

ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»
Гірничо-металургійний факультет
Кафедра гірничої справи

**Кваліфікаційна робота
допущена до захисту**

Гарант освітньої програми
«Відкрита розробка родовищ»
Ольга БОГОМАЗ

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня бакалавр
за підсумками виконання освітньо-професійної програми
«Відкрита розробка родовищ»
за спеціальністю 184 Гірництво

на тему «Підвищення ефективності
підготовки гірських порід до виймання в
умовах кар'єру ПРАТ "Інгулецький ГЗК"»

Керівник роботи

Юліан ГРИГОР'ЄВ

Консультант від
баз практики

Олександр КИРИЧЕНКО

*Робота містить результати власних досліджень та напрацювань.
Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на
відповідне джерело. Електронний та паперовий варіанти роботи є ідентичними*

Здобувач

Микола ПУГАЧ

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

Голова ЕК

Ігор ТОНЄВ

Запоріжжя, 2025

ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»
 Факультет гірничо-металургійний
 Кафедра гірничої справи
 Ступінь
 вищої освіти бакалавр
 Спеціальність 184 Гірництво
 ОПП Відкрита розробка родовищ

ЗАТВЕРДЖУЮ
 Гарант освітньої програми
 _____ Ольга БОГОМАЗ
 «__» _____ 20__р.

ЗАВДАННЯ
 НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ БАКАЛАВРА

Пугач М.М.

(прізвище, ім'я, по батькові здобувача)

- Тема роботи Підвищення ефективності підготовки гірських порід до виймання в умовах кар'єру ПРАТ "Інгулецький ГЗК"
 Керівник роботи: Григор'єв Юліан Ігорович, к.т.н., доцент
 затверджені наказом Університету № 81 від 31.03.2025
- Термін подання роботи: 16.06.2025
- Вихідні дані до роботи: сучасний стан гірничих робіт в кар'єрі, парк основного гірничого устаткування, дані хронометражу продуктивності бурового обладнання
- Зміст пояснювальної записки (перелік питань): Анотація. Зміст. Вступ. РОЗДІЛ 1. Аналіз теорії і практики підготовки гірських порід до виймання. РОЗДІЛ 2. Аналіз досвіду виконання буро-підричних робіт в кар'єрі ПРАТ "ІНГУЛЕЦЬКИЙ ГЗК". РОЗДІЛ 3. Оптимізація параметрів буріння для підвищення ефективності буропідричних робіт в кар'єрі ПРАТ «ІНГУЛЕЦЬКИЙ ГЗК». Висновки. Перелік використаних джерел.
- Перелік графічного (демонстраційного) матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень): сучасний стан гірничих робіт в кар'єрі, результати аналізу літературних джерел, результати аналізу досвіду підготовки порід до виймання, результати моделювання параметрів бурових робіт
- Консультанти по роботі, із зазначенням розділів роботи, що їх стосуються

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта
Розділ 1	Григор'єв Ю.І.
Розділ 2	Кириченко О.В.
Розділ 3	Григор'єв Ю.І.

- Дата видачі завдання 19.05.2025

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
	Збір та аналіз вихідних даних, огляд літератури	25.05.2025	
	Аналіз теоретичних основ підготовки порід до виймання	01.06.2025	
	Аналіз сучасного стану і фактичного парку обладнання кар'єру	05.06.2025	
	Розробка моделі оптимізації параметрів буріння	10.06.2025	
	Розробка організаційних і технологічних рекомендацій на основі виконаного моделювання	14.06.2025	
	Формулювання висновків, оформлення пояснювальної записки	16.06.2025	
	Подання роботи на перевірку та підготовка до захисту	16.06.2025	
	Підготовка презентаційних матеріалів	20.06.2025	

Керівник роботи

Юліан ГРИГОР'ЄВ

Здобувач

Микола ПУГАЧ

ЗМІСТ

АНОТАЦІЯ	5
ВСТУП	6
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ТЕОРІЇ І ПРАКТИКИ ПІДГОТОВКИ ГІРСЬКИХ ПОРІД ДО ВИЙМАННЯ	8
1.1 Теоретичні основи руйнування гірських порід	8
1.2 Роль фізико-механічних властивостей гірських порід у виборі параметрів буровибухових робіт	15
1.3 Вивчення досвіду виконання буро-підривних робіт	18
1.4 Адаптивні рішення та інновації в сучасній практиці буровибухових робіт	23
РОЗДІЛ 2. АНАЛІЗ ДОСВІДУ ВИКОНАННЯ БУРО-ПІДРИВНИХ РОБІТ В КАР'ЄРІ ПРАТ "ІНГУЛЕЦЬКИЙ ГЗК"	25
2.1. Загальна характеристика і геологічна будова родовища	25
2.2 Структурний аналіз підприємства	29
2.3. Аналіз стану гірничих робіт	31
2.4 Аналіз виробничих умов і стану підготовки гірських порід до виймання на кар'єрі ПрАТ «Інгулецький ГЗК»	33
РОЗДІЛ 3. ОПТИМІЗАЦІЯ ПАРАМЕТРІВ БУРІННЯ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ БУРОПІДРИВНИХ РОБІТ В КАР'ЄРІ ПРАТ «ІНГУЛЕЦЬКИЙ ГЗК»	41
ВИСНОВКИ І РЕКОМЕНДАЦІЇ	49
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	51

АНОТАЦІЯ

Пугач М.М. Підвищення ефективності підготовки гірських порід до виймання в умовах кар'єру ПРАТ "Інгулецький ГЗК". Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня бакалавр зі спеціальності 184 Гірництво, ОПП «Відкрита розробка родовищ» – ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА», Запоріжжя, 2025.

Мета роботи – підвищення ефективності процесу підготовки гірських порід до виймання на кар'єрі ПРАТ «Інгулецький ГЗК» за рахунок оптимізації параметрів бурових робіт і обладнання, що експлуатується.

Об'єкт дослідження – процес підготовки гірських порід до виймання в кар'єрі ПРАТ «Інгулецький ГЗК».

Предмет дослідження – параметри бурових робіт і технологічного обладнання при підготовці порід до виймання.

Зміст роботи:

У першому розділі виконано аналіз сучасного теоретичного забезпечення підготовки гірських порід до виймання, а також світового досвіду ведення даного технологічного процесу.

У другому розділі проаналізовано стан гірничих робіт, а також технічне і технологічне забезпечення буро-підричних робіт в кар'єрі ПРАТ «Інгулецький ГЗК».

У третьому розділі виконано моделювання параметрів бурових робіт, направлене на оптимізацію продуктивності технологічного обладнання. На основі проведеного моделювання винесені рекомендації щодо оптимального діаметру долота шарошкових бурових верстатів в умовах Інгулецького кар'єру.

Ключові слова: підготовка порід до виймання, буропідричні роботи, шарошкове буріння, діаметр долота, моделювання, продуктивність, оптимізація.

ВСТУП

У сучасних умовах зростаюча конкуренція на світовому ринку залізної руди вимагає від українських гірничодобувних підприємств постійного підвищення технологічної ефективності та зниження собівартості виробництва. Водночас експлуатація міцних залізрудних тіл, що дуже характерна для кар'єру ПРАТ «Інгулецький ГЗК», характеризується підвищеними вимогами до розробки, що зумовлює необхідність удосконалення методів буро-вибухових робіт і подальшої оптимізації технологічних схем.

На сьогодні вітчизняна й зарубіжна практика накопичила широкий досвід застосування різних систем свердловинної зарядки, варіантів чергування рядів та параметрів підривання зарядів, які дозволяють регулювати ступінь подрібнення та форму розвалу. Проте в умовах Інгулецького родовища з його унікальною геоморфологією та складними геомеханічними властивостями рудних порід існують додаткові виклики: відмінності вмісту корисного компонента, неоднорідність масиву за глибиною та високі вимоги до комплексів механізації гірничих робіт. У зв'язку з цим пошук раціональних параметрів робіт з підготовки порід до виймання — від вибору діаметру свердловин і кроку сітки до регулювання об'ємної щільності заряду і послідовності підривання — набуває все більшого значення.

Обране для дослідження питання підвищення ефективності підготовки гірських порід до виймання спрямоване на розв'язання актуальної практичної задачі: забезпечити максимальний ступінь подрібнення при оптимальному використанні потенціалу бурового комплексу кар'єру. Результати цієї роботи можуть слугувати базою для впровадження нових технічних рішень на Інгулецькому ГЗК, сприяючи скороченню операційних витрат та підвищенню безпеки праці.

Водночас адаптовані методики й рекомендації матимуть універсальний характер і можуть бути використані на інших відкритих родовищах із подібними геологічними й технічними умовами, зокрема для інших залізородних кар'єрів групи Метінвест.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ТЕОРІЇ І ПРАКТИКИ ПІДГОТОВКИ ГІРСЬКИХ ПОРІД ДО ВИЙМАННЯ

1.1 Теоретичні основи руйнування гірських порід

Руйнування гірських порід є ключовим процесом, що лежить в основі більшості технологічних операцій у відкритих гірничих роботах. Його ефективність безпосередньо впливає на якість підготовки масиву до наступних етапів виймання, транспортування і збагачення. Теоретичні засади руйнування порід формуються на перетині механіки суцільного середовища, гірничої геомеханіки, хвильової динаміки, фізики вибуху і теорії пружнопластичних деформацій.

Фізико-механічні процеси, які супроводжують дію вибуху на гірський масив, надзвичайно складні і включають стадії миттєвого впливу фронту детонації, генерації ударних хвиль, виникнення і розвиток зон тріщинування та зсуву, газодинамічну дію продуктів детонації, а також вторинні ефекти, пов'язані з відображенням та інтерференцією хвиль напруг. Теоретичні уявлення про механізм руйнування поділяються на хвильові, квазістатичні та змішані моделі.

Класичні уявлення, сформовані роботами Г.І. Покровського, ґрунтуються на детальному описі етапів розвитку напружено-деформованого стану середовища поблизу вибухового заряду. У початковий момент детонації формується зона інтенсивного стискання, де матеріал зазнає гідродинамічних навантажень, після чого через декомпресію виникають розтягуючі напруження, що перевищують межу міцності порід на розрив. Це призводить до формування системи радіальних і концентричних тріщин, які й обумовлюють первинне дроблення породи.

Додатковий вплив мають хвилі, відбиті від відкритих поверхонь уступу, що можуть сприяти або пригнічувати утворення тріщин

залежно від фази і амплітуди. Деякі автори (А.Н. Ханукаєв, В.А. Боровиков) класифікують породи за механізмом руйнування: перша група — з переважним хвильовим механізмом, друга — з домінуванням газодинамічного, третя — зі змішаною дією [1-3].

У тріщинуватих масивах руйнування супроводжується не лише утворенням нових тріщин, а й зіткненням окремоностей, що діють як автономні тіла. Поширення хвиль у таких середовищах зазнає суттєвого демпфування, а проникнення продуктів вибуху в уже наявні тріщини зменшує ефективність подрібнення. Згідно з роботами М.А. Кука і Ф.І. Кучерявого [4], критичне значення має величина розкриття тріщин і їх орієнтація відносно вектора дії вибуху.

З появою електронних систем ініціювання та широким використанням короткосповільненого підривання (КСП) виникла необхідність переосмислення традиційних уявлень. Сучасні дослідження вказують на те, що при сповільненому підриванні відбувається накладання залишкових напружень, формування нових вільних поверхонь, ефект зіткнення рухомих мас породи — всі ці явища створюють умови для інтенсифікації процесу дроблення. Проте взаємодія зарядів у часі та просторі потребує тонкого налаштування інтервалів уповільнення, яке досі не має уніфікованої методики розрахунку.

Особливу увагу слід приділити ролі гідродинамічного тиску в зоні детонації. При взаємодії вибухової хвилі з неоднорідним середовищем, відбувається утворення фронтів удару та зон напружень, які, проходячи через породи з різною щільністю та модулем пружності, генерують локальні зони концентрації енергії. Ці осередки і стають зародками тріщин або зон зсуву. У випадках, коли масив має природну тріщинуватість, ефект резонансу з існуючими структурами призводить до анізотропного розподілу пошкоджень, що необхідно враховувати при проектуванні сітки буріння [4].

Паралельно з розвитком теоретичних моделей [5], активно застосовуються чисельні методи розрахунку – зокрема, скінченно-елементний аналіз (FEM), метод дискретних елементів (DEM) та гідродинамічне моделювання на основі рівнянь Нав'є-Стокса. Ці підходи дозволяють змодельовати не лише деформацію і руйнування масиву, а й взаємодію газів детонації з породним середовищем, що особливо важливо для прогнозування розльоту кусків, викиду пилу та впливу на навколишнє середовище [6].

У гірничій практиці також широко використовуються емпіричні формули для оцінки ефективності дроблення залежно від параметрів заряду, конфігурації сітки буріння та ЛОПП (лінії найменшого опору). Питання взаємодії хвиль від суміжних зарядів (інтерференція), зростання тиску детонаційних газів у тріщинах, зрушення породи і вторинне дроблення внаслідок зіткнення фрагментів — все це є предметом численних теоретичних і експериментальних досліджень.

Узагальнюючи, можна стверджувати, що ефективність руйнування гірських порід вибухом визначається поєднанням дії ударних хвиль і газового тиску, при цьому вирішальне значення має структура породи, її тріщинуватість, властивості контактів між окремостями, геометрія підривної сітки, тип ВР і системи ініціювання. Подальший розвиток теорії руйнування передбачає інтеграцію чисельного моделювання, високошвидкісної діагностики процесів і адаптивних алгоритмів проектування підривних схем, що дозволяє підвищити точність прогнозування результатів буровибухових робіт у кар'єрах залізрудних родовищ, зокрема ПрАТ «Інгулецький ГЗК» [7].

Крім того, при аналізі процесів руйнування доцільно враховувати не лише миттєву реакцію порід на дію вибуху, а й післядії, що супроводжують процес переущільнення масиву. Це явище проявляється у вигляді повторного зміщення уламків, вторинного дроблення та формування зон ущільнення, які суттєво ускладнюють

виїмку породи. У деяких випадках, особливо у вологих або пластичних масивах, фіксується ефект тимчасового зміцнення породи внаслідок ущільнення, що потребує перегляду типу застосованої вибухової речовини або повторного буріння [8].

Рисунок 1.1 демонструє залежність швидкості детонації вибухової речовини типу ANFO від діаметра заряду. Видно, що зі зменшенням діаметра істотно знижується ефективність передачі енергії, що пов'язано з неповним розвитком фронту детонації в малогабаритних шпурах [8].

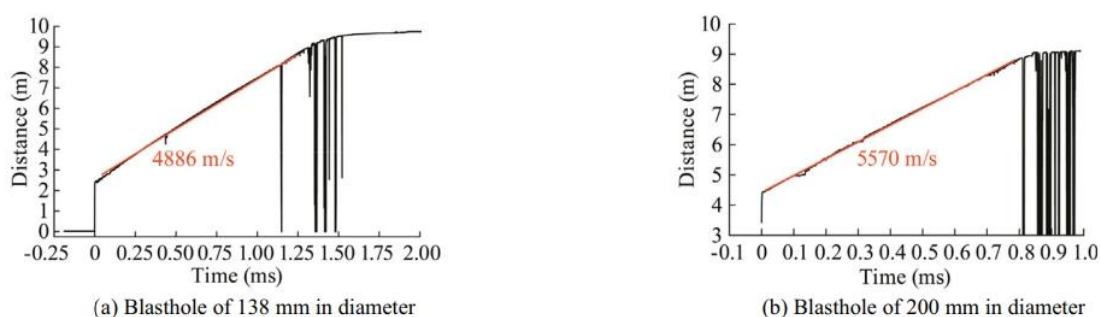


Рис. 1.1 – Залежність швидкості детонації вибухової речовини типу ANFO від діаметра заряду [8]

Важливо також враховувати вплив гірничо-геологічних умов на ефективність підривання. Наприклад, при наявності зон зміненої породи, глинистих прошарків, порід з високою вологістю або схильністю до набухання, механізм розповсюдження вибухової енергії кардинально змінюється. В таких умовах можуть виникати локальні перепади напружень, які або екранують енергію вибуху, або призводять до її концентрації в обмежених зонах. Це ускладнює прогнозування та знижує рівномірність дроблення.

Сучасні дослідження демонструють високу ефективність методів, що дозволяють комплексно оцінити стан гірського масиву перед підриванням. Зокрема, георадарне зондування, сейсморозвідка, геотермальне сканування дають змогу не лише виявити тектонічні

порушення, але й оцінити ступінь водонасиченості, щільність та наявність природних пустот. Ця інформація використовується для адаптації схеми буріння і підбору типу вибухової речовини.

Одним із перспективних напрямів удосконалення підривних технологій є використання модульованих вибухів, коли енергія підриву подається не одномоментно, а у вигляді послідовних імпульсів з контролем амплітуди та тривалості. Такий підхід дозволяє точніше керувати процесом руйнування, зменшити зону розльоту уламків, знизити вплив на прилеглі устої та забезпечити цілеспрямовану дію на зони з підвищеною міцністю.

Також відзначається інтенсивне впровадження в гірничу практику цифрових систем проєктування та аналізу підривних робіт. Програмні комплекси типу JKSImBlast, SHOTPlus, LDETS забезпечують тривимірне моделювання розміщення шпурів, визначення зон перекриття дії зарядів, прогноз гранулометричного складу після підриву. Ці системи дозволяють проводити попередній аналіз ефективності запропонованої схеми і вносити корективи на стадії підготовки, що значно зменшує ризики невдалого вибуху [8].

Рисунок 1.2 ілюструє розподіл зони пошкодження масиву при застосуванні комбінованих шпурів. Високий ступінь накладання зон руйнування свідчить про ефективну взаємодію зарядів у просторі, що дозволяє досягти більш рівномірного дроблення.

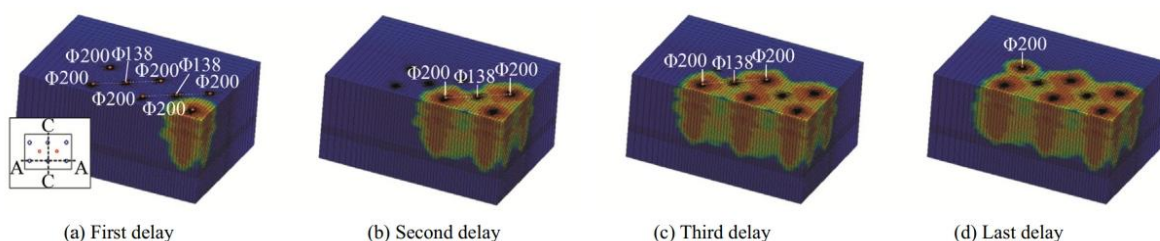


Рис. 1.2 – Розподіл зони пошкодження масиву при застосуванні комбінованих шпурів [8]

Оскільки основною метою процесу підготовки порід до виймання є створення умов для раціонального руйнування масиву з мінімальними втратами та деформаціями, забезпечення однорідного гранулометричного складу та зниження вібраційного навантаження на навколишнє середовище.

Теоретичні основи підготовки ґрунтуються на синтезі положень гірничої механіки, фізики вибухових процесів, механіки суцільних середовищ і прикладної геомеханіки. Енергія вибуху, як основне джерело руйнування, характеризується складною структурою поширення: від динамічного імпульсу на стінки шпуру до розповсюдження хвильових полів, які активують системи тріщин [9].

Формування гранулометричного складу після вибуху залежить від низки факторів: типу вибухової речовини, щільності навантаження, геометрії шпурової сітки, а також геологічної неоднорідності масиву. Особливої ваги набуває параметр лінії найменшого опору (ЛНО), що визначає найкоротший шлях вивільнення енергії від заряду до вільної поверхні. Оптимізація ЛНО дає змогу знизити витрати вибухової речовини при збереженні ефективності дроблення.

На практиці поширеними є моделі енергетичної дії вибуху, які враховують розподіл енергії в залежності від параметрів середовища та заряду. Так, модель Войцеховського дозволяє враховувати не лише геометрію заряду, а й акустичну жорсткість породи. Підвищенню точності прогнозу параметрів вибуху сприяє застосування емпіричних та напіваналітичних функцій, зокрема Swebrec-функції (Ouchterlony, 2005), що успішно описує розподіл уламків за розмірами [9].

Крім того, теоретична база сучасної підготовки порід включає питання керування хвильовим полем за рахунок детонаційних затримок, що реалізуються через короткосповільнене підривання (КСП). Правильно підібрана схема КСП дозволяє спрямувати фронт

руйнування, знизити рівень сейсмічного впливу й підвищити ефективність завантаження гірничої маси.

Особливу роль у розвитку теоретичних моделей відіграє використання чисельного моделювання. Зокрема, метод дискретних елементів (DEM) і метод скінченних елементів (FEM) дозволяють досліджувати динаміку руйнування в тривимірному просторі.

Узагальнення теоретичних підходів дозволяє сформулювати низку принципів ефективної підготовки гірських порід:

- Рациональне проектування сітки буріння з урахуванням ЛНО і геомеханіки уступів;
- Підбір типу ВР залежно від фізико-механічних властивостей породи;
- Індивідуалізація схеми підриву за геологічними умовами;
- Використання цифрових моделей бурових блоків і систем дистанційного моніторингу результатів вибуху.

Таким чином, сучасні теоретичні підходи дозволяють не лише глибше зрозуміти механізми руйнування масиву, а й створити передумови для широкого впровадження технологій інтелектуального підриву. Ці технології, у свою чергу, формують підґрунтя для розробки гнучких та адаптивних стратегій керування буровибуховими роботами відповідно до умов конкретного родовища. Урахування геомеханічних характеристик масиву, змінних властивостей порід, наявності структурних неоднорідностей та ризиків надмірного дроблення забезпечує умови для реалізації цільового керування параметрами вибуху.

У контексті зростаючих вимог до ефективності видобутку та екологічної відповідальності підприємств особливого значення набувають підходи, що інтегрують чисельне моделювання, дистанційний моніторинг та автоматизовані системи аналізу результатів вибуху. Завдяки цьому стає можливим перехід до

прогнозно-керованого підриву з урахуванням впливу на суміжні виробки, довкілля і якість гірничої маси.

1.2 Роль фізико-механічних властивостей гірських порід у виборі параметрів буровибухових робіт

Фізико-механічні властивості гірських порід виступають ключовим фактором, що визначає ефективність і безпечність буровибухових робіт при відкритій розробці родовищ. Параметри міцності, пружності, тріщинуватості та густини масиву безпосередньо впливають на вибір типу вибухової речовини, геометрію сітки буріння, а також характер поширення енергії вибуху в масиві.

Одним з основних параметрів, що враховуються при проектуванні вибухових робіт, є межа міцності на одноосьове стиснення. Цей показник визначає опір гірської породи прикладеному навантаженню та обумовлює обсяг енергії, необхідної для її руйнування. Також суттєве значення має модуль Юнга, який відображає здатність матеріалу деформуватись у пружній області, і коефіцієнт Пуассона, що описує зміну об'єму породи при навантаженні.

Нижче наведено типові значення фізико-механічних характеристик порід, які зустрічаються в межах родовища Інгuleцького ГЗК [7]:

Таблиця 1.1 – Фізико-механічні властивості типових гірських порід, характерних для умов ПРАТ «Інгулецький ГЗК» [7]

Тип породи	Густина, г/см ³	Межа міцності на стиск, МПа	Модуль Юнга, ГПа	Коеф. Пуассона	Коеф. тріщинуватості, 1/м
Магнетитовий кварцит	3.4	160–200	70–90	0.25	2–5
Гематитовий кварцит	3.2	140–170	65–85	0.23	3–6
Жильний кварц	2.65	100–120	50–65	0.20	6–9
Глинистий сланець	2.4	30–60	10–25	0.22	10–15

Для тріщинуватих порід вирішальну роль відіграє коефіцієнт тріщинуватості, який характеризує густоту та орієнтацію тріщин у масиві. Чим вищий цей коефіцієнт, тим легше порода руйнується при вибуху. Проте надмірна тріщинуватість може призвести до надлишкового дроблення та втрати крупної фракції, що негативно позначається на процесах навантаження і транспортування.

На рисунку 1.3 нижче проілюстровано характерну залежність між кількістю негабаритних уламків і ступенем тріщинуватості порід:

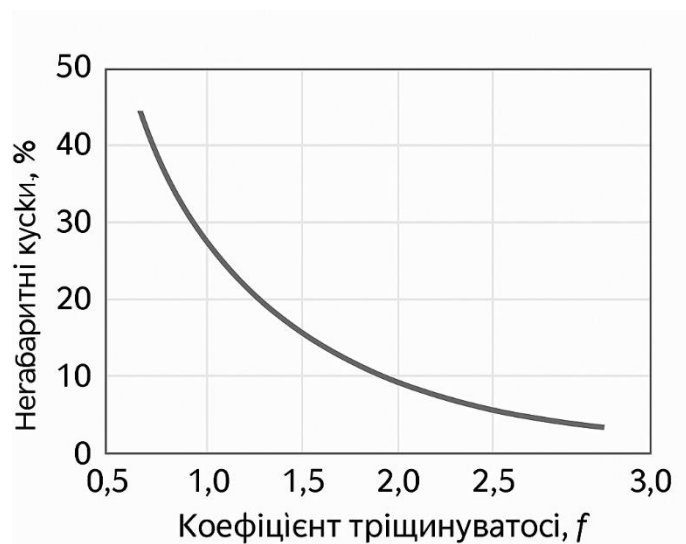


Рис. 1.3 – Графік залежності кількості негабаритних кусків від коефіцієнта тріщинуватості гірських порід [10].

Методи визначення фізико-механічних властивостей порід поділяються на лабораторні (наприклад, пресування циліндричних зразків) та польові (зондування, геофізичні дослідження, кінематичний аналіз тріщинуватості). Комбінування даних із різних джерел дозволяє створити повноцінну геомеханічну модель масиву, що використовується для оптимізації параметрів вибуху.

Отже, інтеграція фізико-механічних характеристик порід у проектування буровибухових робіт створює підґрунтя для впровадження адаптивних схем підривання, які враховують неоднорідності геологічної будови, забезпечують стабільну якість гірничої маси та знижують техногенне навантаження на навколишнє середовище.

1.3 Вивчення досвіду виконання буро-підричних робіт

Для поглибленого розуміння результатів, які демонструє сучасна практика, доцільно навести порівняльну візуалізацію ефективності дроблення гірських порід при застосуванні різних схем підриву. Так, згідно з результатами досліджень Leng et al. (2020), використання комбінованих шпурів із зарядами різної потужності дозволяє досягти істотного зменшення частки негабаритних уламків у вибуховому масиві.

У роботі [8] розглянуто п'ять схем свердловинного буріння й підриву, результати яких узагальнені на рис. 1.4 (а – відношення висоти «п'ятки» до висоти уступу, б – відсоток великих блоків ($>1 \text{ м}^3$) у виймальному об'ємі). Нижче – короткий опис кожного випадку та відповідний інженерний висновок.



Рис. 1.4 – Аналіз якості проробки підшви уступу і виходу негабариту для свердловин різного діаметру [8]

Випадок 1 – Лише свердловини $\varnothing 138 \text{ мм}$

Класична схема з дрібними діаметрами. Буріння великої кількості отворів при невеликому кроку та відстані призводить до рівномірного розподілу вибухової енергії по всьому уступу.

Результати: Найменше значення toe-ratio (мінімальна висота «п'ятки») та дуже низький відсоток oversize-блоків.

Забезпечує оптимальну фрагментацію і мінімальні залишки «п'ятки», проте має високу вартість буріння та знижений темп підривних робіт.

Випадок 2 – Лише свердловини Ø 200 мм

Опис: Використання низки великих отворів із збільшеним простором і відстанню для зменшення кількості і вартості буріння.

Результати: Найбільше toe-ratio (серйозні залишки «п'ятки») та високий відсоток oversize-блоків у нижній і середній частинах уступу.

Хоча знижується вартість буріння, енергія недостатньо розподіляється між затиснутими масивами, що призводить до грубих залишків і поганої фрагментації.

Випадок 3 – Додаток rocket-зарядів у колоні

Опис: У stemming великих отворів розміщуються дрібні заряди з високою швидкістю детонації для поліпшення дроблення верхньої частини уступу.

Результати: Toe-ratio і oversize-блоки зменшуються порівняно з випадком 2, але залишається помітний недолік у нижній частині уступу.

Rocket-заряди ефективні для покращення розділення верхнього шару, але не вирішують проблему «п'ятки» та oversize-блоків на дні.

Випадок 4 – Сателітні свердловини між основними отворами

Опис: Між головними Ø 200 мм свердловинами пробурено дрібні Ø 138 мм «спостережні» отвори із затримкою запалення, що сприяє додатковому дробленню між отворами.

Результати: Краща фрагментація верхньої частини уступу, ніж у випадку 3; зниження oversize-блоків, проте toe-ratio все ще вища, ніж у схемі з лише дрібними отворами.

Сателітні отвори підвищують ефективність розподілу енергії у верхній зоні, але лише частково усувають «п'ятку» на дні уступу.

Випадок 5 – Комбінована схема Ø 200 мм + Ø 138 мм

Чергування великих та дрібних свердловин у розширеній схемі буріння; дрібні отвори розміщено між основними для вирівнювання енергії у всіх шарах уступу.

Результати: Тое-ratio і oversize-блоки зведені практично до рівня випадку 1, зберігаючи при цьому переваги зменшеного обсягу буріння великими отворами.

Комбінована схема поєднує високу продуктивність велико-діаметрового буріння з ефективністю дроблення малими отворами, оптимізуючи вартість і забезпечуючи рівномірну фрагментацію по всій висоті уступу.

Комбінування свердловин різних діаметрів (випадок 5) дозволяє досягти фрагментації, порівнянної з традиційною дрібно-діаметровою схемою (випадок 1), але з меншими витратами на буріння та підрив, а також з контролем «п'ятки» й oversize-блоків у нижній частині уступу. Це рішення є найбільш збалансованим з погляду технологічної ефективності та економічності. Отже, сучасна теоретична база створює передумови для формування науково обґрунтованих рішень, що сприяють підвищенню продуктивності й безпеки робіт.

На графіку показано зміну фракційного складу після підриву: випадки із некомбінованими схемами демонструють більшу частку фракцій понад 1 м, що прямо пов'язано з формуванням залишкових «забоїв» та потребою у повторному дробленні. Застосування комбінованої системи дозволяє значно зменшити розмір уламків, досягти більш рівномірного фронту руйнування та знизити навантаження на екскаваторні комплекси.

Ці результати підтверджуються даними внутрішнього моніторингу ПрАТ «Інгулецький ГЗК», де на дослідних блоках за допомогою тривимірного сканування та аналізу гранулометрії встановлено зменшення обсягів негабаритів до 18–22% при застосуванні комбінованих зарядів, порівняно з 35–40% у стандартних схемах.

У перспективі практичне застосування зазначених рішень потребує подальшої інтеграції геоінформаційних технологій, моніторингових дронів, а також розробки математичних моделей для адаптивної корекції підривної сітки в реальному часі. Це дозволить досягти нового рівня керованості підривним процесом і забезпечити стабільність якісних показників у підготовці гірських порід до виймання.

Еволюція технічних рішень у цій сфері обумовлена як удосконаленням вибухових речовин та бурових технологій, так і накопиченням практичного досвіду на гірничих підприємствах. З історичної точки зору, розвиток технологій підривання пройшов шлях від простого шпурового підриву з використанням чорного пороху до складних схем короткосповільненого та електронного ініціювання з багатоступеневим контролем енергетичних параметрів.

У другій половині XX століття домінували методи буровибухових робіт із застосуванням гранульованих амонітів, які мали високу чутливість до механічного впливу, але обмежені можливості контролю. Із переходом до використання емульсійних вибухових речовин (ЕВР) та вибоїстих композицій типу ANFO, зросла гнучкість у підборі параметрів заряду залежно від гірничо-геологічних умов. Паралельно з цим удосконалювалися бурові установки: з'явилися самохідні багатошпурні бурові верстати з автоматизованим управлінням і GPS-навігацією.

У практиці підготовки масиву до виймання особливе місце посідає формування оптимальної сітки буріння. Невідповідність параметрів буріння геомеханічним характеристикам масиву призводить до надлишкового розльоту породи, утворення наднормативних брили та формування нерівного забою. За даними польових спостережень, типові помилки включають недотримання глибини шпурів, зміщення відносно осі уступу, неузгодженість лінії найменшого опору з конфігурацією блоку. Відповідно, у практиці Інгuleцького ГЗК значну

увагу приділяють контролю геометричних параметрів сітки, використовуючи системи геодезичного супроводу та лазерне сканування.

На підприємствах Криворізького залізничного басейну, включаючи ПрАТ «Інгулецький ГЗК», основною проблемою залишаються утворення негабаритних уламків і залишкових масивів («забоїв») після підриву. Це спричинює простої екскаваторів, додаткові витрати на вторинне дроблення та зниження продуктивності. У відповідь на ці виклики було запроваджено практику застосування комбінованих шпурів: у межах одного бурового блоку використовуються заряди різного діаметра або з різною швидкістю детонації. Це дозволяє вирівнювати фронт руйнування та забезпечувати більш рівномірне дроблення.

Значного поширення набула технологія короткосповільненого підриву з електронним програмованим ініціюванням, яка дає змогу точно регулювати часові інтервали між вибухами окремих шпурів. Практика показала, що навіть незначне зменшення перекриття зон напружень між сусідніми зарядами може призводити до підвищення ефективності руйнування без збільшення кількості вибухових речовин. Це важливо в умовах щільної забудови або при наявності інфраструктурних об'єктів поблизу кар'єру.

Іншою актуальною практикою є впровадження цифрових систем моделювання процесів буріння та вибуху. На базі даних геомеханічної зйомки формується віртуальна модель масиву, в яку інтегруються параметри бурових блоків. За допомогою програмного забезпечення (наприклад, BlastMetrix або SHOTPlus) моделюється зона впливу вибуху, прогнозується гранулометричний склад і визначаються оптимальні точки розміщення шпурів. Такі підходи вже апробовано в рамках пілотних проєктів на Інгулецькому ГЗК [7].

1.4 Адаптивні рішення та інновації в сучасній практиці буровибухових робіт

У практиці буріння й підривання особливої уваги набуває адаптація параметрів буріння до структурної неоднорідності гірських масивів. При наявності зон зниженої міцності або розвиненої тріщинуватості ефективним підходом є варіативна глибина шпурів або використання зарядів із диференційованою концентрацією енергії. Наприклад, у породах з тенденцією до розтріскування внаслідок хвильового резонансу доцільно застосовувати заряди з більш тривалим часом дії газового тиску.

Також у гірничій практиці України спостерігається тенденція до переходу від статичних до динамічно керованих систем ініціювання. Завдяки цьому підрильники отримують можливість оперативно змінювати часові характеристики підриву навіть безпосередньо перед вибухом, з урахуванням метеоумов, рівня вологості породи, температури та наявності водоносних горизонтів. Це суттєво знижує імовірність утворення негабариту та підвищує безпеку робіт [11].

У країнах з високим рівнем технічної модернізації, таких як Канада, Австралія та Чилі, широко впроваджуються системи машинного навчання для прогнозу результатів вибуху. Алгоритми, натреновані на великому обсязі даних, здатні автоматично генерувати варіанти сітки буріння та рекомендувати параметри зарядів. Аналогічні технології уже почали впроваджувати в окремих підрозділах українських гірничих компаній, включно з Інгuleцьким ГЗК у рамках технічної модернізації.

Досвід гірничих підприємств також свідчить, що ефективність буровибухових робіт значною мірою залежить від правильного поєднання технологічних інновацій з локальними геологічними

умовами. У складних гірничо-геологічних умовах (наприклад, при різкому чергуванні порід різної міцності) найбільш ефективними виявляються підходи, що поєднують динамічну адаптацію схеми підриву та передовий моніторинг стану масиву. Для цього використовуються сейсмічні датчики, глибокі зондування, тривимірна візуалізація та спеціальні дрони для знімання з повітря.

Важливим напрямом інновацій є інтеграція систем автоматизованого керування буровими комплексами з геоінформаційними базами родовища. Такі системи не лише забезпечують точність буріння, а й дозволяють формувати карту розподілу параметрів буріння у просторі, що потім слугує основою для розрахунку вибухових навантажень. Це сприяє зменшенню перевитрат ВР, зниженню екологічного впливу та зростанню безпеки.

У поєднанні з аналізом фрагментації породи за допомогою фотограмметричних методів, алгоритми штучного інтелекту дозволяють у режимі реального часу прогнозувати ефективність підриву ще до його проведення. На базі таких прогнозів оперативно змінюються параметри буріння, коригуються тип і маса заряду та часові інтервали сповільнення [12, 13].

Таким чином, накопичений практичний досвід підготовки гірських порід до виймання засвідчує стійку тенденцію переходу до інженерно обґрунтованих, цифрових підтримуваних рішень. Це дозволяє підвищити рівень контрольованості процесу, зменшити втрати руди, забезпечити безпечні умови праці та знизити загальні витрати на видобуток. На тлі посилення економічних вимог і екологічних обмежень подальший розвиток технологій підривання має базуватись на інтеграції геомеханічного аналізу, цифрового моделювання та адаптивного керування енергією вибуху.

РОЗДІЛ 2. АНАЛІЗ ДОСВІДУ ВИКОНАННЯ БУРО-ПІДРИВНИХ РОБІТ В КАР'ЄРІ ПРАТ "ІНГУЛЕЦЬКИЙ ГЗК"

2.1. Загальна характеристика і геологічна будова родовища

Інгулецьке родовище магнетитових кварцитів розташоване в південній частині Криворізького залізорудного басейну й відноситься до Лихманівського (Інгулецького) залізорудного району. Просторова орієнтація родовища визначається його заляганням у замковій частині Лихманівської синкліналі й продовженням східного крила цієї структури на північ. Від південних флангів, де концентрація магнетитових кварцитів досягає максимальних значень, корпус родовища простягається на 5,3 км уздовж західного схилу річки Інгулець, поступово звужуючись із 1,3 до 0,5 км у напрямку півночі, де воно перетинається з Інгулецьким родовищем багатих гематит–мартитових залізних руд і рядом дрібніших покладів Лихманівської залізорудної смуги. Така лінійна простяганість обумовлює наявність чітко вираженого кута падіння та простягання, що суттєво впливає на розробку уступів і визначення траєкторій кар'єрних робіт [14].

Літологічний склад товщі характеризується переважанням метаморфічних кварцитів та сланців зі змінною мінеральною асоціацією. Основну масу породного комплексу становлять кварцити слюдисті, амфібол–біотитові та магнетитові із силікатними включеннями, які формують основні резерви руди з вмістом заліза від 30 до 48 %. Сланці талькові та амфібол–біотитові утворюють тонкі прошарки, властиві перехідним зонам між кварцитовими масивами, і відзначаються підвищеною пластичністю та неоднорідністю механічних властивостей. Локальні гематит-магнетитові прожилки та джеспілітові прошарки визначають зони збагачення в структурі родовища, а інтрузії гранітів і мігматитів виступають як природні

бар'єри, що формують лабіринтові зони в межах кар'єру (рис. 2.2). За даними випробувань на стиснення за методикою Протодьяконова, міцність цих порід коливається в межах 20–25 МПа, що корелює з класами міцності IV-V і вказує на відносно сприятливі умови для ефективного проведення буропідривних робіт та зниження питомих витрат вибухових матеріалів [7, 14].

З точки зору гірничої технології, лінійна конфігурація родовища й неоднорідний літологічний склад вимагають адаптивного підходу до проектування уступів. Оптимальні параметри висоти і довжини уступів повинні визначатися з урахуванням кутів простягання, мінливості міцності породного масиву та геомеханічних умов, у тому числі факторів термального й гідрогеологічного градієнтів. Актуальним є застосування тривимірного геомеханічного моделювання із сегментацією блока по замкнених контурах ізодинамічних зон для прогнозування деформацій і забезпечення стабільності бортів кар'єру. До того ж, наукове обґрунтування вибору початкових і кінцевих координат добувних фронтів базується на граничних аналітичних обмеженнях $z_{min} \leq z \leq z_{max}$, що гарантують непорушність природних покривів і техногенних масивів.



Рис. 2.1 – Розміщення Інгулецького родовища в геологічній структурі Криворізького басейну [7]

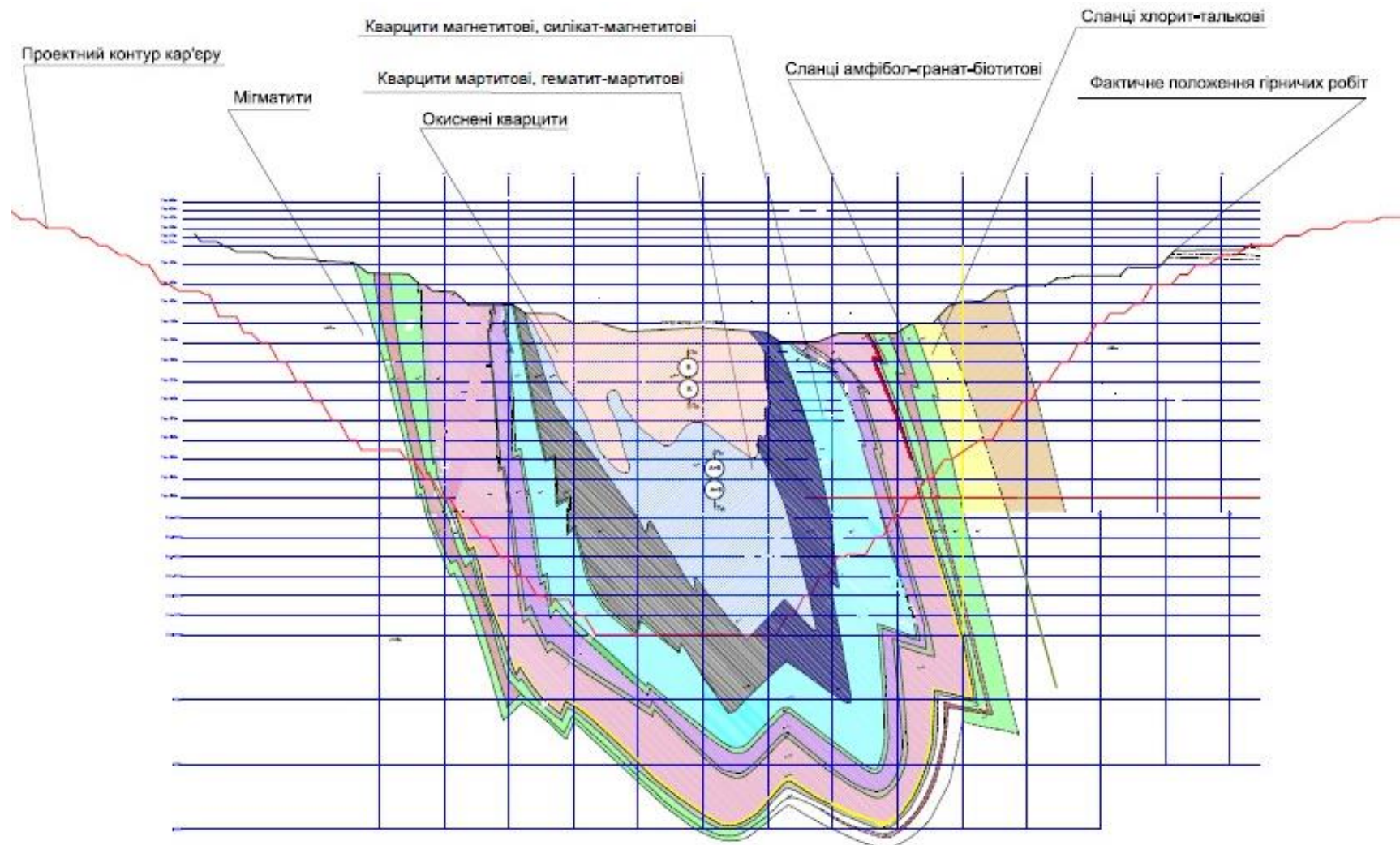


Рис. 2.2 – Поперечний розріз Інгuleцького родовища по МВ 70 [7]

2.2 Структурний аналіз підприємства

Приватне акціонерне товариство «Інгулецький гірничо-збагачувальний комбінат» – один із провідних гірничо-металургійних активів України, що володіє багаторівневою організаційно-економічною структурою. Загальна чисельність працівників комбінату вимірюється тисячами осіб, серед яких основну частину становлять безпосередньо гірничі робітники: бурильники, екскаваторники, водії автосамоскидів та оператори дробарок. Інженерно-технічні працівники (ІТР) відповідають за розробку кар'єрних планів, оптимізацію технологічних режимів і впровадження інновацій, а службовці адміністративного апарату координують логістику й управлінські процеси, забезпечуючи безперервність виробничого циклу. Структура персоналу динамічно коригується відповідно до виробничих завдань, але водночас залишається оптимальною для підтримки стабільного рівня продуктивності [14].

Організаційно-виробничий ланцюг ПрАТ «ІнГЗК» складається з низки взаємопов'язаних підрозділів, які реалізують повний цикл відкритої розробки магнетитових кварцитів і подальшої переробки:

Кар'єр – виконує буропідривні роботи з використанням екологічно безпечних емульсійних вибухових речовин, екскавацію та транспортування руди на дільницю первинного подрібнення [7, 15];

Дробильна фабрика – забезпечує чотириступеневе дроблення з метою підготовки матеріалу до збагачення [7, 15];

Рудозбагачувальні фабрики (РЗФ-1 і РЗФ-2) – РЗФ-1 спеціалізується на сухій магнітній сепарації, РЗФ-2 поєднує магнітно-флотаційне збагачення, що дозволяє досягати вмісту Fe у концентраті 63,7–66,5 % [7, 15];

Цех технічного водопостачання та шламового господарства – керує циркуляцією технологічної води та гідравлічним видаленням хвостів збагачення [7, 15];

Залізничний та автотранспортний цехи – забезпечують внутрішньокар'єрну і міжмайданчикову логістику, перевезення розкривних порід і відвантаження кінцевого продукту споживачам.

Технологічний процес на «ІНГЗК» базується на циклічно-потоківій системі відкритої розробки: буропідливний забій → автосамоскиди → дробильне агрегатне подрібнення → концентрування на РЗФ. Порівняно з кращими світовими практиками (повна автоматизація з використанням безпілотних транспортних засобів та передових процесів збагачення), застосовувані на комбінаті рішення є консервативні, проте стабільні й надійні. Водночас поступово впроваджуються високопродуктивні насоси, сучасні флотомашини та елементи цифрового контролю, що дозволяє знизити трудомісткість операцій і підвищити продуктивність праці.

Ринкова стратегія ПрАТ «ІНГЗК» включає забезпечення внутрішнього споживання та активний експорт концентрату високої якості. Українські металургійні комбінати отримують основні обсяги сировини для виробництва агломерату й сталі, тоді як експорт охоплює країни Європи, Азії та Близького Сходу. Конкурентні переваги комбінату – високий вміст заліза, відпрацьована логістика (залізничне сполучення з станцією «Інгулець-Новий» і доступ до морських портів) та гнучкість в організації поставок. Завдяки цьому попит на продукцію залишається стабільно високим, що сприяє фінансовій стійкості підприємства та зміцненню його позицій на глобальному ринку залізничної сировини.

2.3. Аналіз стану гірничих робіт

У минулому Приватне акціонерне товариство «Інгулецький гірничо-збагачувальний комбінат» (ПрАТ «ІНГЗК») вирізнялося високоефективною технологічною системою, котра забезпечувала повний цикл видобутку, транспортування й переробки магнетитових кварцитів Інгулецького родовища. Ця система спиралася на відкриту розробку кар'єру з циклічно-поточною організацією робіт, до складу якої входили буропідривні операції, екскавація, доставка сировини великовантажними автосамоскидами та залізничним транспортом, а також багатостадійне дроблення й збагачення руди. Натепер кар'єр перебуває в тимчасовому простої, що зумовлено зовнішніми факторами ринку та необхідністю проведення ремонтно-профілактичних робіт на обладнанні [7, 14-15].

Під час активної фази виробництва кар'єр був оснащений сучасними екскаваторними ділянками, буровими комплексами та розвиненою системою внутрішньокар'єрного транспорту. Первинне подрібнення виконувала дробильна фабрика за чотириступеневою схемою, де зерновий розмір руди поступово зменшувався у дробарках крупного, середнього та дрібного дроблення. Надалі сировина спрямовувалася на рудозбагачувальні фабрики: РЗФ-1 працювала за технологією трьохступеневого кульового млина із сухою магнітною сепарацією, тоді як РЗФ-2 застосовувала двоступеневе самоподрібнення з наступною магнітно-флотаційною обробкою, що дозволяло досягати високих показників вилучення заліза.

Цех технічного водопостачання та шламового господарства забезпечував безперебійний циркуляційний контур технологічної води та відведення хвостів збагачення гідравлічним способом, що сприяло стабільності виробничого циклу. Продукцією комбінату був

залізорудний концентрат двох марок: агломераційний магнетитовий (63,7 % Fe, вологість 10,5 %) і концентрат МФД-1 (не менше 66,5 % Fe, вологість 10,5 %), які поставлялися як вітчизняним металургійним заводам, так і експортувалися до країн Європи, Азії та Близького Сходу [7].

Сировинна база складалася з магнетитових кварцитів Інгuleцького родовища зі стабільним вмістом заліза (32,60 % загального Fe та 23,60 % Fe магнетиту за даними на 2024 р.). Балансові запаси, затверджені на кінець 2023 р., перевищували 865 млн т, що гарантовано покривало потреби комбінату на багато років уперед. Матеріально-технічне забезпечення реалізовувалося за рахунок співпраці з вітчизняними та закордонними постачальниками: УЗТМ і НКМЗ постачали бурове та дробильне обладнання, а насосні агрегати надходили від «Уралгідромаш» та американських виробників.

Режим роботи комбінату був безперервним: виробництво здійснювалося в три зміни з чітким тижневим плануванням добових графіків, що дозволяло досягати запланованих обсягів — наприклад, 29,27 млн т руди у 2024 р. Енергопостачання комбінату здійснювалося через чотири лінії 150 кВ від підстанцій «Гірна» та «Нафтопровід» АТ «ДТЕК Дніпровські електромережі». Загальна встановлена потужність головних понижуючих підстанцій сягала 492 МВА, із фактичним споживанням 250–270 МВт/год; мережа розподільчих підстанцій (35 кВ і 6 кВ) та тягових пунктів забезпечувала живлення кар'єрної техніки, фабрик та залізничного транспорту. Оперативний контроль за енергомережами здійснював диспетчерський пункт цеху мереж і підстанцій, що гарантувало надійність електропостачання до початку простою.

2.4 Аналіз виробничих умов і стану підготовки гірських порід до виймання на кар'єрі ПрАТ «Інгулецький ГЗК»

Приватне акціонерне товариство «Інгулецький гірничо-збагачувальний комбінат» (ПрАТ «ІнГЗК») є одним із провідних виробників залізорудної сировини в Україні. Підприємство спеціалізується на видобутку магнетитових кварцитів відкритим способом з подальшим збагаченням. Кар'єр розташований у південно-східній частині Кривбасу та відзначається складними гірничо-геологічними умовами, значною глибиною (понад 400 м) і розвинутою технічною інфраструктурою.

Підготовка гірських порід до виймання на Інгулецькому ГЗК здійснюється за допомогою комплексу буровибухових робіт, які виконуються згідно з внутрішніми регламентами підприємства. На кар'єрі використовуються самохідні бурові установки типу СБШ-250МН, Epiroc DM75E та DML-1200. Зокрема, верстат СБШ-250МН вирізняється меншою чутливістю до зміни міцності порід, що забезпечує стабільність буріння, тоді як Epiroc DM75E, попри вищу продуктивність, демонструє зниження швидкості буріння на 1,22% при зростанні міцності масиву на 1%. Буріння виконується з урахуванням геомеханічної структури уступів і змінної міцності порід по глибинах. Типові параметри буріння включають діаметр шпурів 250–310 мм і глибину до 20 м, при цьому довжина колонкового заряду становить близько 10 м, маса заряду — до 650 кг, а набійка — близько 5 м. за допомогою комплексу буровибухових робіт, які виконуються згідно з внутрішніми регламентами підприємства. На кар'єрі використовуються самохідні бурові установки типу DML-1200 та ROC L8, що забезпечують буріння шпурів діаметром 250–310 мм на глибину до

20 м. Буріння виконується з урахуванням геомеханічної структури уступів і змінної міцності порід по глибинах [7, 16].

У якості вибухових речовин широко застосовуються емульсійні композиції на основі ANFO, що готуються безпосередньо на місці з використанням мобільних зарядних станцій. Основною схемою ініціювання є короткосповільнене підривання (КСП) з використанням електронних систем типу і-коп або Nonel. Це дозволяє гнучко регулювати черговість підривів та адаптувати процес до реальних умов масиву.

Разом з тим, за результатами виробничого аналізу, у підготовці порід до виймання існують проблеми, які потребують усунення. Однією з основних є надмірна частка негабаритних уламків, що утворюються внаслідок неузгодженості між розміщенням шпурів, затримками між вибухами та нерівномірністю масиву. Наявність таких уламків ускладнює навантаження породи екскаваторами, викликає простої автотранспорту та потребує додаткового дроблення. За внутрішніми оцінками підприємства, частка негабаритів коливається в межах 30–40% у критичних ділянках уступу.

Іншим критичним моментом є втрата частини корисної копалини у вигляді дрібнозернистого матеріалу, який утворюється при надмірному подрібненні внаслідок надмірного навантаження або неправильно обраної структури заряду. Це призводить до зниження виходу кондиційного концентрату на збагачувальній фабриці та впливає на техніко-економічні показники підприємства.

Узагальнені результати аналізу буріння та підривання на підприємстві демонструють, що при застосуванні однотипних схем у різних геологічних блоках виникає нестабільність у гранулометричному складі. Це пояснюється низьким рівнем індивідуалізації схем підриву, обмеженим використанням цифрових моделей геологічного середовища та недостатнім охопленням засобами моніторингу.

У перспективі Індулецький ГЗК має потенціал для впровадження більш адаптивних технологій підготовки гірських порід до виймання, включаючи:

- використання спліт-схем буріння з регульованою глибиною та діаметром шпурів;
- перехід на системи гнучкого електронного ініціювання з дистанційним налаштуванням;
- інтеграцію результатів георадарного зондування до моделей бурових блоків;
- впровадження систем візуального контролю якості вибуху на основі дронів і комп'ютерного аналізу фрагментації.

Загалом, наявні технічні рішення, досвід персоналу й технологічна база ПрАТ «ІнГЗК» створюють сприятливі умови для підвищення ефективності підготовки гірських порід до виймання за рахунок вдосконалення методів буріння, оптимізації підривних схем і впровадження цифрових інструментів контролю та прогнозування результатів вибуху.

З метою системного узагальнення виявлених протягом переддипломної практики проблем і потенційних напрямів підвищення ефективності підготовки гірських порід на підприємстві було побудовано аналітичну таблицю, яка враховує причинно-наслідкові зв'язки та шляхи технологічного вдосконалення (таблиця 2.1).

Як видно з таблиці, більшість наявних технологічних та організаційних проблем мають чітко визначену природу та можуть бути усунені шляхом впровадження сучасних технічних рішень, зокрема інструментів цифрової трансформації виробничих процесів. Системна робота у цьому напрямі дозволить підвищити ефективність гірничих робіт, зменшити питомі витрати та забезпечити стабільність видобутку навіть в умовах змінної геологічної структури масиву.

Таблиця 2.1 – Основні проблеми підготовки гірських порід до виймання на кар'єрі ПрАТ «ІнГЗК» та шляхи їх усунення

№	Виявлена проблема	Ймовірна причина	Потенційний наслідок	Рекомендовані рішення
1	Високий рівень негабаритних уламків (30–40%)	Неправильна сітка буріння, нерівномірність масиву	Простої техніки, додаткове дроблення	Індивідуалізація сітки буріння, 3D-моделювання
2	Втрати кондиційної руди у вигляді дріб'язку	Надмірне подрібнення, перевищення навантаження	Зниження виходу концентрату	Регулювання діаметра шпурів і типу заряду
3	Нестабільний гранулометричний склад у різних блоках	Уніфіковані схеми підриву	Зниження ефективності навантаження	Впровадження зонального керування підривом
4	Обмежена автоматизація та візуалізація	Відсутність цифрового супроводу	Нерівномірна якість вибуху	Використання дронів, лазерного сканування
5	Низький рівень аналізу ефективності підривів	Відсутність фідбеку за результатами вибуху	Неможливість покращення параметрів	Використання ПЗ для аналізу фрагментації (Split-Desktop тощо)

У сучасних умовах відкритої розробки залізорудних родовищ ефективність шарошкового буріння стає вирішальним чинником оптимізації якості підривного ладу та зниження питомих витрат на розкривні роботи. Аналіз накопичених емпіричних даних і теоретичних досліджень дозволяє сформулювати такі ключові положення для технічного забезпечення бурових робіт:

1. Класифікація бурових верстатів за механізмом обертально-подаючого приводу. Різномірність гірських порід у межах одного уступу

зумовлює значні коливання їх міцності, абразивності та структурної непостійності. Отже, впровадження чіткого розподілу верстатів шарошкового буріння за типом і потужністю обертально-подаючого механізму дозволяє адаптуватися до цих змін у реальному часі та забезпечити оптимальне співвідношення продуктивності й ресурсу бурових інструментів.

2. Налаштування режимних параметрів залежно від фізико-механічних властивостей порід. Експериментальні дослідження підтверджують, що для забезпечення рівномірного нарізання свердловин необхідно встановлювати індивідуальні значення частоти обертання доліт, зусилля подачі та тиску повітря в системі шламовидалення, виходячи зі спектральних характеристик міцності, мікроструктурних дефектів і абразивності конкретного масиву порід. Такий підхід дозволяє знизити відхилення від проектної глибини свердловини та забезпечити рівномірну якість вибухового забою.

3. Автоматизація процесу буріння. Науковці наголошують на необхідності створення систем повної автоматизації буріння з функцією самоадаптації режимних параметрів до зміни умов навколишнього середовища аж до мінімізації участі людини в управлінні процесом. Використання інтелектуальних контролерів дозволяє в реальному часі коригувати обертово-подаючий момент, режим шламовидалення та режим долота, що особливо важливо при проходженні тріщин та неоднорідностей гірської маси.

4. Розробка адаптивних шарошечних верстатів. Адаптивні бурові системи повинні мати вбудовані датчики критичних навантажень та механізми компенсації для проходження тріщинних зон, порушень суцільності та шарів із різним рівнем міцності. Це передбачає використання змінних розмірів торцевих роликів, регульованої жорсткості підшипникових елементів і системи автоматичного

регулювання кута атаки доліт [17]. Такі рішення сприяють зниженню вібрацій та підвищенню ресурсу обладнання.

5. Перегляд меж застосування технологій буріння. З огляду на швидкий розвиток матеріалознавства, удосконалення конструкцій бурових інструментів і впровадження нових сплавів, необхідно періодично переглядати раціональні межі використання різних способів і засобів буріння з урахуванням економічної кон'юнктури гірничої промисловості, оновлення парку верстатів та інтеграції сучасних електронних систем керування [17]. Це дозволяє своєчасно впроваджувати інновації та підтримувати конкурентоспроможність виробництва.

Вибір конкретних моделей бурових верстатів для виконання робіт у глибоких залізородних кар'єрах повинен спиратися на всебічний аналіз низки взаємопов'язаних параметрів, що охоплюють технологічні, економічні та геолого-механічні аспекти. По–перше, особлива увага має бути приділена потужності приводу та діаметру доліт, оскільки від цих характеристик залежить здатність устаткування долати високий опір міцних гірських порід і забезпечувати необхідну швидкість буріння. По–друге, важливою є можливість тонкого налаштування режимів обертання та подачі, адже зміна частоти обертів і швидкості просування долота дозволяє адаптувати процес буріння до зон зміненої міцності та неоднорідності рудного масиву, мінімізуючи вібраційні навантаження і зношуваність інструменту.

По–третє, необхідно враховувати ресурсоємність систем шламовидалення та водовідведення: ефективне виведення бурового шламу запобігає накопиченню відходів у свердловині, знижує ймовірність заклинювання доліт та підвищує безперервність роботи верстата. По–четверте, важливим критерієм є наявність сучасних модулів автоматизації та дистанційного моніторингу, які забезпечують

своєчасне реагування на відхилення параметрів буріння, автоматичне коригування робочих режимів і профілактику перевантажень.

Крім того, слід звертати увагу на системи попередження критичних навантажень — датчики температури, тиску та вібрацій, що фіксують надмірні навантаження й сигналізують про необхідність технічного обслуговування до виникнення аварійної ситуації.

Лише комплексне врахування всіх перелічених факторів — від базової механічної потужності до рівня інтеграції інтелектуальних систем управління — дозволяє досягти високої продуктивності бурових робіт, значно зменшити простої обладнання та оптимізувати загальні експлуатаційні витрати на етапі підготовки підривного забою.

У межах Інгuleцького кар'єру СБШ-250МНА виступає ключовим буровим верстатом, поєднуючи в собі потужну технічну основу та гнучкі технологічні можливості. Останній придбаний буровий верстат наведений на рис. 2.3.

Типові характеристики найбільш поширених моделей шарошкових верстатів наведені в таблиці 2.2.



Рис. 2.3 – Верстат СБШ-250МНА на кар'єрі Інгuleцького ГЗК [17]

Таблиця 2.2 – Характеристики типорозмірного ряду шарошкових бурових верстатів [7, 13, 17]

Параметр	Модель верстата					
	СБШ 160/200-40	СБШ 160/200-40 Д	СБШ-250МНА-32	СБШ 250 Д	СБШ-250/270 - 60	СБШ-270/311 КП
1 Діаметр буріння, мм	(160; 215)*	(160; 215)*	250	200 - 270	250, 270	270, 311
2 Довжина штанги, м	2	2	8	9,85	11,6	7,25
3 Максимальна глибина буріння, м:	40	40	32	37	58	29
4 Кути нахилу свердловин, град	0; 15; 30	0; 15; 30	0; 15; 30	0; 15; 30	0; 15; 30	0;5;10; 15;20;25; 30
5 Верхня межа частоти обертання става, об/хв	120	120	120	150	100	110
Максимальне зусилля подачі, кН	235	235	300	300	300	350
7 Максимальний крутний момент, Нм (кГм)	6867(700)	6867(700)		1300		
8 Швидкість подачі при бурінні, м/хв	0 - 8	0 - 8	0 - 3	0 - 6	0 - 6	0 - 3
9 Швидкість спуску-підйому става, м/хв	0 - 15	0 - 15	12	15 / 25	22	13
10 Максимальна швидкість руху верстата, км/год	1,5	1,5	1,14	2,5	1,5	1,15
11 Тип двигуна	Електр.	Дизель	Електр.	Дизель	Електр.	Електр.
12 Встановлена потужність, кВт, не більше	387	485	505	485	709	584
13 Номінальна напруга живлення, В	380		380		380	6000
15 Керівний ухил, град	12	12	12	12	12	12
18 Габаритні розміри, м						
а) з піднятою мачтою:	10,8	10,0	10,5	11,8	14,1	13750 ± 340
- довжина	5,4	5,6	5,7	6,9	6,5	6500 ± 210
- ширина	13,3	13,5	16,2	18,45	21,2	19500 ± 500
- висота	13,5	13,0	15,6	18,1	20,9	19000 ± 485
б) з опущеною мачтою:	5,4	5,6	5,7	6,9	6,5	6500 ± 210
- довжина	6,1	6,1	6,6	7,1	8,0	7100± 220
- ширина						
- висота						
Маса верстата, т	50	50	85	108	120	

РОЗДІЛ 3. ОПТИМІЗАЦІЯ ПАРАМЕТРІВ БУРІННЯ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ БУРОПІДРИВНИХ РОБІТ В КАР'ЄРІ ПРАТ «ІНГУЛЕЦЬКИЙ ГЗК»

З досвіду ведення бурових робіт в кар'єрах групи Метінвест відомі поодинокі випадки адаптації діаметру бурового долота до різних умов експлуатації [7]. Дослідимо його вплив на ефективність бурових робіт.

При відпрацюванні міцних гірських порід відкритим способом перед проведенням буро-вибухових робіт ставиться завдання технічної підготовки масиву до подальшої екскавації та транспортування. Вибухові заряди мають виконувати дві основні функції: забезпечувати чітке відділення гірської маси за заздалегідь заданими лініями розкриття та роздроблювати відокремлені блоки до розмірів, сумісних із робочими параметрами вантажно-транспортного обладнання.

До буро-вибухових робіт висувуються такі ключові вимоги [18-20]:

1. Гарантування оптимального ступеня подрібнення при збереженні сортності та якості корисної копалини;
2. Формування фракцій розкривної маси відповідних геометричних розмірів і форми для безперешкодної роботи екскаваторів та автосамоскидів;
3. Забезпечення об'єму розкритої породи, що відповідає проектним показникам потужності кар'єру;
4. Підвищення економічної ефективності та безпеки виконання буро-вибухових операцій;
5. Мінімізація негативного впливу на навколишнє середовище шляхом контролю за пиловиділенням і викидом шкідливих речовин.

Максимальний розмір окремого фрагмента гірської породи визначається за формулою [18]:

$$a \leq 0,8 \times \sqrt[3]{E} = 0,8 \times \sqrt[3]{8} = 1,6 \text{ м}^3, \quad (3.1)$$

де E – геометрична ємність ковша.

Більші куски подрібненої породи підлягають вторинному дробленню у вибої. В умовах кар'єру Інгулецького ГЗК, де коефіцієнт міцності порід по шкалі професора Протод'яконова становить $f=14-20$, використовуються верстати шарошкового буріння типу СБШ-250-МНА.

Визначимо діаметр заряду [18]:

$$d_z = k_p \times d_d, \text{ м} \quad (3.2)$$

де d_d - діаметр долота, м ($d_d=0,243$ м);

k_p - коефіцієнт розширення свердловини

$$k_p = 1,06 - (f - 2) \times 0,003 \quad (3.3)$$

де f - коефіцієнт міцності порід по шкалі професора М.М. Протод'яконова ($f_p=18$)

$$k_p = 1,06 - (18 - 2) \times 0,003 = 1,012,$$

Обчислений діаметр заряду є вихідним параметром для розрахунку опору породного масиву в підшві при закладці наступних рядів свердловин. Заряд заданого діаметра долає цей опір і забезпечує потрібну крупність роздробленої маси, що, в свою чергу, забезпечує оптимальні режими роботи вантажно-транспортного комплексу відповідно до поданої формули [18]:

$$W_2 = k \times d_z \times \sqrt[4]{\frac{A \times Q}{f}}, \text{ м} \quad (3.4)$$

де k - емпіричний коефіцієнт (1,05);

Δ - щільність заряджання, кг/м³ (1150 кг/м³);

Q - теплота вибуху, кДж/кг (3750 кДж/кг).

$$W_2 = 1,05 \times 0,25 \times \sqrt[4]{\frac{1150 \times 3750}{18}} = 5,7 \text{ м};$$

Підрахуємо питомі витрати ВР за формулою:

$$q = 12 \sqrt[4]{\frac{f^3 \times \Delta}{Q^3}}, \text{ кг/м}^3 \quad (3.5)$$

де 12 - емпіричний коефіцієнт.

$$q = 12 \sqrt[4]{\frac{18^3 \times 1150}{3750^3}} = 1,091 \text{ кг/м}^3;$$

3. Визначимо довжину перебуру ($l_{\text{пер.}}$) за формулою:

$$l_{\text{пер}} = 0,15 \times H_y + 0,1 \times f - 5 \times d_3, \text{ м.} \quad (3.6)$$

$$l_{\text{пер}} = 0,15 \times 15 + 0,1 \times 18 - 5 \times 0,25 = 2,8 \text{ м};$$

Довжина вертикальних свердловин (l_c) на кар'єрах більше висоти уступу на величину перебуру, тоді:

$$l_c = H_y + l_{\text{пер}}, \text{ м.} \quad (3.7)$$

$$l_c = 15 + 2,8 = 17,8 \text{ м};$$

Визначимо місткість заряду в 1 м свердловини:

$$P = \frac{\pi \times d^2}{4} \Delta, \text{ кг/м} \quad (3.8)$$

Визначимо довжину забійки за формулою:

$$l_{\text{заб}} = l_c - \frac{W_{22} \times H_y \times q}{P}, \text{ м} \quad (3.9)$$

$$l_{\text{заб}} = 17.8 - \frac{5.7^2 \times 15 \times 1.091}{46.6} = 6.4 \text{ м};$$

Визначення необхідної кількості бурового устаткування

Визначимо вихід гірської маси з 1 м свердловини:

$$V = \frac{(W_1 + W_2(n-1)) \times H_y}{\left(\frac{2}{a_{1\text{сп}}} + \frac{n-1}{W_2}\right) \times l_c}, \text{ м}^3 \quad (3.10)$$

де n - кількість рядів свердловин у блоці, 4;

$$V = \frac{(7.9 + 5.7(3-1)) \times 15}{\left(\frac{2}{8.2} + \frac{3-1}{5.7}\right) \times 17.8} = 27.3 \text{ м}^3;$$

Визначимо сумарну кількість метрів свердловин, необхідних для забезпечення річної продуктивності кар'єру по руді:

$$\sum l_c = \frac{A}{V} \cdot K_{\text{п}}, \text{ м} \quad (3.11)$$

де A - річна кількість гірської породи, що відпрацьовується, м^3

V - вихід гірської маси з 1 м свердловини, м^3 ;

$K_{\text{п}}$ - коефіцієнт втрат свердловин (1,07).

Визначимо необхідну кількість верстатів:

$$N_c = \frac{\sum l_c}{P_{\text{см}} \times N_{\text{см}} \times N_{\text{рд}}}, \text{ од.}, \quad (3.12)$$

де $\sum l_c$ - сумарна річна довжина свердловин, м;

$P_{зм}$ - змінна продуктивність верстата, м/см (70 м/зм);

$N_{зм}$ - кількість змін роботи бурового устаткування на добу, шт;

$N_{р\partial}$ - кількість робочих днів у році, днів ($N_{р\partial} = 335$ днів).

$$N_c = \frac{345830}{70 \times 2 \times 335} = 7,4 \text{ од.};$$

Далі проведемо аналогічні розрахунки для інших діаметрів долота від 160 до 320 мм, але врахуємо і відповідну зміну швидкості буріння верстатів, отриману з Норм технологічного проєктування і виробничого хронометражу [7, 19]. Результати розрахунків зведемо в таблицю.

При зменшенні діаметру долота можна спостерігати, що продуктивність верстата закономірно зростає. Внаслідок збільшення діаметру свердловин зменшується їх сумарна довжина, оскільки параметри сітки зростають. Взаємний вплив цих двох факторів, що мають протилежну дію, можна спостерігати при визначенні парку бурових верстатів. Загалом, розрахункова кількість верстатів зменшується із зростанням діаметру свердловин. Це значить, що сумарна протяжність свердловин по мірі зростання діаметра зменшується швидше, ніж продуктивність верстата. Результати розрахунків для міцності порід $f=18$ наведені у таблиці 3.1.

В таблиці 3.2 наведені аналогічні розрахунки для міцності $f=16$, а у таблиці 3.3 – для $f=20$.

Відповідна візуалізація розрахунків наведена на рисунках 3.1 – 3.3.

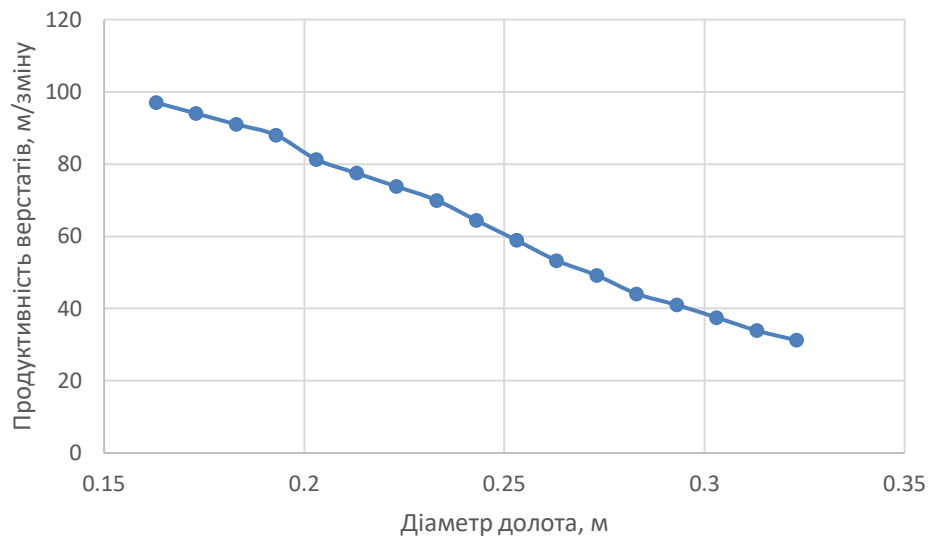
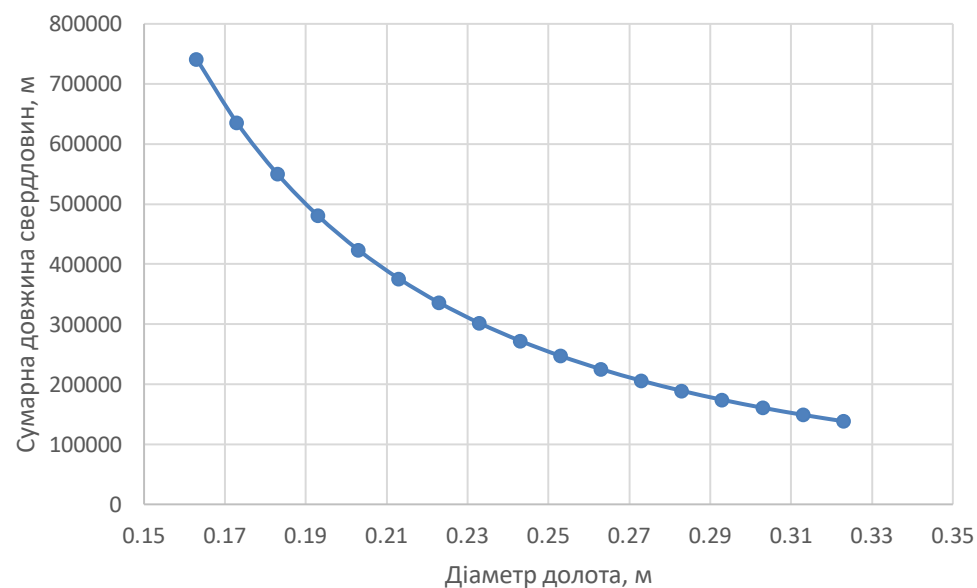


Рис. 3.1 – Графік залежності продуктивності бурового верстату від діаметру долота при міцності порід $f=18$

Таблиця 3.1 – Розрахунок параметрів БПР для $f=18$

Діаметр долота, м	0,163	0,173	0,183	0,193	0,203	0,213	0,223	0,233	0,243
Сумарна довжина свердловин, м	741442,1	635139,7	549947,0	480636,0	423500,9	375856,1	335716,6	301590,0	272336,7
Продуктивність верстата, м/зміну	97	94	91	88	81,3	77,5	73,8	70	64,4
Кількість верстатів, од	10,92	9,65	8,63	7,80	7,44	6,93	6,50	6,15	6,04
Діаметр долота, м	0,253	0,263	0,273	0,283	0,293	0,303	0,313	0,323	
Сумарна довжина свердловин, м	247074,5	225111,9	205900,6	189001,5	174059,7	160785,5	148941,0	138329,1	
Продуктивність верстата, м/зміну	58,9	53,3	49,2	44,1	41	37,5	33,9	31,2	
Кількість верстатів, од	5,99	6,03	5,98	6,12	6,06	6,13	6,28	6,33	

Рис. 3.2 – Графік залежності сумарної довжини свердловин від діаметру долота при міцності порід $f=18$

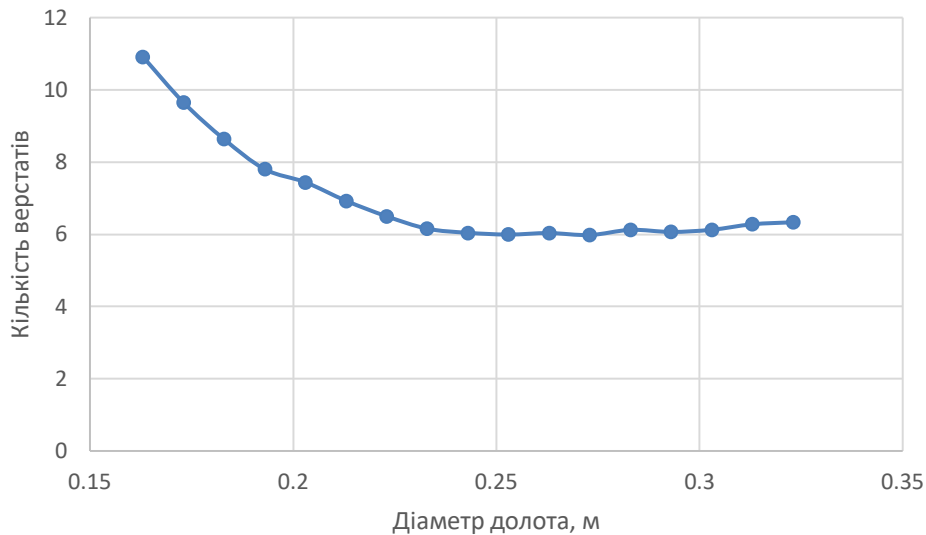


Рис. 3.3 – Графік залежності розрахункової кількості верстатів від діаметру долота при міцності порід $f=18$

Враховуючи, що кількість бурових верстатів при зміні діаметра долота визначалася за умови рівномірної питомої витрати вибухових речовин, різницею витрат на вибухові речовини можна знехтувати. На результуючому графіку кількості верстатів можна спостерігати зону оптимуму для значень діаметру 0,233 – 0,283 м з мінімальним значенням кількості верстатів при діаметрі долота 273 мм.

Це може свідчити, що такий діаметр долота забезпечує оптимальне використання параметрів шарошкових бурових верстатів, як наслідок призводить до оптимізації параметрів буро-підричних робіт і тому рекомендується для подальшого впровадження. Досвід буропідричних робіт в кар'єрі свідчить, що подальше надмірне збільшення діаметру призводитиме до погіршення гранулометричного складу розвалу порід, однак дане питання потребує подальшого експериментального дослідження.

ВИСНОВКИ І РЕКОМЕНДАЦІЇ

Виконаний в роботі аналіз теоретичних основ підготовки порід до виймання показав, що ефективність руйнування гірських порід вибухом визначається взаємодією хвильових і газодинамічних фаз детонації та механічними властивостями масиву (міцність, тріщинуватість, пружні характеристики). Класичні моделі і сучасні чисельні підходи виділяють ключові параметри: питомий заряд, режими короткосповільненого підривання і характеристики лінійного нашарування окислених матеріалів. Емпіричні функції є ефективним засобом прогнозу гранулометричного складу, проте потребують локального калібрування відповідно до гірничо-геомеханічних умов.

Аналіз сучасного стану буропідричних робіт на кар'єрі Інгuleцького ГЗК виявив високий потенціал для оптимізації. Були виявлені основні проблеми технологічного процесу і шляхи їх вирішення, що потребують аналізу показників роботи бурових верстатів в різних умовах та подальшої адаптації параметрів їх експлуатації. Зокрема, це є наслідком складних гірничо-геологічних умов родовища: варіабельність міцності 15–25 МПа, неоднорідна тріщинуватість, наявність магматичних інтрузій, що вимагають зонального підходу до проектування сітки буріння та вибору типу вибухових речовин.

На основі виконаного аналізу парку і умов експлуатації шарошкових бурових верстатів було досліджено потенціал адаптації діаметру бурових долот до змінних геологічних умов. Досліджено зміну продуктивності бурових верстатів, сітки свердловин і, як наслідок, сумарної довжини свердловин в кар'єрі, при різних діаметрах бурового долота за умови рівномірного насичення масиву енергією вибуху.

В умовах кар'єру Інгулецького ГЗК для міцності порід $f=18$ за шкалою проф. Протодьяконова встановлено оптимальний діаметр бурового долота, що дорівнює 273 мм.

Це може свідчити, що такий діаметр долота забезпечує оптимальне використання параметрів шарошкових бурових верстатів, як наслідок призводить до оптимізації параметрів буро-підричних робіт і тому рекомендується для подальшого впровадження. Досвід буропідричних робіт в кар'єрі свідчить, що подальше надмірне збільшення діаметру призводитиме до погіршення гранулометричного складу підірваних порід. Дане питання потребує подальшого експериментального дослідження, зокрема, для різних фізико-механічних властивостей порід з подальшим картуванням робочої зони за оптимальними діаметрами бурових долот.

Результати досліджень можуть бути корисними для проектних установ і технічних відділів, зокрема, глибоких залізородних кар'єрів групи Метінвест.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Руйнування гірських порід енергією вибуху // Під ред. Е.І. Єфремова. – К.: Наук. думка, 1987. – 264 с.
2. Вовк О.О., Лучко І.А. Управління вибуховим імпульсом у породних масивах. – Київ: Наук. думка, 1985. – 216 с.
3. Собко Б.Ю. Технологія відкритої розробки родовищ корисних копалин. Розкриття родовищ / Б.Ю. Собко, Г.Д. Пчолкін, Г.Я. Корсунський, О.В. Ложніков // Дніпро: Літограф. – 2017. – 205 с.
4. Швець Є.М. Оптимізація вибухового подрібнення скельних порід на залізрудних кар'єрах: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 05.15.03 „Відкрита розробка родовищ корисних копалин” / Є. М. Швець. – Кривий Ріг, 2013. – 23 с.
5. Kumao Hino. Effect of discontinuity of rock on fragmentation. Journal of the industrial explosives society, Japan. Vol. 18, № 4, 1957. P. - 229. Paterson M., Experimental Rock Deformation. - Spring, New York, 1978. – P. 255.
6. Maerz, N. H., Palangio, T. C., and Franklin, J. A., WipFrag image based granulometry system. Proceedings of the FRAGBLAST5 Workshop on Measurement of Blast Fragmentation, Montreal, Quebec, Canada, 1996. - P. 91-99.
7. Пугач М. М. Звіт з переддипломної практики: звіт / Пугач М. М.; ТОВ «Технічний університет “Метінвест Політехніка”», Каф. гірничої справи. – Запоріжжя, 2025. – 19 с.
8. Leng Zhendong, Fan Yong, Gao Qidong, Hu Yingguo. Evaluation and optimization of blasting approaches to reducing oversize boulders and toes in open-pit mine // International Journal of Mining Science and Technology. – 2020. – Vol. 30, № 3. – P. 373–380. – DOI: 10.1016/j.ijmst.2020.03.010.

9. Leng, Z., Fan, Y., Gao, Q., & Hu, Y. (2020a). Evaluation and optimization of blasting approaches to reducing oversize boulders and toes in open-pit mine. *International Journal of Mining Science and Technology*, 30(3), 373–380. <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2020.03.010>
10. Демидюк Г.П. Управление действием взрыва при горных работах. Сб. научные основы технологии открытых горных работ. Київ: Наука. 1969, - с. 48 – 63.
11. Перегудов В.В. Підвищення ефективності підрильних робіт в складних гірничо-геологічних умовах залізорудних родовищ: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 05.15.03 „Відкрита розробка родовищ корисних копалин” / В. В. Перегудов. – Кривий Ріг, 2012. – 20 с.
12. Темний, В.П. О влиянии диаметра заряда на эффективность открытых горных работ / В.П. Темний, А.В. Шапурин // Разработка рудных месторождений. – 2010. – Вып. 93 – С.77-81.
13. Ефективність застосування бурових верстатів на кар'єрах України // Гірничий вісник. 2020. № 3. С. 45–50. URL: <https://mining.kpi.ua/article/view/55457/51639>
14. Отработка Ингулецкого месторождения карьером ЧАО «ИНГОК» в границах лицензионной площади. Открытые горные работы: проект / ГП «ГПИ «Кривбасспроект»; ГИП Ковалёв К.В. – Кривой Рог, 2016. – 209 с
15. Будівництво об'єктів обслуговування для відпрацювання Інгулецького родовища з розширенням кар'єра ПрАТ «ІНГЗК» в межах ліцензійної площі за адресою: Дніпропетровська область, м. Кривий Ріг, вул. Рудна, 47, проммайданчик ПрАТ «ІНГЗК». Т. 1. Пояснювальна записка. Кривий Ріг. 2021. 228 с. URL: <https://e-construction.gov.ua/files/upload/d7ce8060-67e1-11ec-b4d6-29e8500c3f47.pdf>.

16. Типовий проект ведення буровибухових робіт на Інгuleцькому кар'єрі. м. Кривий Ріг, 2024р. 127с
17. Колисниченко В. Інгuleцький ГЗК купив буровий верстат за 35 млн грн – Новини – GMK Center. GMK. URL: <https://gmk.center/ua/news/inguleckij-gzk-kupiv-burovij-verstat-za-35-mln-grn/>
18. Шапурін О.В., Кирик П.Я. Руйнування гірничих порід вибухом: Навч. Посібник. К. ІСДО, 1995. 280 с.
19. СОУ-Н МПП 73.020-078-1:2007 Норми технологічного проектування гірничодобувних підприємств із відкритим способом розробки родовищ корисних копалин. Частина 1. Гірничі роботи. Ліквідація гірничодобувних підприємств. Техніко-економічна оцінка та показники (рос). БУДСТАНДАРТ Online - нормативні документи будівельної галузі України. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=66948 (дата звернення: 18.04.2025).
20. НПАОП 0.00-1.24-10 Правила охорони праці під час розробки родовищ корисних копалин відкритим способом. БУДСТАНДАРТ Online - нормативні документи будівельної галузі України. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=27404 (дата звернення: 18.04.2025).
21. Блізнюков В.Г. Гірнича 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.
22. Ozdemir B, Kumral M. A system-wide approach to minimize the operational cost of bench production in open-cast mining operations. Int J Coal Sci Technol 2019;6(1): 84–94.