці питання поки що не можна вважати достатньо вивченими, що підкреслює потребу у подальших ґрунтовних дослідженнях для визначення оптимальних параметрів вибухового подрібнення в умовах складних залізородних кар'єрів» [53].

«У практиці відкритої розробки рудних родовищ гостро постає питання визначення оптимальної інтенсивності вибухового

подрібнення. З одного боку, більш глибока фрагментація масиву істотно підвищує ефективність наступних технологічних операцій — навантаження, транспортування, дроблення та збагачення. З іншого — інтенсифікація вибухової підготовки неминуче супроводжується зростанням витрат на буровибухові роботи. У зв'язку з цим виникає необхідність пошуку такого ступеня подрібнення, який забезпечує мінімум сукупних витрат на одиницю готової продукції та оптимальний баланс між вибуховими і механічними процесами руйнування. Особливо це актуально для бідних руд, що потребують додаткового подрібнення перед збагаченням, оскільки саме якість вибухової підготовки визначає енергетичні витрати подальших стадій» [53].

«Досвід кар'єрів Кривбасу переконливо доводить [3, 11, 34, 40], що підвищення інтенсивності вибухового подрібнення приводить до комплексного ефекту: зростає продуктивність гірничотранспортного комплексу, підвищується пропускна здатність дробарок і млинів, знижується ступінь зношування робочих органів, зменшується аварійність і втрати часу на ліквідацію заторів або відсортування негабариту. Важливо також, що рівень фрагментації безпосередньо визначає потенційну виробничу потужність підприємства. Як обґрунтовує [3], саме інтенсивність вибухового руйнування виступає обмежувальним фактором у структурі гірничо-збагачувального циклу» [53].

«Практичні результати ПівдГЗК підтверджують сказане: зменшення вмісту фракції понад +300 мм із 80% до 30% забезпечило приріст видобутку руди з 1 км фронту робіт з 5,6 до 8,0 млн т/рік, тобто на 42,8%. Це наочно демонструє, що якісніша вибухова підготовка може істотно впливати на потенційну продуктивність кар'єру навіть за незмінних геометричних параметрів вибою та транспортної інфраструктури» [53].

«Суттєвий вплив крупнокускових фракцій на роботу навантажувального обладнання відзначено і в дослідженнях [38, 41]. Авторами встановлено, що збільшення частки шматків понад 100 см від 0 до 20% призводить до різкого падіння продуктивності: для ЕВГ-4,6 — на 67%, для ЕКГ-8 (ковш 6 м<sup>3</sup>) — на 55%. При цьому тривалість циклу збільшується у 1,7 та 1,3 раза відповідно. Це підкреслює, що саме негабарит є одним із головних дестабілізуючих чинників у роботі екскаваторів циклічної дії» [53].

«Спостереження показують, що після досягнення вмісту негабариту 14–16% продуктивність знижується особливо різко, а подальше збільшення цієї частки призводить до деградації продуктивності повільнішими темпами. Крім того, при частці великих шматків близько 15% ковш, як правило, наповнюється за одне черпання, тоді як при вмісті негабариту 25% і більше формується потреба у повторному черпанні, що збільшує тривалість операції та знижує технічний темп роботи екскаватора» [53].

«Коефіцієнт екскавації також демонструє чітку залежність від кількості крупнокускових фракцій. За вмісту негабариту до 22% він становить близько 0,48, тоді як при зростанні частки великих брил до 25–30% коефіцієнт може знижуватися до 0,32 [41]. Це свідчить про істотне зниження корисного об'єму черпання та збільшення частки холостих ходів, що комплексно зменшує добову продуктивність екскаватора» [53].

«Таким чином, інтенсивність вибухового подрібнення є одним з основних керованих факторів, що визначають ефективність усіх наступних ланок технологічного циклу. Розроблення методів вибору оптимальної ступені дроблення залишається одним із ключових завдань для підприємств Кривбасу, оскільки забезпечує одночасне підвищення продуктивності, зниження витрат та збільшення ресурсу основного гірничого обладнання» [53].

«Актуальні зарубіжні дослідження [41], виконані в кар'єрах різних типів, підтверджують жорстку кількісну залежність між характером вибухового подрібнення гірничої маси та продуктивністю екскаваторів» [53].



Рис. 1.1. Умови вивчення впливу кускуватості порід на продуктивність екскаватора (Індія)

«Як правило, ця залежність подається у вигляді графіків «тривалість циклу – годинна продуктивність» як функція середнього розміру шматка ( $X_{50}$ ) або розміру, що проходить крізь сито з вічком  $P_{80}$ . У більшості робіт показано, що при занадто крупній фракції зростає час черпання й кількість холостих рухів, а при надмірно дрібній – погіршується заповнення ковша та зростає частка рухів без суттєвого приросту корисного навантаження. У результаті формується типовий «опуклий» (U-подібний) характер кривих: існує інтервал оптимальних розмірів шматків, у якому продуктивність навантаження максимальна» [53].

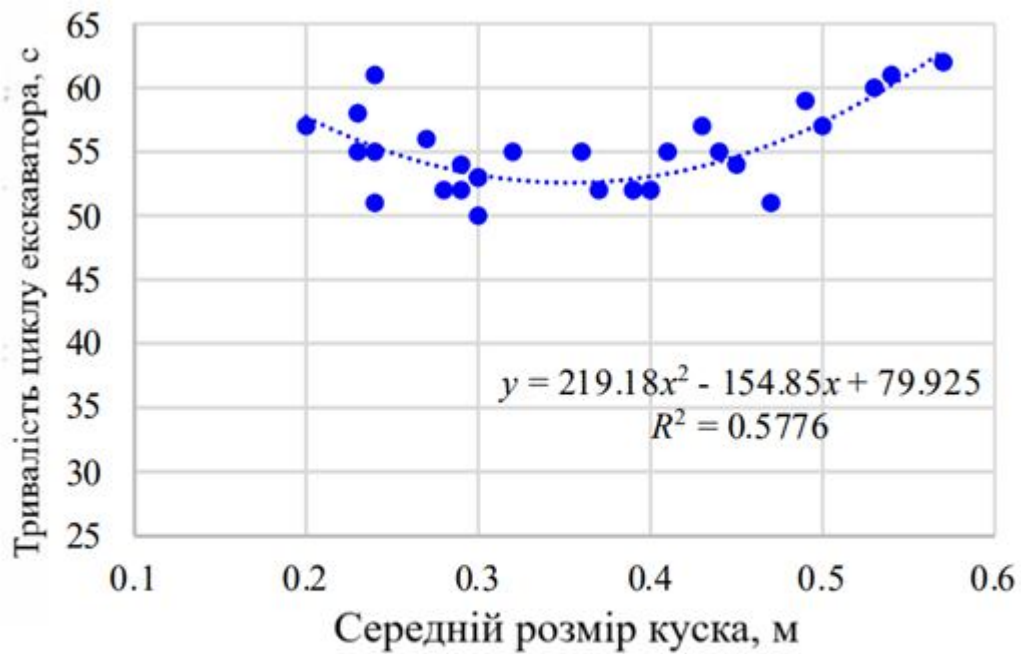


Рис. 1.2. Графік залежності тривалості циклу екскаватора від середнього розміра куска в розвалі (Індія)

«Аналогічна залежність в даному дослідженні отримана і для кута повороту екскаватора (рис. 1.3)» [53].

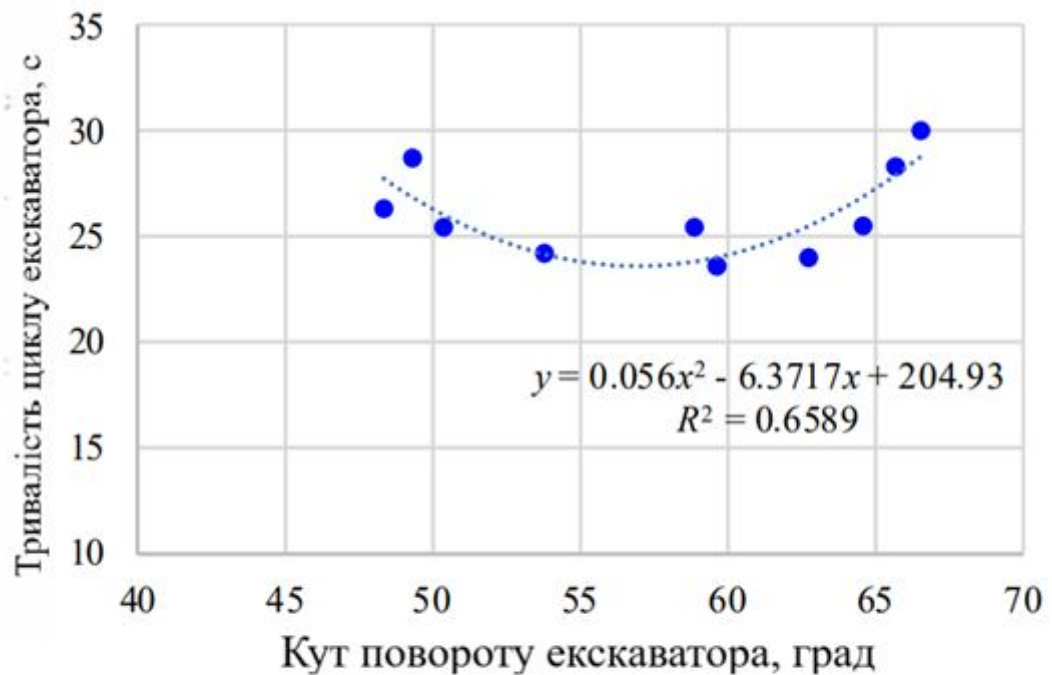


Рис. 1.3. Графік залежності тривалості циклу екскаватора від кута повороту екскаватора (Індія)

Показовим є польовий експеримент B.S. Choudhary у двох вугленосних розкривних кар'єрах (Індія), де для кожного вибуху виконували фотограмметричну оцінку фрагментації розвалу та хронометраж циклів роботи екскаватора (комбінація «екскаватор – автосамоскид»). Отримано графічні залежності середнього часу циклу екскаватора від середнього розміру шматка в розвалі. Для «кар'єру А» мінімальна тривалість циклу досягається при  $X_{50} \approx 0,30-0,45$  м, для «кар'єру В» – при  $X_{50} \approx 0,15-0,20$  м; відхилення в бік грубішого чи дрібнішого подрібнення призводять до монотонного збільшення тривалості циклу та відповідного падіння годинної продуктивності навантаження [41]. У ряді робіт застосовано регресійні та напівемпіричні моделі, де продуктивність екскаватора або тривалість циклу описується через параметри гранулометричної кривої. Так, для умов залізорудного кар'єру Gol-e-Gohar (Іран) було запропоновано рівняння, у якому продуктивність роторного екскаватора описується функцією  $d_{50}$ ,  $d_{80}$  та показника однорідності  $n$ ; аналіз отриманих графіків показав, що збільшення  $P_{80}$  за межі 0,3–0,4 м призводить до помітного (20–40 %) зменшення продуктивності при незмінних інших факторах [42].

«Узагальнення наявних польових і модельних результатів, виконане Dotto та Pourrahimian, демонструє, що зменшення середнього розміру шматків з 0,6 до 0,2 м може скорочувати час черпання орієнтовно на 20–30 %, що на графіках проявляється як крутий спад кривої «час циклу –  $X_{50}$ » у діапазоні дрібнішого подрібнення [43]» [53].

Для великих залізорудних кар'єрів типу Aitik (Швеція) встановлено «цільовий» інтервал залишкової фрагментації, який одночасно забезпечує високу ефективність навантаження рудної маси екскаваторами та стабільну роботу крупнодисперсних дробарок. Емпіричний аналіз, виконаний на базі фотозйомки завантаження у

приймальну горловину дробарки та статистики роботи канатних екскаваторів, показав різке падіння ефективності при  $P_{80} > 0,8$  м та найкращі показники для інтервалу  $P_{80} \approx 0,6-0,8$  м. Відповідні графічні залежності демонструють «плато» підвищеної продуктивності в межах цього інтервалу та стрімкий спад при грубішому подрібненні [44].

«Окрему групу становлять дослідження гідравлічних екскаваторів, де, крім розміру шматків, враховуються фізико-механічні властивості подрібненої гірської маси та геометрія уступу. На основі натурних вимірювань і багатофакторного аналізу показано, що збільшення частки надто крупних фракцій (понад 400–500 мм) веде до росту частки «проблемних» черпань із неповним заповненням ковша або додатковою підчисткою вибою. Водночас надлишок дрібних фракцій погіршує зчеплення та стабільність купи, що також збільшує час маневрування робочого обладнання. Отримані авторами графіки демонструють оптимальний інтервал середнього розміру шматка, в якому зміни гранулометричного складу вже не дають істотного виграшу в продуктивності, але при виході за його межі продуктивність екскаватора стрімко знижується [45]» [53].

Узагальнюючи наведені результати, можна стверджувати, що сучасна зарубіжна література розглядає фрагментацію як один із ключових керованих факторів продуктивності навантажувальних екскаваторів. Типовими є графічні залежності, де тривалість циклу та годинна продуктивність подаються як функція  $X_{50}$  або  $P_{80}$  розвалу; зазвичай виявляється технологічно доцільний інтервал середнього розміру шматка порядку 0,15–0,45 м для масових вибухів у скельних породах, у межах якого досягається максимальний коефіцієнт екскавації при мінімальній тривалості циклу. При проектуванні параметрів буровибухових робіт у глибоких кар'єрах цей інтервал доцільно використовувати як цільовий діапазон фрагментації саме з

позицій ефективності виймально-навантажувальних операцій, а не лише подальшого дроблення та збагачення [46].

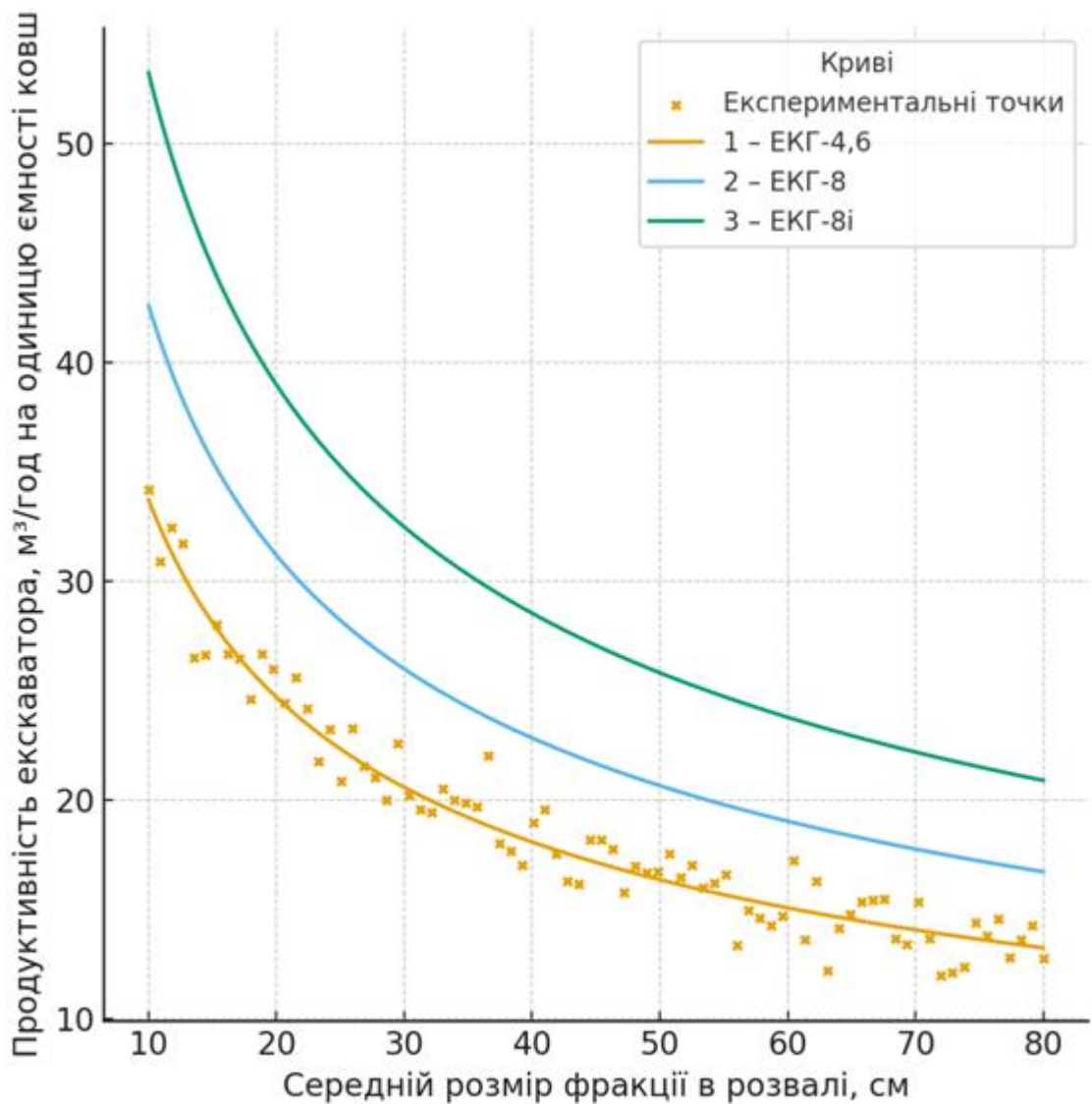


Рис. 1.4. Залежність годинної продуктивності екскаватора на 1 м³ ємності ковша від процентного виходу фракції

«Аналіз графічних залежностей переконливо свідчить, що інтенсивність роботи екскаваторів у значній мірі визначається співвідношенням дрібних та крупних фракцій у вибухороздрібненій гірничій масі. Використання методів кореляційно-регресійного аналізу дало змогу одержати кількісні моделі, які описують годинну продуктивність екскаваторів типу ЕКГ-4 та ЕКГ-4,6, нормовану на

одиницю місткості ковша, через спектр гранулометричних характеристик розвалу» [53].

«Отримані статистичні залежності засвідчили, що найвагомим фактором, який формує інтенсивність циклу навантаження, є частка дрібної фракції розміром менше 40 см: її внесок у загальну варіацію продуктивності перевищує 55%. Збільшення вмісту уламків розміром до 60 см також сприяє зростанню темпу черпання, тоді як присутність шматків, що перевищують 60 см, чинить однозначно негативний вплив, приводячи до зростання кількості холостих рухів, втрат у коефіцієнті заповнення ковша та загального зниження виробітку [40]» [53].

Оскільки у практиці гірничих робіт для оцінювання характеристик вибою традиційно використовують середній розмір шматка або частку окремої фракції, було виконано порівняльний аналіз впливу цих параметрів на продуктивність навантажувального обладнання. Встановлено, що інтегральні показники (наприклад, середній діаметр фрагментів) гірше відображають справжню специфіку умов роботи, ніж безпосередній вміст дрібних фракцій. Саме тому продуктивність екскаваторів виявилася суттєво більш чутливою до зміни об'єму фракції –40 см, ніж до середнього розміру шматка чи відсотка більших класів крупності [40].

Додаткові спостереження та енергетичні оцінки циклу черпання показують, що зі збільшенням частки негабаритних уламків різко зростає енергоємність екскавації. Це пов'язано зі збільшенням часу маневрування робочого органа, необхідністю повторного підбирання вибою та зменшенням корисного завантаження ковша у кожному робочому циклі [41].

У низці досліджень [40-43] встановлено аналітичний зв'язок між продуктивністю кар'єрних екскаваторів і гранулометричним складом розвалу. Особливо важливо, що автори [40] запропонували модель,

яка враховує повну гранулометричну криву, а не узагальнювальні показники на кшталт середнього діаметра шматка, що забезпечує значно точніше відтворення реальних умов роботи. Використання цієї моделі для типового гранскладу кар'єрів Кривбасу та Полтавського ГЗК показує, що варіації продуктивності екскаваторів у межах  $\pm 1,5$ – $3,5\%$  можуть бути пояснені природними коливаннями гранулометрії вибухового розпушення. Для цих родовищ характерний такий склад: фракція 0–400 мм становить у середньому 70–80%, тоді як об'єм уламків понад 400 мм змінюється в діапазоні 20–30%.

«У результаті детальних хронометражних спостережень, проведених А. Є. Казангаповим та А. Є. Куттибаєвим [47], встановлено, що якість вибухового дроблення порід є визначальним чинником, який формує ступінь заповнення ковша екскаватора. Із погіршенням фрагментації масиву коефіцієнт наповнення ковша невідворотно зменшується, що зумовлено зростанням коефіцієнта розпушення — інтегрального параметра, який характеризує структурний стан породи після вибуху та умови її взаємодії з робочим органом екскаватора» [53].

«Дослідники встановили, що у породах різних категорій за підриваністю продуктивність екскаватора може змінюватися майже двократно залежно від фактичного ступеня розпушення масиву. Для порід легкої вибухової руйнівності характерний режим роботи, близький до технічно досяжної межі — час екскаваційного циклу мінімізується, а стабільність процесу навантаження досягає найвищого рівня. У складнорозривних породах формуються найбільш несприятливі умови для навантаження: збільшується частка неповних черпань, зростає кількість коригувальних маневрів та повторних операцій, а тривалість циклу суттєво перевищує технічно оптимальний рівень [47]» [53].

«Значна кількість досліджень присвячена вивченню того, як кускуватість гірничої маси впливає на тривалість циклу екскавації, на ефективність використання ковша екскаватора та кузова автосамоскида, а також на трудомісткість формування вибою, усунення негабаритів і кількість аварійних зупинок обладнання, що безпосередньо впливає на втрати робочого часу. Зростання крупної фракції у розвалі призводить не лише до збільшення часу наповнення кузова, а й до зміни коефіцієнтів розпушення та заповнення породи в автосамоскиді, що знижує використання номінальної вантажопідйомності рухомого складу. Таким чином, гранулометрична структура вибою формує не лише виробіток екскаватора, а й визначає тривалість повного транспортного циклу автомобільного транспорту [41]» [53].

«У ході узагальнення експериментальних матеріалів встановлено, що максимальна інтенсивність процесу навантаження досягається за умови:

$$\frac{B_k}{d_{cep}} \leq 11 \quad (1.1)$$

В той же час наступна умова забезпечуватиме мінімум витрат на підготовку порід:

$$\frac{B_k}{d_{cep}} \leq 6.5 \quad (1.2)$$

Показовим результатом узагальнення наявних досліджень є те, що всі вони підтверджують існування стійкої закономірності: продуктивність автосамоскидів у циклі «екскаватор–автомобіль» безпосередньо залежить від гранулометричної структури підірваної гірничої маси. Зміна кускуватості спричиняє варіації тривалості як навантажувальних операцій, так і всього транспортного рейсу, що проявляється у зміні фактичної продуктивності автотранспорту» [53].

Коректне дослідження цього впливу можливе лише за умови врахування комплексу технологічних і трасологічних параметрів, серед яких — довжина транспортного плеча, середньозважений поздовжній ухил, вантажопідйомність рухомого складу, а також узгодженість об'ємів кузова автосамоскида та ковша екскаватора. Зазначені фактори формують реальний режим роботи автотранспорту та визначають його чутливість до змін у фракційному складі вибою.

Нестача глибоких експериментальних і модельних досліджень у цьому напрямку призвела до того, що широко застосовувані методики розрахунку продуктивності кар'єрного автотранспорту враховують якість підготовки гірничої маси лише на наближеному рівні. Такий спрощений підхід зумовлює похибки при розробленні планів транспортування, нормуванні робочого часу та визначенні раціональної чисельності автосамоскидів. У зв'язку з цим виникла потреба у глибокому аналітичному вивченні впливу гранулометричного складу, транспортних характеристик траси та параметрів взаємодії «екскаватор–автосамоскид» на фактичний виробіток автотранспорту.

«Для аналітичного опису процесу навантаження відома низка розрахункових залежностей, що дозволяють визначити коефіцієнт екскавації ( $K_e$ ) та тривалість циклу навантаження ( $t_{\text{ц}}$ ) за умови зміни кускуватості гірничої маси. Ці формули стали основою для подальших досліджень, оскільки дають змогу кількісно оцінити вплив фракційного складу розвалу на ключові параметри продуктивності навантажувально-транспортного комплексу.

$$K_e = 0.9 - \frac{4}{C^2 + 1} \quad (1.3)$$

$$t_{\text{ц}} = 5.5\sqrt{\varepsilon_{r.k.}} + 0.1\beta_e + K_c^{25} \quad (1.4)$$

Комплексний аналіз процесу навантаження показує, що за фіксованої геометрії розвалу ключовими чинниками, які визначають режим та результативність черпання екскаватора, є коефіцієнт заповнення ковша та характеристика крупних уламків, зокрема частка негабаритних брил. Узагальнені результати експериментальних досліджень свідчать: зі зниженням якості вибухового подрібнення гірської породи коефіцієнт наповнення ковша неминуче падає, що зумовлює зменшення фактичного виробітку машини» [53].

«Після вибухового руйнування масиву утворюється дисперсна суміш уламків різної геометрії, розмірності та міцності, і тому якість дроблення оцінюють цілою системою показників — від параметрів окремого шматка до характеристик фракційного складу та інтегральних критеріїв, що відображають поведінку розвалу під час взаємодії з робочим обладнанням. Сучасні вимоги до вибухової підготовки передбачають формування такого гранулометричного складу, який забезпечує максимально ефективне використання навантажувальних машин, зокрема мінімізацію неповних черпань, повторного маневрування та збільшених енергетичних витрат» [53].

«У цьому контексті особливої уваги потребує змінна продуктивність екскаватора, яка визначається залежністю, наведеною у [47]. Саме ця формула дозволяє з урахуванням реального стану розвалу — його кускуватості, неоднорідності та особливостей розміщення фракцій — обчислити фактичний виробіток за одиницю часу та встановити межі його коливань у різних гірничо-технічних умовах.

$$Q_e = \frac{3600E}{t_{II}} T_{3M} K_B \quad (1.5)$$

де  $T_{3M}$  – тривалість зміни, год;

$K_B$  – коефіцієнт використання екскаватора у часі» [53].

«Узагальнення результатів натурних досліджень та аналітичних розрахунків свідчить, що фактична продуктивність навантажувального обладнання формується трьома групами чинників: тривалістю робочого циклу, технічними параметрами екскаватора та організаційними умовами виконання робіт. Структура циклу включає операції черпання, повороту і розвантаження, причому дві останні є технологічно стабільними та, як правило, визначаються конструктивними можливостями машини та професійною майстерністю машиніста. Натомість час черпання є величиною змінною і найбільш чутливою до властивостей вибухороздрібною гірничої маси» [53].

«Позиція більшості дослідників [3, 27, 40, 47] полягає в тому, що тривалість циклу головним чином залежить або від середнього розміру фрагментів у розвалі, або від частки негабаритних брил. Проте вивчення гранулометричних характеристик підірваної гірничої маси продемонструвало, що жоден з цих параметрів окремо не може бути універсальним критерієм. Аналіз показує, що за однакового середнього діаметра уламків фактичний вміст окремих фракцій може істотно відрізнятись (рис. 1.5), що пояснюється складною формою кривої розподілу та різною дисперсністю гранулометричного складу» [53].

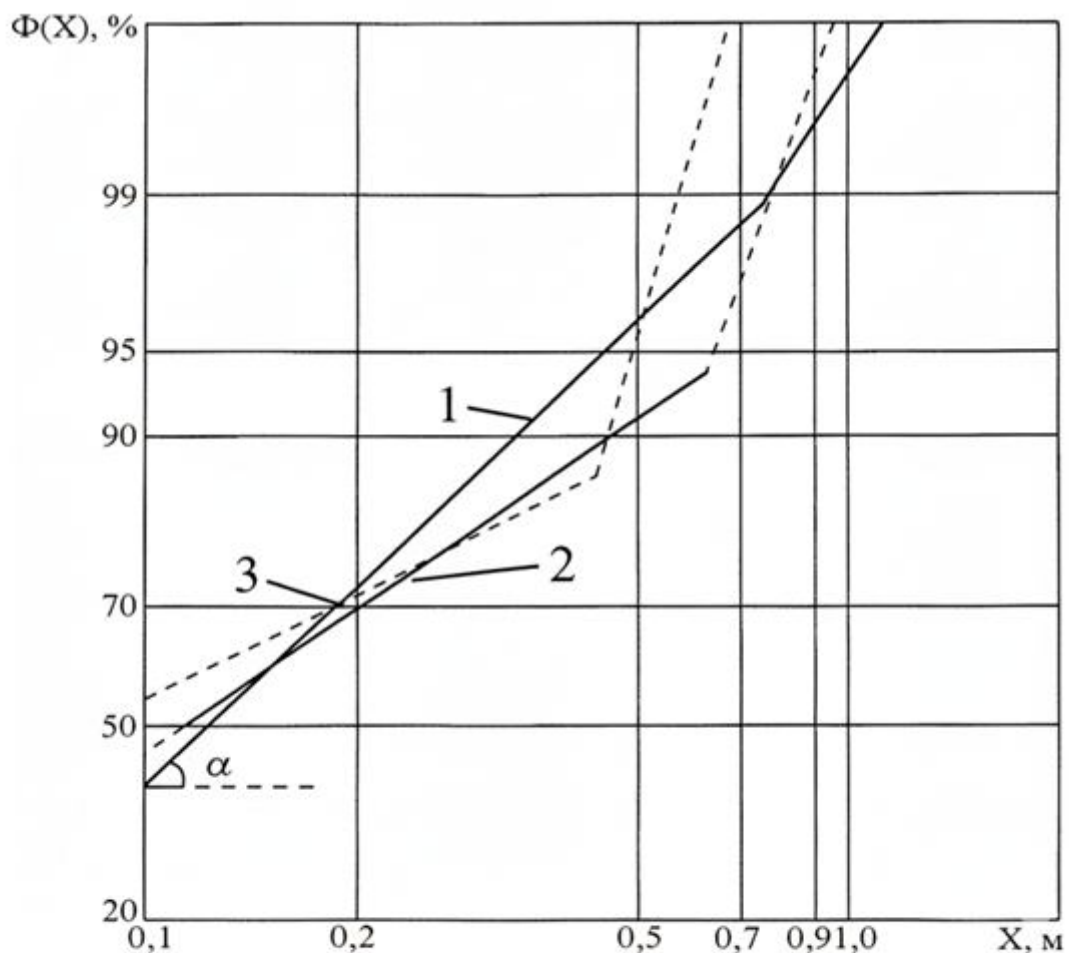


Рис. 1.5. Градація розподілу кусків підірваної маси для середнього розміра шматка 0,2 м при різних значеннях  $\beta$ : 1 – 0,84; 2 – 1,19; 3 – 1,7

«У кар'єрних умовах, де міцність порід за шкалою проф. М. М. Протодьяконова змінюється в межах 6–18, а тріщинуватість здебільшого відповідає II–IV категоріям, після вибуху формується широкий спектр фракцій. За даними натурних вимірювань середній розмір уламків коливався у діапазоні 0,1–0,65 м, тоді як логарифмічна дисперсія — у межах 0,8–1,73. Проведені хронометражні спостереження дали змогу визначити залежності зміни часу черпання і повного циклу екскавації від середнього розміру фрагментів для різних значень дисперсії (рис. 1.6)» [53].

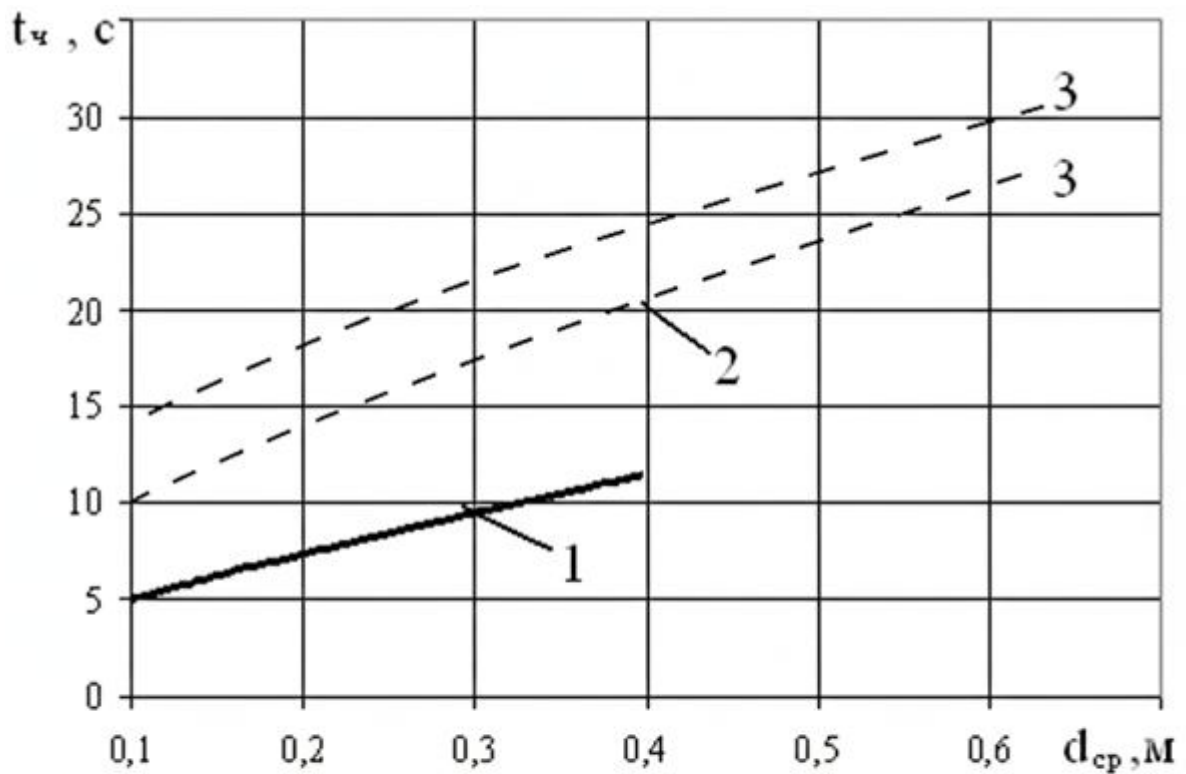


Рис. 1.6. Залежність тривалості забору породу ковшем від розміру куска в розвалі для різних значень логарифмічної дисперсії: 1 - 0,8; 2 - 1,0; 3 - 1,30

«Отримані результати чітко демонструють залежність між тривалістю навантаження та лінійним розміром шматків гірничої маси. Головним чинником збільшення часу роботи екскаватора є зростання опору врізанню ковша у крупнокускувату гірничу масу, що має розподіл, описуваний логарифмічною дисперсією. Чим більша неоднорідність та крупність фрагментів, тим більше енергії та часу витрачається на формування черпання, що безпосередньо знижує продуктивність екскаватора» [53].

«Подальші розрахунки змінної продуктивності (рис. 1.7), виконані для 8-годинної зміни, підтвердили цей висновок [47]» [53].

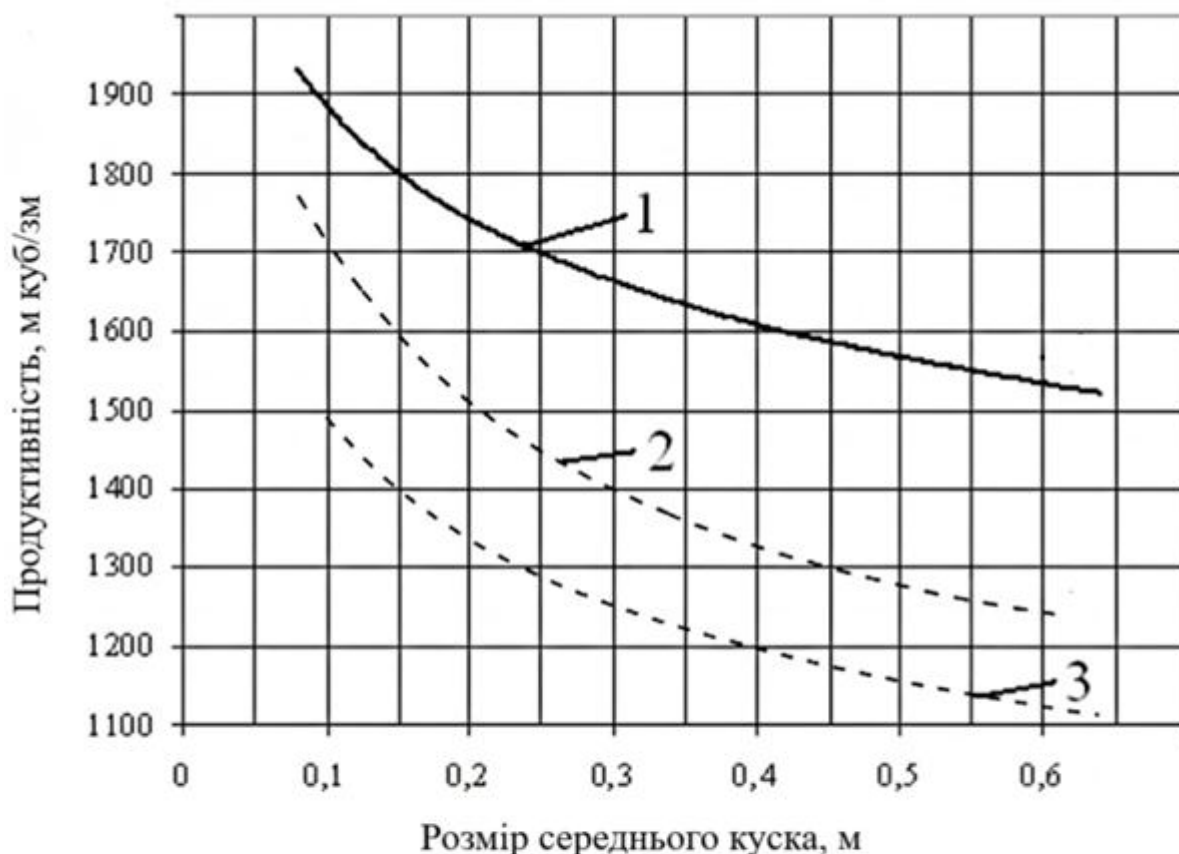


Рис. 1.7. Графік взаємозалежностей змінної експлуатаційної продуктивності ЕКГ-5А для змінного розміру середнього куска при логарифмічній дисперсії: 1 - 0,8; 2 - 1,0; 3 - 1,3

«За однакового середнього розміру шматка, але різної логарифмічної дисперсії гранулометричного розподілу, продуктивність екскаватора може відрізнятись на 10–20%. Це свідчить про те, що саме форма гранулометричного розподілу, а не лише середня величина фрагментів, визначає реальне навантажувальне зусилля та часові витрати циклу» [53].

### **Висновки до розділу**

«У результаті аналізу наукових джерел та експериментальних даних встановлено, що ефективність роботи екскаваторів циклічної дії є похідною від комплексу експлуатаційних умов, які формують реальне навантаження на машини та визначають їхню продуктивність у

виймально-навантажувальному циклі. Найістотнішими серед таких умов є:

### 1. Гранулометричний склад підірваної маси

Вміст дрібних і крупних фракцій у забої виступає ключовим експлуатаційним чинником. Доведено, що:

- збільшення частки дрібних фракцій (до 40 мм) підвищує коефіцієнт наповнення ковша та скорочує час черпання;
- зростання вмісту фракцій +60...+400 мм різко погіршує умови врізання ковша й збільшує тривалість циклу;
- наявність негабаритів (>600 мм) призводить до втрат часу, додаткових операцій із розбирання вибою та зниження коефіцієнта використання машини» [53].

«Отже, якість подрібнення порід безпосередньо визначає умови роботи екскаватора, а зміна гранулометричного складу здатна варіювати продуктивність у межах 1,5–3 разів.

### 2. Міцність, тріщинуватість і структура порід

Хронометражні спостереження показали, що екскаватори працюють з різною ефективністю залежно від:

- категорії порід за міцністю (від 5 до 20 за шкалою Протодьяконова),
- ступеня тріщинуватості,
- орієнтації шаруватості щодо фронту черпання.

Сукупність цих факторів визначає опір при заповненні ковша і темп його занурення, що є основою технологічної продуктивності» [53].

### 3. Геометрія вибою та параметри розвалу

«З'ясовано, що:

- висота й ширина вибою,
- нерівність поверхні розвалу,
- локальні концентрації крупних уламків

створюють змінні умови черпання навіть у межах одного уступу. Це формує різну циклічність екскавації та впливає на стабільність навантаження автосамоскидів.

#### 4. Вплив експлуатаційних умов на технічний стан обладнання

У роботах багатьох авторів зазначено, що складні умови черпання (висока кускуватість, недостатнє розпушення, наявність монолітних брил):

- підвищують ударні навантаження на стрілу, ковш і рукоять,
- прискорюють зношування ріжучих кромок,
- підвищують частоту відмов та позапланових зупинок.

Таким чином, експлуатаційні умови визначають не тільки продуктивність, а й ресурс та надійність екскаваторів» [53].

#### 5. Сукупний системний ефект

«Проведений аналіз підтвердив, що умови експлуатації екскаваторів мають системний характер, оскільки їхній вплив передається на:

- тривалість циклу навантаження,
- коефіцієнт заповнення автосамоскидів,
- інтенсивність роботи транспорту,
- продуктивність дробильного та збагачувального обладнання.

Комплекс проведених досліджень однозначно підтверджує, що ефективність виймально-навантажувальних робіт залежить у першу чергу від експлуатаційних умов роботи екскаваторів, серед яких домінують: гранулометричний склад гірничої маси, фізико-механічні властивості порід та геометрія вибою. Ці фактори визначають продуктивність, рівень зношування обладнання, стабільність технологічного циклу та економічні показники процесу виймально-навантажувальних робіт» [53].

## **РОЗДІЛ 2 ВПЛИВ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВИБУХОВОГО ДРОБЛЕННЯ НА ПОКАЗНИКИ РОБОТИ ВИЙМАЛЬНО-НАВАНТАЖУВАЛЬНОГО КОМПЛЕКСУ КАР'ЄРУ**

### ***2.1 Взаємозв'язок параметрів буровибухової підготовки гірничої маси з ефективністю функціонування гірничотехнічного комплексу***

Емпіричною базою дослідження стали гірничі підприємства Криворізького залізрудного басейну, зокрема кар'єри провідних гірничо-збагачувальних комбінатів. Основний масив аналітичних даних отримано на кар'єрі Південного ГЗК, який може слугувати типовим прикладом для регіону завдяки складній геологічній будові, значній варіабельності фізико-механічних характеристик порід та високому ступеню неоднорідності залізрудних покладів.

Особливістю технологічної схеми цього кар'єру є використання комбінованої транспортної системи, що поєднує автомобільні та залізничні засоби для переміщення гірничої маси.

Початковий етап — дезінтеграція гірських порід у масиві — формує вихідні параметри гірничої маси, від яких безпосередньо залежить ефективність усіх наступних технологічних операцій.

Способи забезпечення комплексу вимог, що висуваються до буровибухових робіт — у тому числі взаємно суперечливих — визначаються передусім властивостями гірських порід щодо їх руйнування та геометрією вибою. Пріоритетним завданням є досягнення необхідних показників якості підготовленої гірничої маси, зокрема оптимальної кускуватості та достатнього ступеня розпушення. Це потребує обґрунтованого вибору технологічних і організаційних рішень, серед яких:

- визначення типу та інтенсивності вибухового впливу;

- встановлення раціональних параметрів свердловинного буріння (діаметр, глибина, орієнтація, кут нахилу, величина перебуру);
- вибір схеми просторового розміщення свердловин на уступі;
- конструювання зарядів вибухових речовин відповідної маси та конфігурації;
- формування порядку ініціювання та вибору схеми підривання;
- організація виконання вибухових робіт з урахуванням умов конкретного уступу.

Комплексність цих рішень забезпечує досягнення необхідних технологічних показників та узгодження вимог до кінцевої якості гірничої маси.

Якість результатів буровибухових робіт визначається сукупністю параметрів, що відображають характер руйнування масиву порід: ступенем та однорідністю фракційного складу відбитої гірничої маси, часткою негабаритних блоків, станом підшви уступу після вибуху, а також просторовими параметрами розвалу.

Оскільки вибух є початковою ланкою у виробничому циклі відкритої розробки, його результати формують передумови для ефективності всіх подальших технологічних операцій — навантаження, транспортування, дроблення та збагачення корисної копалини.

Ступінь дроблення гірничої маси після вибуху описується комплексом кількісних параметрів, що відображають гранулометричну структуру розвалу. До основних з них належать:

1. Характерний розмір фрагментів у розвалі, який визначають за середнім діаметром шматків;
2. Частка дрібнозернистої компоненти у відбитій породі (фракції менше 40 см), що оцінюється у відсотках;
3. Вміст крупногабаритних уламків, кількість яких подають у відсотковому співвідношенні;
4. Коефіцієнт дроблення, що відображає ефективність вибухового руйнування та визначається як відношення середнього

розміру природних окремоностей у масиві до вибуху до середньої величини фрагментів у розвалі після вибуху.

Усі перелічені аспекти вибухового руйнування перебувають у тісній взаємодії та часто виявляють протилежні тенденції, тому їх неможливо визначати ізольовано один від одного. Через значну мінливість геологічних умов і складність їх взаємного впливу, після вибору загальної схеми висадження параметри підричних робіт у конкретних виробничих ситуаціях потребують уточнення на основі практичних спостережень і експериментальних даних. Такий підхід забезпечує узгодження режимів вибуху з вимогами подальших технологічних операцій і сприяє оптимізації загальної ефективності виробничого процесу.

Поява негабаритних фрагментів у вибоях істотно ускладнює виконання подальших технологічних операцій і підвищує їхню собівартість, незалежно від середнього розміру уламків. Тому параметри вибуху необхідно визначати таким чином, щоб забезпечити мінімізацію або повну відсутність утворення негабариту.

Ігнорування впливу додаткових геолого-технологічних чинників, а також прагнення зменшити витрати на буріння й вибухові речовини часто призводять до утворення негабаритних блоків у кількості 1–3 % від загального об'єму зруйнованої маси. Зростання цього показника понад зазначений рівень є індикатором неякісного проєктування або неадекватного вибору параметрів буровибухових робіт.

Недостатньо однорідне дроблення гірничої маси після вибуху, зокрема збільшена частка негабаритних кусків, істотно обмежує продуктивність навантажувального обладнання. Унаслідок цього виникають вимушені перерви в роботі екскаваторів, що спричиняє простої транспортних засобів у зоні навантаження та, відповідно, призводить до зниження ефективності транспортної системи кар'єру.

За результатами аналізу фракційного складу гірничої маси на кар'єрі ПівдГЗК встановлено, що частка негабаритних уламків складає:

у рудній масі вона не перевищує 0,15 %, тоді як у породах розкриву сягає приблизно 0,6 %.

Вартісні показники розробки родовища істотно залежать від того, яким є фактичний рівень дроблення порід після вибуху. Разом із тим надмірне підвищення ступеня їх руйнування потребує збільшених витрат на виконання буровибухових операцій, що може негативно позначатися на загальній економічній ефективності. Тому вибір способів посилення вибухового впливу на гірські породи повинен спиратися на комплексне техніко-економічне обґрунтування [48].

Ефективність системи буровибухової підготовки на кар'єрах зазвичай оцінюють на основі критерію мінімізації сумарних витрат, у які включають витрати на основні етапи технологічного циклу: буріння свердловин, проведення підривання, навантаження підготовленої гірничої маси, її транспортування та подальше вторинне дроблення.

Витрати на окремі технологічні операції суттєво зумовлюються ступенем дроблення гірничої маси. Зокрема, у процесах буріння та вибуху рівень витрат визначається питомою кількістю вибухових речовин, що витрачаються на руйнування порід. Цей показник формується під впливом комплексу чинників: параметрів буровибухових схем, фізико-механічних характеристик порід та прийнятої технології проведення вибухових робіт.

Витрати, пов'язані з виконанням екскаваційних робіт та операцій вторинного дроблення, безпосередньо залежать від ступеня подрібнення гірничої маси після вибуху. Одночасно продуктивність екскаваторів суттєво впливає на величину транспортних витрат при переміщенні видобутої породи.

На рисунку 2.1 наведено аналітичну залежність, що відображає зміну питомих витрат на виймання 1 м<sup>3</sup> гірничої маси за різних рівнів її дроблення після вибуху, отриману для виробничих умов Сибайського кар'єру [48].

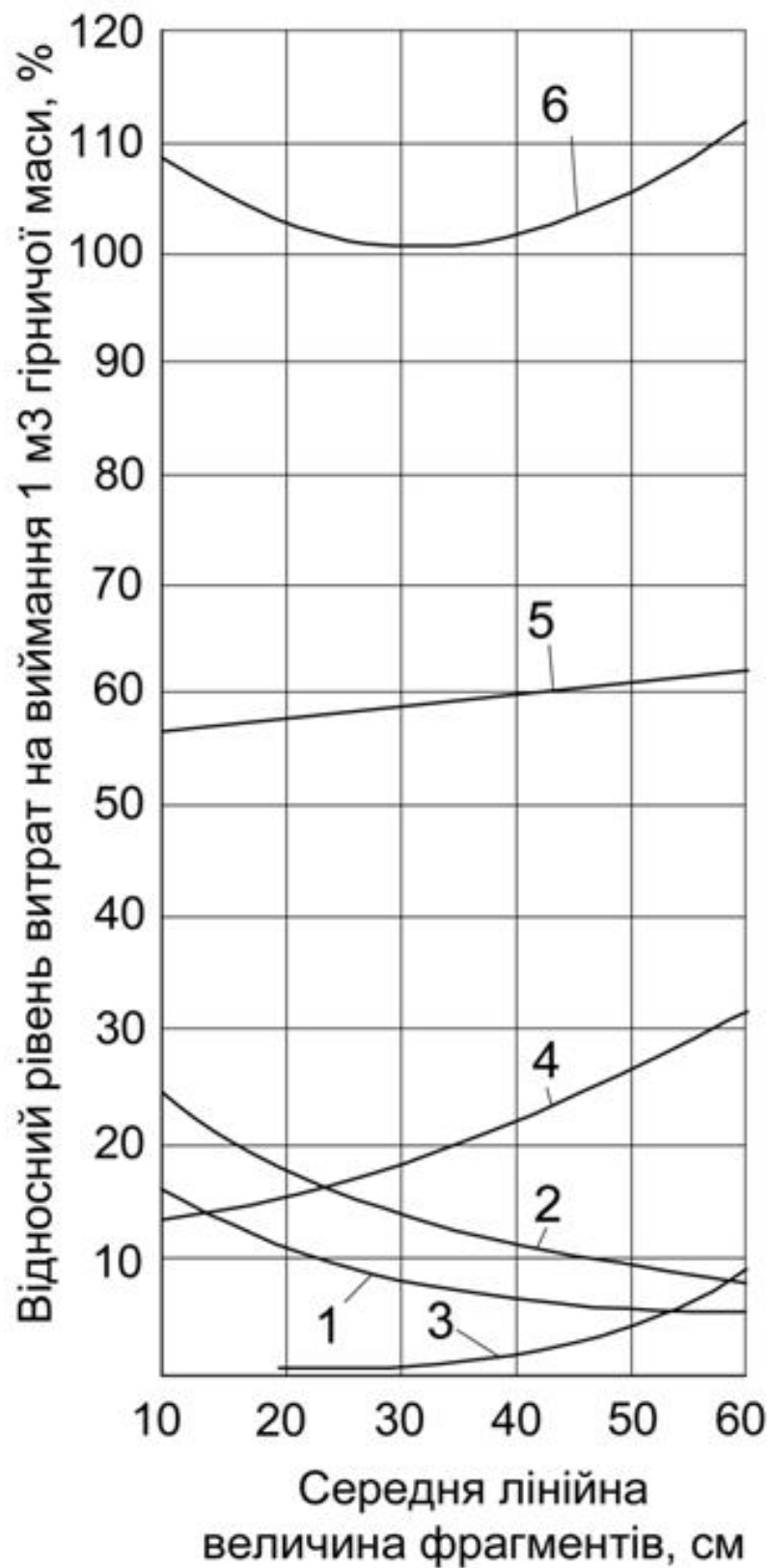


Рис. 2.1. Зміна питомих витрат на розробку 1 м<sup>3</sup> гірничої маси залежно від ступеня її дроблення: 1 — буріння; 2 — підривання; 3 — вторинне подрібнення; 4 — екскавація; 5 — транспортування; 6 — сумарні витрати

Для обґрунтованого вибору способів підвищення ефективності вибухового дроблення скельних порід необхідно мати всебічне уявлення про потенціал кожного з можливих технологічних підходів, а також про те, як зміна ключових параметрів буровибухових робіт впливає на гранулометричний склад відбитої маси. Водночас невід'ємною складовою оцінювання їх результативності є визначення кількісних зв'язків між якістю підготовленої гірничої маси та продуктивністю гірничотранспортного обладнання, оскільки саме ці залежності формують реальний техніко-економічний ефект від удосконалення вибухових процесів [1].

Однією з вагомих прикладних задач є встановлення кількісних закономірностей, що відображають вплив ступеня дроблення гірничої маси на продуктивність навантажувальних машин.

Вплив якості дроблення гірничої маси на продуктивність транспортних засобів проявляється не безпосередньо, а через зміну технічної та оперативної продуктивності екскаваторів, які формують параметри потоку гірничої маси для подальшого транспортування.

У сучасних умовах розробки залізородних родовищ, де для транспортування видобутої гірничої маси застосовують автомобільні та залізничні схеми переміщення, ключову роль у здійсненні вантажних операцій відіграють екскаватори циклічної дії.

Багаторічні спостереження за роботою екскаваторів циклічної дії свідчать, що їхня фактична продуктивність та ступінь завантаженості визначаються комплексом чинників, причому інтенсивність впливу кожного з них варіює залежно від конкретних виробничих умов.

Широко застосовуване у гірничій практиці аналітичне співвідношення слугує базовим інструментом для розрахунку продуктивності екскаваторів циклічної дії:

$$Q_{екс} = \frac{3600 \cdot E \cdot K_e}{t_u} T_{зм} k_{вук}, \text{ м}^3/\text{зм} \quad (2.1)$$

Структура показників, що визначають ефективність роботи екскаваторного обладнання, формується під впливом багатьох технологічних і організаційних чинників. Зокрема, значення коефіцієнта екскавації суттєво змінюється залежно від крупності кусків породи та висоти вибою. Тривалість робочого циклу екскаватора визначається комплексною дією таких параметрів, як кусковатість та міцність гірських порід, їхній кут падіння, а також ширина екскаваторної західки.

Коефіцієнт використання машин у часі формується переважно організаційними факторами, ефективність яких прямо пов'язана з рівнем оперативного й поточного планування та якістю загальної організації виймально-навантажувальних і транспортних процесів.

Ступінь кускуватості гірничої маси істотно впливає на параметри роботи навантажувальної техніки. Зокрема, зміна гранулометричного складу визначає величину коефіцієнта наповнення ковша та ступінь розпушення породи, що безпосередньо формує значення коефіцієнта екскавації. Окрім цього, гранулометрична неоднорідність породи позначається на тривалості операції черпання, яка становить суттєву частину загального робочого циклу.

Наявність у вибуховідбитій масі великих негабаритних фрагментів призводить до збільшення часу циклу, оскільки такі шматки потребують додаткового переміщення або видалення із зони зачерпування. У практиці трапляються ситуації, коли негабарит заклинюється всередині ковша, що змушує машиніста зупинити робочий процес і витратити додатковий час на його усунення.

За умов, коли частка негабаритних фракцій у гірничій масі становить до 15 %, заповнення ковша зазвичай відбувається за один черпальний цикл. Однак при збільшенні вмісту негабаритів до близько 25 % для досягнення необхідного ступеня наповнення ковша екскаватору вже потрібно виконувати повторне черпання [48].

Поліпшення ступеня дроблення гірничої маси безпосередньо впливає на ритмічність роботи транспортних засобів, зменшуючи їхні простой під час завантаження. Дослідження показують, що при зменшенні середнього розміру фрагментів у розвалі породи зі 100 до 50 см тривалість циклу завантаження автосамоскидів вантажопідйомністю 40 т екскаваторами типу ЕКГ-4,6 скорочується майже у 1,8 раза. За таких умов підвищується й коефіцієнт використання автомобільного транспорту — з 0,65 до 0,70 [49].

Аналогічна закономірність спостерігається і для різних видів гірничого транспорту: зі зростанням їхньої паспортної та фактичної продуктивності посилюється чутливість технологічного процесу до ступеня подрібнення гірничої маси, що безпосередньо позначається на ефективності роботи транспортних засобів [49].

Отже, ступінь дроблення породи після вибуху істотно впливає на ефективність подальших виробничих операцій, визначаючи реальний рівень продуктивності навантажувальних і транспортних засобів.

Аналічний вираз, що дає змогу оцінити технічну продуктивність екскаватора з урахуванням впливу кускуватості гірничої породи, може бути поданий у такій узагальненій формі:

$$Q_{\text{екс}} = \frac{(3600 - t_i) \cdot E \cdot K_e}{t_u}, \text{ м}^3/\text{год} \quad (2.2)$$

де  $t_i$  - Тривалість операцій, пов'язаних із відбором та переміщенням негабаритних кусків породи, що виконуються протягом однієї години роботи екскаватора, сек;

$E$  - Об'ємна місткість екскаваторного ковша, визначена його геометричними параметрами,  $\text{м}^3$

$K_e$  - коефіцієнт екскавації;

$t_{ci}$  - тривалість робочого циклу, визначена з урахуванням впливу гранулометричного складу (крупності фракцій) гірничої маси на параметри роботи машини, сек.

Тривалість робочого циклу екскаватора, скоригована з урахуванням гранулометричних характеристик вибухопідготовленої гірничої маси, може бути визначена на основі такого розрахункового виразу:

$$t'_y = \frac{\sum_{i=1}^n (t_{ui} - t_{ci})}{n} + t_{ci}, \text{ сек} \quad (2.3)$$

де  $t_{ui}$  - Тривалість виконання екскаватором одного повного операційного циклу, сек;

$t_{ci}$  - час, необхідний для повного завантаження ковша, сек;

$n$  - кількість спостережень.

Сутність буровибухових робіт полягає у виборі та коригуванні таких параметрів зарядів і схем підривання, які забезпечують формування необхідної кускуватості гірничої маси. У працях [50–52] доведено, що ефективність вибухового дроблення безпосередньо пов'язана з основними параметрами вибуху й може бути описана відповідною функціональною залежністю, що подається у вигляді аналітичного виразу:

$$\eta = \eta_0 \left( \sqrt[3]{\frac{W_1 \cdot q_0}{W_0 \cdot q_1}} \right)^2, \quad (2.4)$$

де  $W_0$ ,  $q_0$ ,  $\eta_0$  – відповідно, ЛОЗП, питомі витрати вибухових речовин та коефіцієнт корисної дії процесу вибухового дроблення, визначені для еталонного вибуху;

$W_1$ ,  $q_1$ ,  $\eta_1$  – ці ж показники вибуху, що проектується.

## **2.2 Оптимізація гранулометричного складу гірничої маси як чинника підвищення продуктивності виймально-навантажувальних комплексів**

Опрацьовані наукові джерела свідчать, що для підвищення ефективності екскавації, транспортування та подальшого дроблення бажано забезпечувати якнайменший розмір фрагментів у розвалі вибуху. Водночас надмірне подрібнення порід спричиняє різке зростання витрат на бурові та вибухові роботи, що, у свою чергу, підвищує собівартість видобутої продукції. Крім економічних втрат, надмірна інтенсифікація дроблення може негативно впливати й на якісні характеристики корисної копалини, що особливо суттєво для будівельних матеріалів, залізних мартенівських та фосфоритових руд, напівкоштовних каменів та інших видів мінеральної сировини.

Оптимальна крупність фракцій після вибухового руйнування визначається такими параметрами, як максимально допустимий (кондиційний) та середній розмір шматків породи. Саме за цих значень забезпечується мінімізація сумарних приведених витрат у межах усього завершеного циклу гірничовиробничих операцій.

Погіршення продуктивності навантажувальних робіт із ростом крупності фрагментів гірничої маси зумовлене низкою факторів: зменшенням ступеня заповнення ковша, збільшенням тривалості робочого циклу екскавації через підвищений опір породи заглибленню робочого органу, а також додатковими часовими витратами, пов'язаними з необхідністю видалення або переміщення негабаритних уламків.

Для кожного технологічного комплексу існує такий рівень дроблення породи, за якого досягається мінімально необхідна питома витрата вибухових речовин. Цей показник збільшується зі зростанням

розбурюваності та міцності порід, але має тенденцію до зниження у разі використання екскаваторів більшої потужності.

Для підвищення ефективності роботи виймально-навантажувальної техніки необхідно проаналізувати, як змінюються коефіцієнт наповнення ковша, ступінь розпушення порід у ковші та експлуатаційна продуктивність екскаватора залежно від середнього розміру кусків у розвалі. З цією метою було виконано побудову аналітичних залежностей та графічних моделей, що відображають вплив якості дроблення на зазначені технічні показники.

На рисунку 2.2 представлено характер зміни коефіцієнта наповнення ковша, а на рисунку 2.3 – величини розпушення порід залежно від середнього лінійного розміру фрагментів у розвалі. Показані закономірності відповідають умовам кар'єру ПівдГЗК.

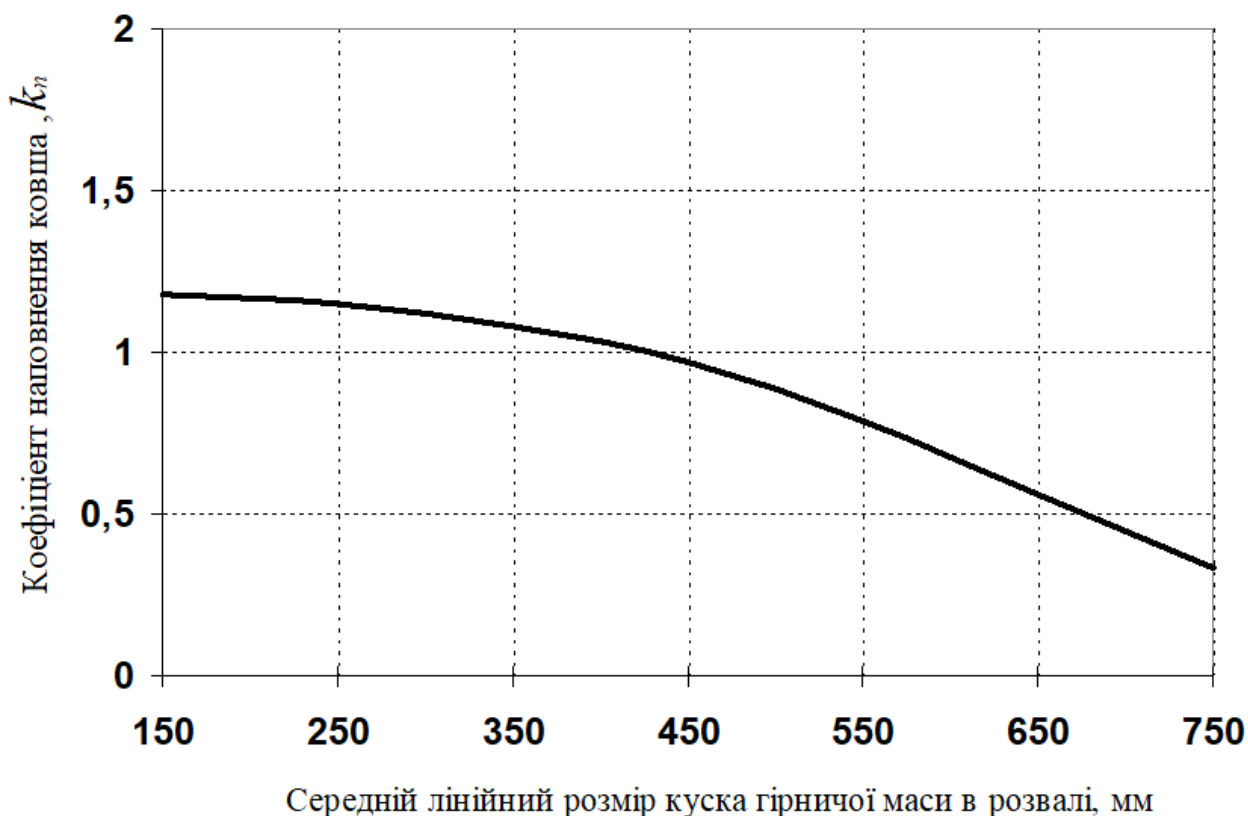


Рис. 2.2 Закономірність зміни коефіцієнта заповнення ковша екскаватора залежно від середнього розміру фракцій породи у вибуховому розвалі

На рисунку 2.4 подано графічну інтерпретацію того, як середній лінійний розмір уламків у розвалі порід впливає на фактичну продуктивність екскаватора. При цьому враховано зміну коефіцієнта наповнення ковша та величину розпушення породи під час черпання.

Рисунок 2.5 ілюструє, як змінюються питомі витрати на екскаваційні роботи залежно від ступеня подрібнення гірничої маси.. Аналіз графіків (рис. 2.4–2.5) свідчить, що зі зростанням середнього розміру кусків у розвалі відбитої породи фактична продуктивність екскаватора зменшується. Це, у свою чергу, спричинює збільшення питомих витрат на виконання екскаваційних робіт.

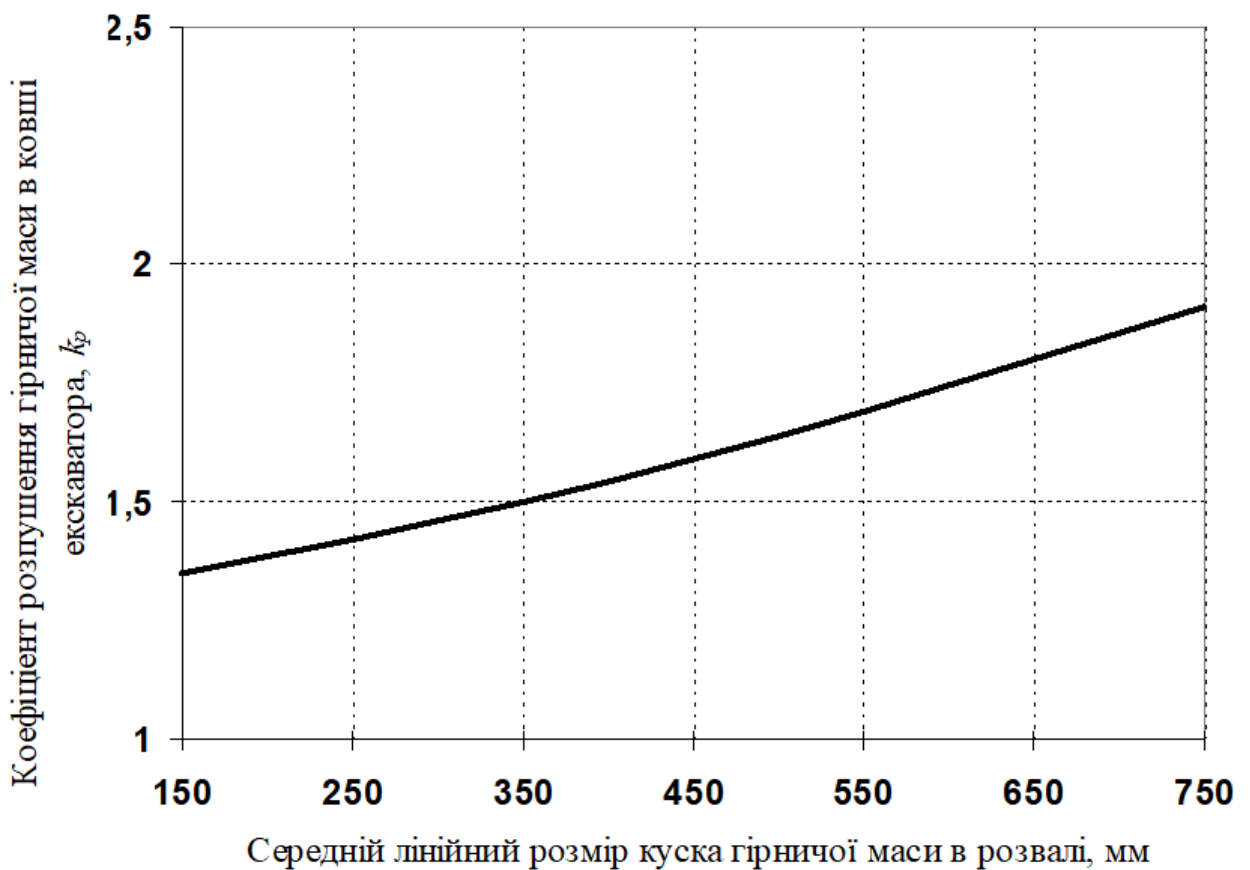


Рис. 2.3 Взаємозв'язок коефіцієнта розпушення породи в екскаваторному ковші зі середнім розміром фрагментів у розвалі.

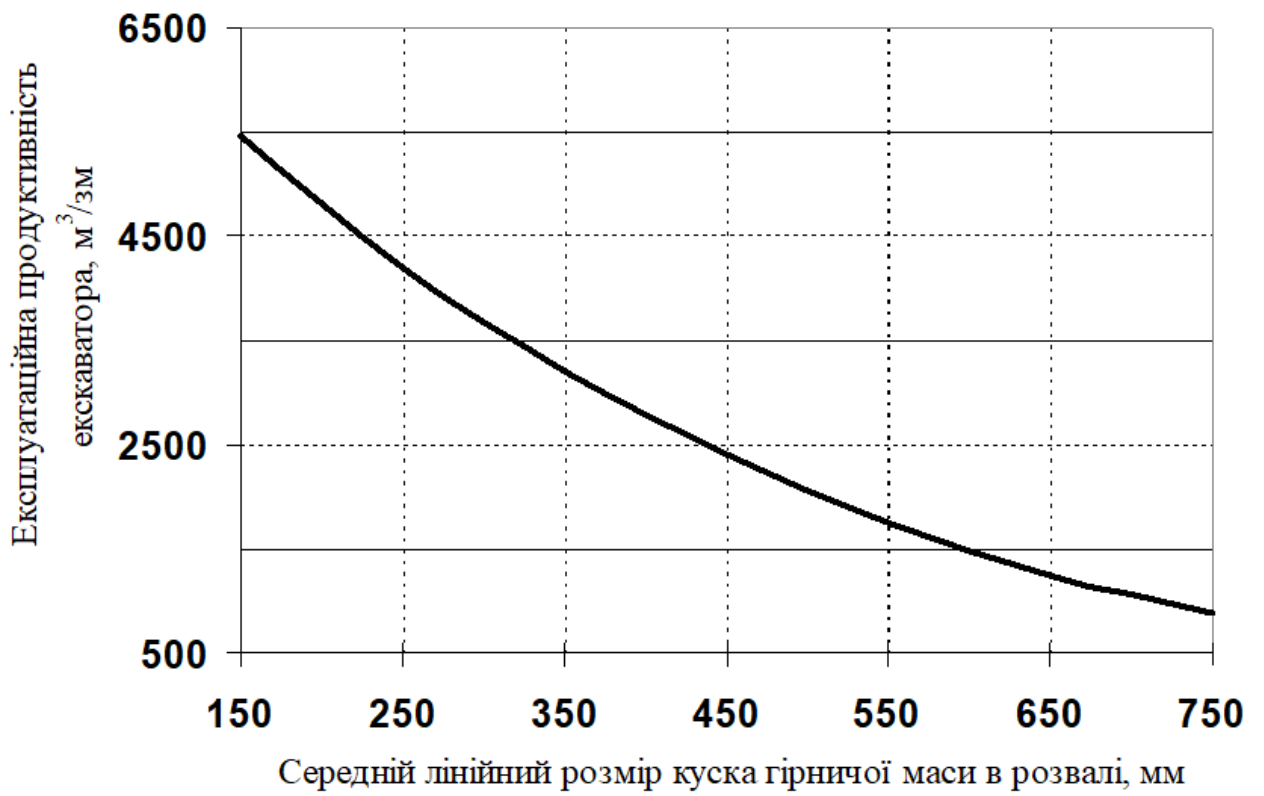


Рис. 2.4. Зміна експлуатаційної продуктивності екскаватора залежно від середньої крупності уламків у вибуховому розвалі.

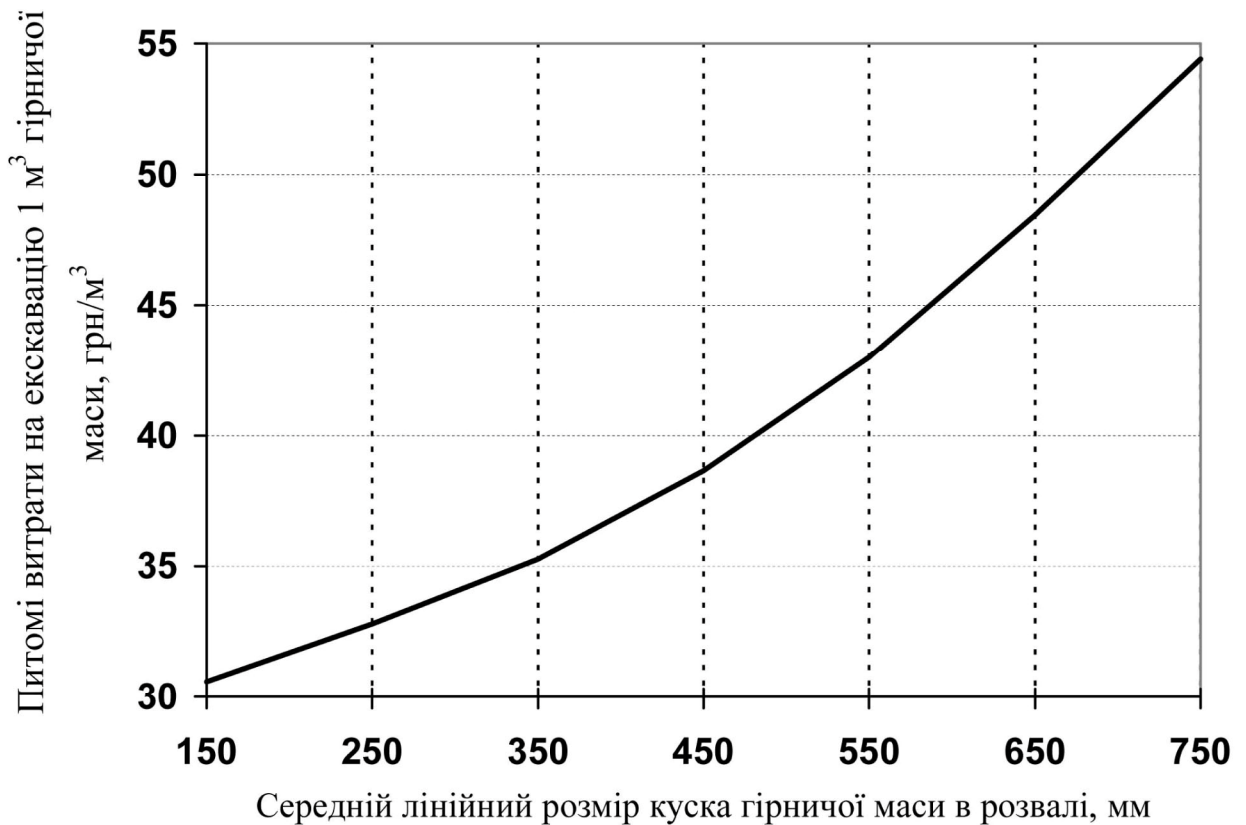


Рис. 2.5. Зміна питомих витрат на екскаваційні роботи залежно від середнього фрагментного розміру породи у розвалі

На рис. 2.6 подано характеристику зміни кускуватості гірничої маси залежно від питомої витрати вибухової речовини. Установлена залежність зумовлює подальший вплив параметрів вибухового подрібнення на формування собівартості буровибухових робіт, що відображено на рис. 2.7.

Дослідження особливостей руйнування порід різної міцності в кар'єрі ПівдГЗК показує, що для кожного типу порід формується свій раціональний рівень питомої витрати вибухових речовин. Перевищення цього рівня практично не впливає на подальше зменшення розмірів кусків у розвалі. Такий висновок узгоджується з тенденціями зміни питомих витрат на буровибухові роботи, відображеними на рис. 2.7.

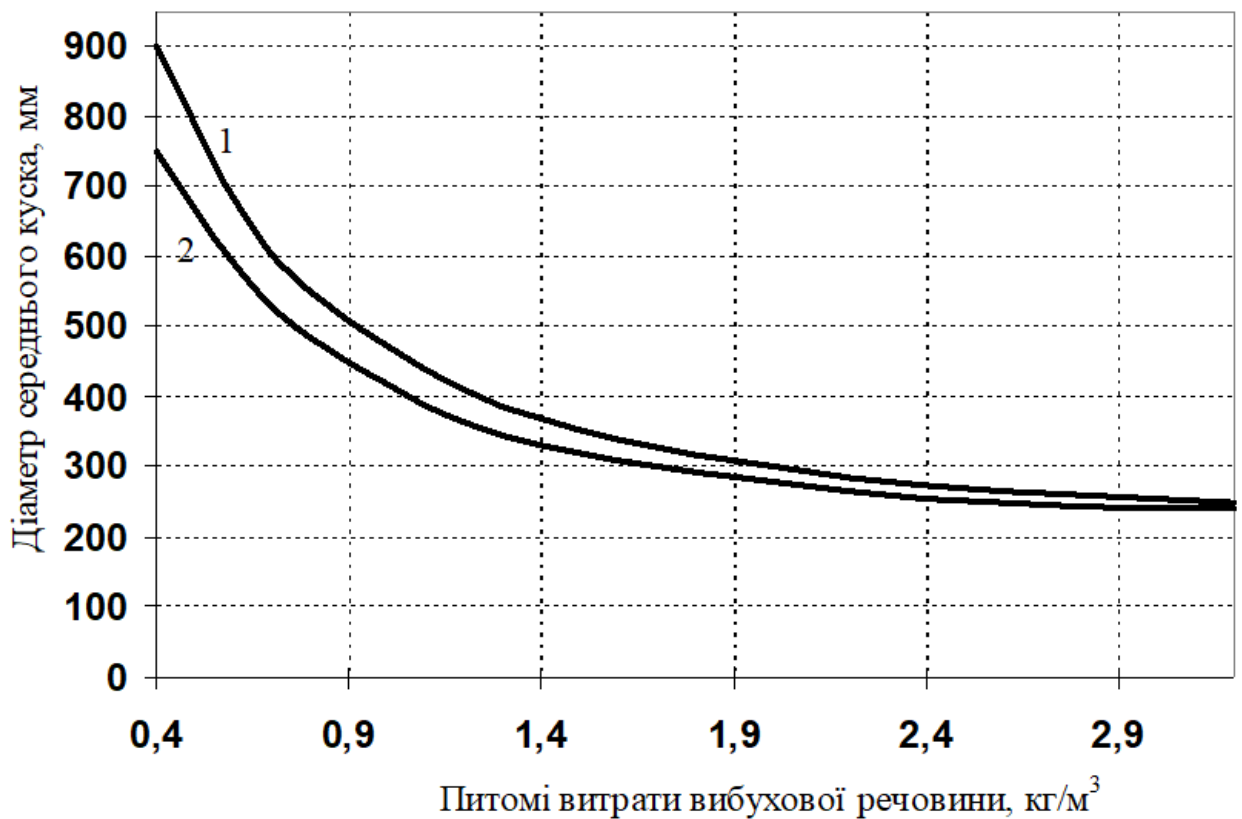


Рис. 2.6. Залежність середнього розміру фрагментів у розвалі від питомої витрати вибухової речовини за різної міцності порід:

1 –  $f=18$ ; 2 –  $f=15$ .

Аналіз залежності, поданої на рис. 2.6, свідчить, що після досягнення певної граничної крупності уламків, характерної для порід відповідної міцності (наприклад, близько 250 мм за міцності  $f = 18$ ), подальше зростання питомої витрати вибухових речовин уже майже не впливає на помітне зменшення середнього розміру кусків. Так, підвищення питомої витрати ВР з 2 до 3 кг/м<sup>3</sup> (тобто на 33,3 %) забезпечує скорочення середньої крупності лише з 300 до 270 мм, що відповідає приблизно 11 %.

Отримані результати, наведені на рис. 2.6, дають змогу оцінити зміну питомих витрат залежно від міцнісних характеристик гірських порід та обраної технологічної схеми ведення гірничих робіт у кар'єрі.

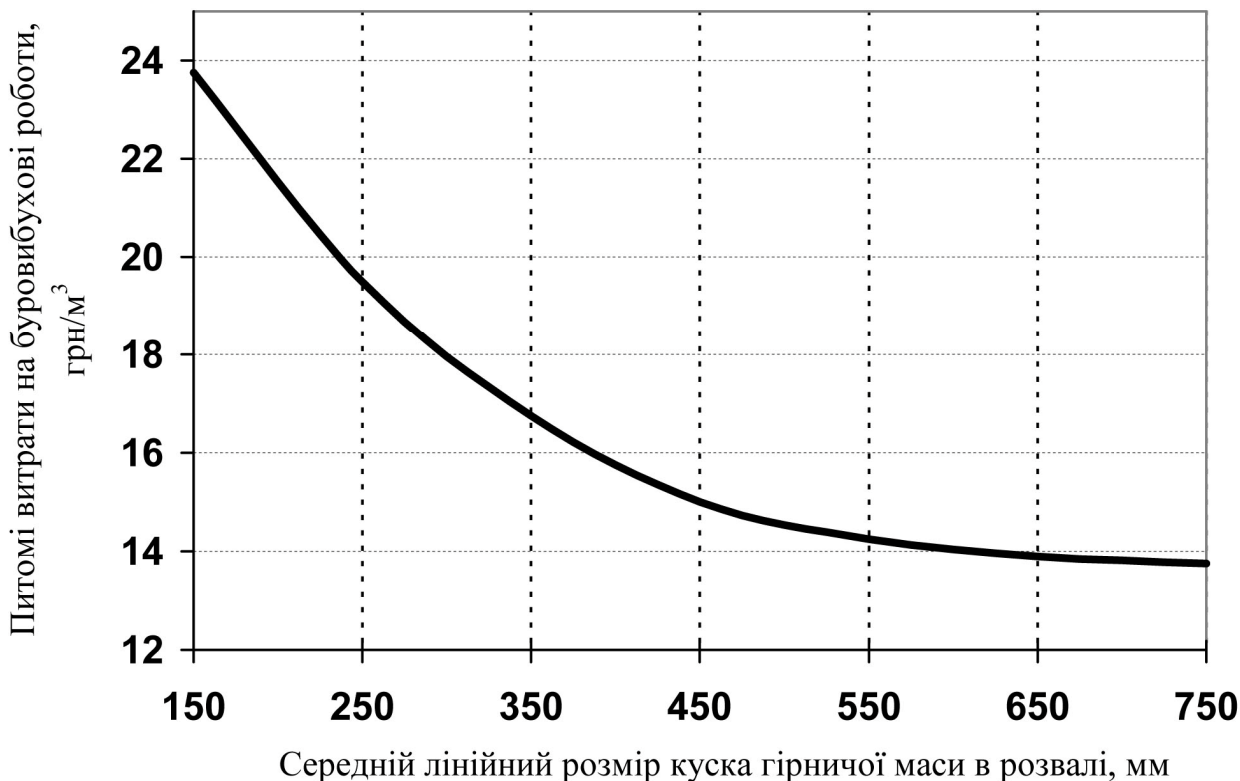


Рис. 2.7. Кількісна характеристика зв'язку між середнім розміром фрагментації породи та питомими витратами на буровибухові роботи

На рисунку 2.8 подано залежність, що ілюструє, як змінюються сумарні питомі витрати на екскавацію та виконання буровибухових робіт у разі варіювання ступеня дроблення вибухорозпушеної гірничої маси.

Аналіз даних, наведених на рисунку 2.8, свідчить, що в умовах кар'єру ПівдГЗК найсприятливішим інтервалом кускуватості вибухороздробленої гірничої маси, який забезпечує підвищену ефективність як навантажувально-транспортних, так і буровибухових робіт, є діапазон середніх розмірів фрагментів приблизно 350–550 мм.

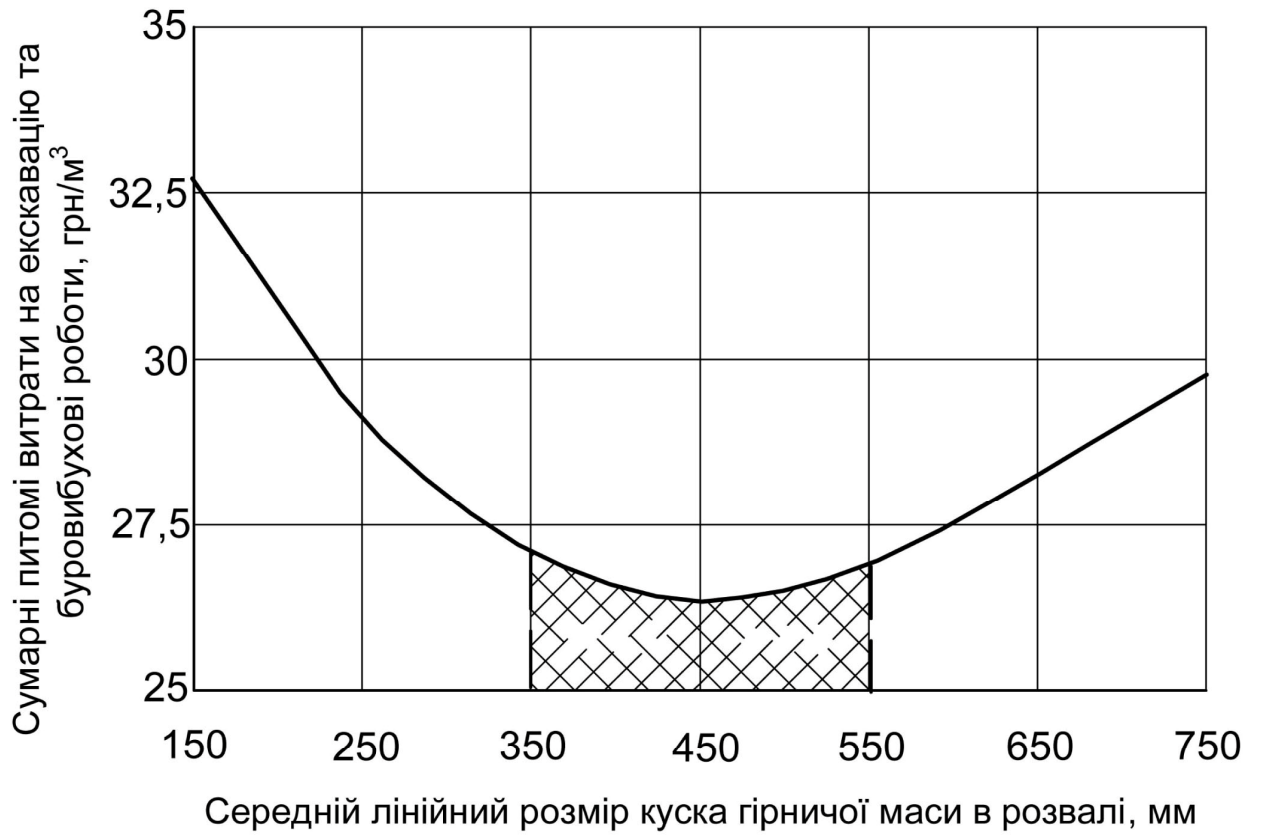


Рис. 2.8. Взаємозв'язок між гранулометриєю вибухового розвалу та витратами на екскаваційні й вибухові роботи

## **ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ**

Ефективність функціонування великих гірничозбагачувальних комбінатів визначається передусім якістю оперативного планування, раціональністю організації виробничих процесів та результативністю управління інтегрованим технологічним комплексом підприємства.

Проведений огляд сучасних гірничотехнічних умов розробки глибоких горизонтів великих залізородних кар'єрів свідчить, що зі зростанням глибини відбуваються суттєві зміни як у гірничо-геологічних, так і в гірничо-технологічних параметрах ведення робіт. У нижніх горизонтах різко зростає частка міцних та водонасичених порід, що ускладнює їх буріння та вибухове руйнування. Одночасно спостерігається тенденція до звуження робочих площадок, причому настільки, що їхні розміри перестають забезпечувати можливість ефективного застосування багаторядних схем уповільненого підривання. Це, у свою чергу, обмежує потенціал отримання оптимального ступеня дроблення, формування раціонального кучного розвалу та зниження сейсмічного впливу вибухів на навколишні масиви. Підвищення ступеня дроблення гірничої маси передусім досягається за рахунок оптимізації параметрів буровибухового процесу. Це передбачає обґрунтований вибір схеми та режимів підривання, а також типів вибухових речовин, параметри яких мають відповідати фізико-механічним характеристикам порід, що підлягають руйнуванню.

Аналіз наукових праць, присвячених дослідженню чинників, що впливають на продуктивність екскаваторів та на технологію організації виймально-навантажувальних процесів, засвідчив наявність істотних прогалин у цій сфері. Попередні дослідження здебільшого охоплювали лише окремі аспекти роботи екскаваторів і не дозволяли кількісно оцінити вплив низки важливих гірничо-технічних параметрів на їх технічну продуктивність. У доступній літературі також відсутні

універсальні підходи, які б забезпечували визначення технічно досяжної продуктивності екскаваторів для будь-яких конкретних умов експлуатації — величини, що є ключовою при розв'язанні завдань оперативного планування та організації виймально-навантажувальних робіт. Попри те, що фундаментальні принципи організації виймально-навантажувальних процесів були сформульовані у класичних працях провідних дослідників гірничої справи, досі відсутня цілісна та формально обґрунтована методологія планування цих робіт у масштабах великих залізородних кар'єрів. Зокрема, не розроблено універсального наукового підходу, який би дозволяв ефективно координувати функціонування значної кількості екскаваторів циклічної дії в умовах складних гірничо-технологічних систем.

Проблематика визначення технічної продуктивності навантажувального обладнання набуває особливої ваги для великих залізородних кар'єрів Криворізького басейну. Тут гірничо-технологічні фактори, що формують умови роботи екскаваторів, істотно варіюють як уздовж фронту гірничих робіт на одному горизонті, так і в межах окремих екскаваторних блоків, що значно ускладнює прогнозування та оптимізацію параметрів навантажувальних робіт.

Для обґрунтованого встановлення технічно досяжної продуктивності екскаваторного обладнання необхідно проаналізувати та вирішити низку взаємопов'язаних завдань:

1. Сформулювати науково обґрунтований показник, що дозволяє кількісно оцінювати гранулометричний склад відбитої гірничої маси, та визначити характер його впливу на експлуатаційну продуктивність екскаваторного обладнання.

2. Встановити закономірності впливу параметрів буровибухової підготовки масиву на ефективність роботи транспортних засобів у циклічно-потоківих схемах розробки.

3. Обґрунтувати та розробити підхід до визначення технічно досяжної продуктивності екскаваторів, який враховує сукупну дію основних гірничотехнічних факторів і забезпечує можливість її прогнозування в реальних виробничих умовах.

## Бібліографія.

1. Разработка эффективных технологических параметров ведения БВР с учетом реализации проектных решений по углубке карьера №1 ЦГОКа и внедрения передовых взрывных технологий. Отчет о НИР (заключит.) / Криворожский технический университет. - № ГР0100U003837. – Кривой Рог, 2002. – 89с.
2. Перегудов В.В. Технологические особенности ведения буровзрывных работ при расконсервации локальных участков бортов карьер / В.В. Перегудов, О.В. Колтунов // Разработка рудных месторождений: Респ. межвед. научно-техн. сб. – Кривой Рог: Изд-во КТУ, 2000. – Вып. 73. – С. 3-8.
3. Швець Є.М. Оптимізація вибухового подрібнення скельних порід на залізорудних кар'єрах: дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 05.15.03 «Відкрита розробка родовищ корисних копалин» / Є. М. Швець. – Кривий Ріг, 2013. – 183 с.
4. Мечников О.С. Определение гранулометрического состава взорванной горной массы фотограмметрическим методом / О.С. Мечников // Труды первого научно-методического совещания. – Углетехиздат, 1959.
5. Лосицкий В.В. Фотопланиметрический метод определения качества дробления породы на карьерах / В.В. Лосицкий, В.Ф. Макаревич // Труды АН КазССР. – том X. – Алма-Ата, 1961.
6. Иофин С.Л. Фотопланиметрический метод оценки кусковатости пород при взрывных работах в карьерах / С.Л. Иофин // Сборник трудов ВНИИцветмета. - №2. – Metallurgizdat, 1957.
7. Ройзман М.И. Анализ гранулометрического состава взорванной горной массы / М.И. Ройзман // Труды ЦНИГРИ. – вып. 67-68. – М., 1966.
8. Бизов В.Ф., Федоренко П.Й. Вибухові роботи. – Т. Х.-Кривий Ріг: Мінерал, 2001. – 247 с. з іл..
9. Ozkahraman H.T. Breakage mechanisms and an encouraging correlation between the Bond parameters and the friability value. The

Journal of The Southern African Institute of Mining and Metallurgy, vol.110. pp. 153–159.

10. Детистов Е.И. Влияние крупности взорванной породы на производительность пневмопогрузчиков БЧ-1 / И.Е. Детистов // Уголь. - №9 . – 1951.

11. Блізнюков В.Г. Гірнична справа / В.Г. Блізнюков, С.О. Луценко, А.М. Пижик – 3-е вид., перероб. і доп. – Кривий Ріг: Видавець ФО-П Чернявський Д.О. – 2014. – 424 с., з іл.

12. Лосицкий В.В. Влияние крупности кусков взорванной горной массы на производительность экскаватора в карьере / В.В. Лосицкий, В.Ф. Макаревич // Труды АГМНИИ АНКазССР. – том XIII. – Алма-Ата, 1962.

13. Лукашев А.А. О коэффициенте разрыхления горных пород / А.А. Лукашев // Горный журнал. - №11. – 1949.

14. Собко Б.Ю. Технологія відкритої розробки родовищ корисних копалин. Системи відкритої розробки родовищ / Б.Ю. Собко, Г.Д. Пчолкін, Г.Я. Корсунський, О.В. Ложніков ; М-во освіти і науки України, НТУ «Дніпровська політехніка». – Д. : НГУ, 2020. – 239 с.

15. Михайлов А.Г. Крупность кусков породы в зависимости от дробления при взрыве и влияние ее на погрузочные работы / А.Г. Михайлов // Золотая промышленность. - №12. – 1938.

16. Харченко Б.М. О коэффициенте экскавации скальных пород / Б.М. Харченко, Н.Н. Игнатьев // Горный журнал. - №11. – 1960.

17. Юматов Б.П. Зависимость производительности экскаваторов и локомотиво-составов от выхода крупнокусовых фракций / Б.П. Юматов, М.Н. Ройзман // Горный журнал. - №5. – 1966.

18. Шешко Е.Ф. Справочник по горнорудному делу. Том 1. Открытые работы / Е.Ф. Шешко, В.В. Ржевский. – Госгортехиздат, 1960.

19. Мустафина А.М. Исследования технологического комплекса экскаваторных работ при автомобильном транспорте / А.М.

Мустафина // Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. – Алма-Ата, 1960.

20. Мустафина А.М. Совершенствование технологии горных работ / А.М. Мустафина. – Изд-во: Наука. - Алма-Ата, 1966.

21. Дорошенко Ф.Г. Рациональная ширина рабочего забоя экскаватора ЭКГ-8 / Ф.Г. Дорошенко, Н.И. Смирнов // Изв. АН КазССР. – Вып. 2(11). – Алма-Ата, 1959.

22. Симкин Б.А. Метод определения оптимальной высоты уступа / Б.А. Симкин, Н.П. Сиенов // Горный журнал. –№3. - М., 1964.

23. Смирнов Н.И. Параметры рабочего забоя скальных экскаваторов при проходке траншей / Н.И. Смирнов // Известия АН КазССР. – Вып. 2(11). - Алма-Ата, 1959.

24. Маркелов В.Т. Выбор оптимальной высоты уступа и ширины заходки при разработке мягких пород с применением автотранспорта / В.Т. Маркелов // Цветная металлургия. - №2. – 1952.

25. Мустафина А.М. Исследование технологического комплекса экскаваторных работ при автомобильном транспорте / А.М. Мустафина // Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. - Алма-Ата, 1960.

26. Clarc G.B. Operational statistic of a marion 5560 power shovel / G.B. Clarc, G.L. Reiter // Transaktions of the American Institute of mining and metallurgical engineers. Mining branch. – vol. 184, III. – 1949.

27. Друкованый М.Ф. Влияние дробления пород на эффективность технологических процессов открытой разработки / М.Ф. Друкованый, Б.Н. Тартаковский, В.С. Вишняков, Э.И. Ефремов. – Киев: Наукова думка, 1974. – 268 с.

28. Комир В.М. Исследование процесса разрушения и разработка методов регулирования дробления горных пород взрывом на карьерах / В.М. Комир // Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. – Днепропетровск, 1979. – 185с.

29. Тартаковский Б.Н. Циклично-поточная технология добычи руды на карьерах Кривбасса / Б.Н. Тартаковский, В.С. Вишняков, И.И. Гаврилюк. – Киев: Техніка, 1978. – 175 с.

30. Генералов Г.С. Исследование влияния качества взрывного дробления железистых кварцитов на эффективность последующих технологических процессов / Г.С. Генералов // Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. – Днепропетровск, 1971. – 24с.

31. Анистратов Ю.И. Рациональная степень дробления горной массы на карьерах с автомобильным транспортом / Ю.И. Анистратов, Н.И. Жабин // Горный журнал. - №1. – 1969. – С.36-39.

32. Юматов Б.А. Зависимость производительности экскаваторов и локомотивосоставов от выхода крупнокусовых фракций / Б.А. Юматов, М.И. Ройзман // Горный журнал. - №5. – 1966. – С.24-28.

33. Друкованый М.Ф. Влияние степени дробления пород взрывом на производительность первой стадии механического дробления / М.Ф. Друкованый // Metallургическая и горнорудная промышленность. - №4. – 1970. – С.57-59.

34. Мещеряков В.Г. Исследование эффективности технологических процессов подготовки крепких железистых роговиков для конвейерного транспорта / В.Г. Мещеряков // Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. – Кривой Рог, 1972. – 144с.

35. Токтосунов Э.К. Комплексная оценка буро-взрывных и погрузочных работ / Э.К. Токтосунов // Известия АН Киргизской ССР. - №3. – 1968.

36. Крысин Р.С. О зависимости производительности одноковшовых экскаваторов от гранулометрического состава горной массы / Р.С. Крысин, П.Н. Щербаков, В.М. Ткаченко, А.Я. Жуков // Разработка рудных месторождений. – Киев: Техника. - №25 . – 1978.

37. Ткачук К.И. Развитие методов ведения буровзрывных работ в Кривбассе / К.И. Ткачук, И.М. Бондаренко, В.С. Куц, Ю.И. Жержерунов. – Киев: УкрНИИНТИ, 1970. – 64с.

38. Кубачек В.Р. Оценка кусковатости горной массы при исследовании режимов нагружения одноковшовых экскаваторов / В.Р. Кубачек, Н.А. Касьянов // Известия вузов. Горный журнал, 1970. - №1. – С.92-96.

39. Казангапов А.Е. Зависимость производительности экскаватора от кусковатости взорванной породы на Житикаринском карьере / А.Е. Казангапов, А.Е. Куттыбаев, Г.К. Саменов, А.Н. Петрунько // Вестник Казахского национального технического университета. – Алматы, 2006. – №2. – С.153-156.

40. Дорошенко В.И. Влияние удельного расхода ВВ на производительность горнотранспортного оборудования и стоимость переделов на ГОКе / В.И. Дорошенко, Б.А. Письменный // Горный журнал. – 1983. - №5. – С. 30-32.

41. Choudhary, B.S. Effect of blast induced rock fragmentation and muckpile angle on excavator performance in surface mines. *Mining of Mineral Deposits*, 2019, 13(3), 119–126. DOI: 10.33271/mining13.03.119

42. Osanloo, M., Hekmat, A. Prediction of Shovel Productivity in the Gol-E-Gohar Iron Mine. *Journal of Mining Science*, 2005, 41(2), 177–184. DOI: 10.1007/s11041-005-0025-0

43. Dotto M. S., Pourrahimian Y. Effects of Fragmentation Size Distribution on Truck-Shovel Productivity / Mining Optimization Laboratory (MOL), University of Alberta. — 2018. — MOL Report Nine, 335–342 p.

44. Beyglou, A., Johansson, D., Schunnesson, H. Target fragmentation for efficient loading and crushing — the Aitik case. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 2017, 117(11), 1053–1062. DOI: 10.17159/2411-9717/2017/v117n11a10

45. Kujundžić, T., Klanfar, M., Korman, T., Briševac, Z. Influence of Crushed Rock Properties on the Productivity of a Hydraulic Excavator. *Applied Sciences*, 2021, 11(5), 2345. DOI: 10.3390/app11052345

46. Kinyua, E.M., Jianhua, Z., Kasomo, R.M., Mauti, D., Mwangangi, J. A review of the influence of blast fragmentation on downstream processing of metal ores. *Minerals Engineering*, 2022, 186, 107743. DOI: 10.1016/j.mineng.2022.107743

47. Казангапов А.Е. Зависимость производительности экскаватора от кусковатости взорванной породы на Житикаринском карьере / А.Е. Казангапов, А.Е. Куттыбаев, Г.К. Саменов, А.Н. Петрунко // Вестник Казахского национального технического университета. – Алматы, 2006. – №2. – С.153-156.

48. 70. Кузнецов Г.В. Интенсификация дробления скальных горных пород с целью повышения эффективности горнотранспортного оборудования / Г.В. Кузнецов, А.А. Батманова, В.А. Малых, С.В. Губанов, В.Ф. Шмитгал. – Цветметинформация. – М. – 1973. – 50с.

49. 54. Макаревич В.Ф. Метод единичных наблюдений для исследования влияния кусковатости горной массы на производительность экскаватора / В.Ф. Макаревич // Исследование в области открытых разработок месторождений. – Губкин, 1971.

50. Падуков В.А. Инвентарные соотношения в задачах прогнозирования кусковатости горной массы при взрывном дроблении / В.А. Падуков, В.П. Макарьев // Труды института Гипроникель. – 1974. – Вып. 59. – С.23–28.

51. Меньшиков Б. А. Исследование и выбор способов регулирования объемной концентрации энергии взрывчатых смесей / Б. А. Меньшиков // Автореф. дис. на соискание научн. ст. канд. техн. наук. – М., 1972. – 24 с.

52. Волченко Н. Г. Оценка полезной затраты энергии ВВ при различных условиях взрывания / Н.Г. Волченко // Взрывное дело. – 1974. – Вып.73/30. – С.16–19.

53. Султанов М.В. Звіт з передатестаційної практики. - Запоріжжя, 2025. – 33с.