

**СХІДНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ ВОЛОДИМИРА ДАЛЯ**

Факультет інженерії

Кафедра хімічної інженерії та екології

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

до випускної кваліфікаційної роботи
освітньо-кваліфікаційного рівня **магістр**

спеціальності 184 «Гірництво»

на тему:

**Вибір та обґрунтування технологій руйнування породи в
глибоких шахтах**

Виконав студент групи ГІР-25дМ

.....
(підпис)

Шустов О.В.

Керівник

.....
(підпис)

Захарова О.І.

Завідувач кафедри

.....
(підпис)

Зубцов Є.І.

Рецензент

.....
(підпис)

Київ, 2025

**СХІДНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ ВОЛОДИМИРА ДАЛЯ**

Факультет інженерії

Кафедра хімічної інженерії та екології

Освітньо-кваліфікаційний рівень: магістр

Спеціальність: 184 «Гірництво»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

 доц. Зубцов Є.І.

«___» _____ 2025 р.

**З А В Д А Н Н Я
НА ВИПУСКНУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ
ЗДОБУВАЧА ВИЩОЇ ОСВІТИ**

Шустов Олександр Володимирович

1. Тема роботи: Вибір та обґрунтування технологій руйнування породи в глибоких шахтах
2. Керівник роботи: Захарова О.І., к.х.н. доцент кафедри,
затверджено наказом закладу вищої освіти від 13.10.2025 р. № 208/20.04
2. Строк подання студентом роботи: 15.12.25р.
3. Вихідні дані до роботи: матеріали переддипломної практики та гірничотехнічна література.
4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити): згідно програми дипломного проектування та методичних вказівок по складанню дипломної роботи студентами напряму підготовки 184 «Гірництво».
5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень):
 1. Геологічний розтин родовища.
 2. Схема розкриття, підготовки та система розробки.
 3. Паспорт виймання вугілля, кріплення та управління покрівлею у лаві.
 4. Паспорт проведення та кріплення підготовчої виробки.
 5. Основна частина проекту.
 6. Економічна частина проекту.

6. Консультанти розділів:

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання 13.10.25

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проекту	Строк виконання етапів проекту	Примітка
1	Геологія родовища	13.10.25-14.10.25	
2	Розробка основних напрямків проекту	15.10.25-16.10.25	
3	Основна частина проекту	17.10.25-20.10.25	
4	Економічна частина проекту	21.10.25-22.10.25	

Студент



Шустов О.В.

Керівник проекту



Захарова О.І.

ЗМІСТ

ВСТУП	7
РОЗДІЛ 1 ГІРНИЧО-ГЕОЛОГІЧНІ ТА ГЕОМЕХАНІЧНІ УМОВИ РУЙНУВАННЯ ПОРІД У ГЛИБОКИХ ШАХТАХ.....	8
РОЗДІЛ 2 АНАЛІЗ ТРАДИЦІЙНИХ ТА АЛЬТЕРНАТИВНИХ ТЕХНОЛОГІЙ РУЙНУВАННЯ ГІРСЬКИХ ПОРІД.....	15
РОЗДІЛ 3 ГІДРАВЛІЧНІ МЕХАНІЧНІ СПЛІТЕРИ У СИСТЕМІ БЕЗВИБУХОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ РУЙНУВАННЯ ПОРІД.....	20
РОЗДІЛ 4 ОБҐРУНТУВАННЯ ВИБОРУ ТЕХНОЛОГІЙ РУЙНУВАННЯ ПОРІД У ГЛИБОКИХ ШАХТАХ	36
РОЗДІЛ 5 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА РОБІТ ПРИ РУЙНУВАННІ ГІРСЬКИХ ПОРІД У ГЛИБОКИХ ШАХТАХ.....	47
ВИСНОВКИ.....	59
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....	63

РЕФЕРАТ

Випускна кваліфікаційна робота: 66 стор., 9 рис., 12 табл., 50 джерел літератури.

Об'єкт дослідження: процеси та технології руйнування гірських порід у глибоких підземних шахтах.

Випускна кваліфікаційна робота присвячена вибору та теоретичному обґрунтуванню технологій руйнування гірських порід в умовах глибокого підземного видобутку. Актуальність дослідження визначається ускладненням гірничо-геологічних і геомеханічних умов на великих глибинах, де застосування традиційних буровибухових робіт супроводжується підвищеним динамічним впливом на гірський масив, порушенням стійкості приконтурних порід, газовою небезпекою та зростанням ризиків для безпеки персоналу. Додатковим фактором є обмежені можливості використання сучасних засобів механізації та автоматизації у вибухонебезпечних умовах.

Метою роботи є аналіз і теоретична оцінка можливості застосування гідравлічного механічного сплітера як безвибухового засобу руйнування твердих гірських порід у глибоких шахтах. У роботі розглянуто основні недоліки буровибухового способу руйнування порід у напруженому гірському масиві, а також виконано огляд альтернативних невибухових технологій, що передбачають буріння шпурів з подальшим статичним механічним, гідравлічним, хімічним або термічним впливом на породу.

У процесі виконання роботи проаналізовано вплив напруженого стану гірського масиву на ефективність різних технологій руйнування, визначено технологічні обмеження та ризики безвибухових методів, а також розглянуто питання охорони праці та промислової безпеки при їх застосуванні. Особливу увагу приділено можливості комбінованого використання буровибухових і безвибухових технологій залежно від конкретних умов ведення гірничих робіт.

За результатами дослідження зроблено висновок, що гідравлічний механічний сплітер може бути ефективно застосований у глибоких шахтах як альтернативний безвибуховий засіб руйнування порід, зокрема в обмежених просторах, підготовчих виробках, нішах та зонах підвищених вимог до безпеки. Отримані результати можуть бути використані при подальшому вдосконаленні технологій руйнування гірських порід і підвищенні рівня безпеки гірничих робіт.

Ключові слова:

ГЛИБОКІ ШАХТИ, РУЙНУВАННЯ ГІРСЬКИХ ПОРІД, НЕВИБУХОВІ ТЕХНОЛОГІЇ, БУРОВИБУХОВІ РОБОТИ, ГІДРАВЛІЧНИЙ МЕХАНІЧНИЙ СПЛІТЕР, ГІРСЬКИЙ МАСИВ, НАПРУЖЕНИЙ СТАН ПОРІД, РОЗКОЛЮВАННЯ ПОРІД, АЛЬТЕРНАТИВНІ МЕТОДИ РУЙНУВАННЯ, БЕЗПЕКА ГІРНИЧИХ РОБІТ.

ВСТУП

Руйнування гірських порід залишається ключовою технологічною операцією під час ведення підземних гірничих робіт. Саме від способу руйнування значною мірою залежать безпека персоналу, стійкість виробок, продуктивність очисних і підготовчих робіт, а також економічні показники підприємства. Зі збільшенням глибини розробки умови ведення робіт суттєво ускладнюються через зростання гірського тиску, концентрацію напружень у масиві, підвищену небезпеку раптових обвалів і сейсмічних проявів.

У таких умовах традиційні буровибухові технології не завжди забезпечують необхідний рівень керованості процесу руйнування та стабільності гірничих виробок. Практика експлуатації глибоких шахт показує, що вибухове руйнування порід супроводжується цілою низкою небажаних факторів. До них належать порушення цілісності приконтурного масиву, утворення зон розуцільнення, динамічний вплив на кріплення, а також обмеження, пов'язані з організацією вибухових робіт у часі.

У глибоких горизонтах ці фактори проявляються значно сильніше, ніж у приповерхневих умовах, що змушує шукати альтернативні або комбіновані технологічні рішення[2]. Упродовж останніх десятиліть у гірничій науці та практиці зростає інтерес до безвибухових способів руйнування гірських порід. До таких способів належать механічні, гідравлічні, термічні та хімічні методи, які дозволяють впливати на масив без різких динамічних навантажень. Особливу увагу привертають технології, що базуються на використанні попередньо пробурених шпурів і подальшому створенні розтягувальних напружень у породі.

Саме ці методи потенційно дають змогу зменшити пошкодження приконтурної зони, підвищити керованість процесу руйнування та знизити рівень небезпеки для персоналу. Вибір конкретної технології руйнування породи в умовах глибоких шахт не може бути універсальним і потребує

детального обґрунтування. На нього впливають гірничо-геологічні умови, фізико-механічні властивості порід, глибина залягання, геометрія виробок, вимоги до стійкості масиву, а також техніко-економічні й безпекові обмеження. Тому актуальним є системний аналіз наявних технологій руйнування порід із подальшим визначенням сфер їх доцільного застосування саме для глибоких шахт. Ця магістерська робота має теоретико-аналітичний характер і спрямована на узагальнення та осмислення сучасних підходів до руйнування гірських порід у складних глибоких умовах. Дослідження ґрунтується на аналізі наукових публікацій, технічних звітів, дисертаційних і магістерських робіт, а також результатів експериментальних досліджень, виконаних іншими авторами. Особливу увагу приділено англомовним джерелам, у яких розглянуто практичний досвід застосування безвибухових технологій у глибоких підземних умовах.

Метою магістерської роботи є обґрунтування вибору технологій руйнування гірських порід у глибоких шахтах на основі аналізу їх технологічних можливостей, геомеханічних обмежень та безпекових переваг. Для досягнення поставленої мети в роботі передбачено розв'язання таких завдань: дослідити особливості напружено-деформованого стану гірського масиву на великих глибинах; проаналізувати основні традиційні та альтернативні технології руйнування порід; систематизувати переваги й недоліки різних методів з урахуванням умов глибоких шахт; виконати порівняльне обґрунтування доцільності застосування безвибухових технологій, зокрема гідравлічних механічних сплітерів, у конкретних гірничо-геологічних умовах. Об'єктом дослідження є процес руйнування гірських порід у підземних гірничих виробках на великих глибинах. Предметом дослідження є технології руйнування порід та умови їх застосування з урахуванням геомеханічних і технологічних факторів. Наукова новизна роботи полягає в узагальненні та систематизації сучасних безвибухових технологій руйнування гірських порід з позицій їх придатності для використання в глибоких шахтах, а також у формуванні обґрунтованих

рекомендацій щодо вибору технологічних рішень залежно від умов залягання та властивостей масиву. Практичне значення роботи полягає в можливості використання отриманих висновків і таблиць порівняльного аналізу під час проектування та модернізації підземних гірничих робіт у складних умовах.

РОЗДІЛ 1 ГІРНИЧО-ГЕОЛОГІЧНІ ТА ГЕОМЕХАНІЧНІ УМОВИ РУЙНУВАННЯ ПОРІД У ГЛИБОКИХ ШАХТАХ

1.1 Особливості розробки родовищ на великих глибинах

Під глибокими шахтами у сучасній гірничій практиці зазвичай розуміють підземні підприємства, в яких основні гірничі роботи ведуться на глибинах понад 800–1000 м від поверхні. На таких горизонтах гірничо-геологічні умови істотно відрізняються від умов неглибоких розробок і формують специфічні вимоги до технологій руйнування гірських порід. Насамперед це пов'язано зі значним зростанням гірського тиску, підвищеною концентрацією напружень у масиві та ускладненням контролю за стійкістю виробок. Зі збільшенням глибини зростає вертикальне напруження, яке визначається вагою перекриваючих порід. Для багатьох гірничих районів на глибинах понад 1500 м вертикальні напруження можуть досягати значень 35–45 МПа і більше[5].

Таблиця 1.1 – Характерні глибини підземних розробок і основні ускладнюючі фактори

Глибина розробки, м	Основні геомеханічні проблеми
800–1000	Початок інтенсивного прояву гірського тиску
1000–1500	Концентрація напружень, зростання деформацій
понад 1500	Підвищений ризик динамічних проявів, складність підтримання стійкості

Одночасно з цим зростає роль горизонтальних тектонічних напружень, які у ряді випадків перевищують вертикальні. Така напружена обстановка призводить до формування зон підвищеної концентрації напружень навколо виробок, що істотно впливає на поведінку масиву під час його руйнування.

Глибокі шахти характеризуються також високою чутливістю масиву до динамічних навантажень. Навіть відносно невеликі вибухові імпульси можуть спричиняти розвиток тріщин у приконтурній зоні, локальні обвали або порушення роботи кріплення. У цих умовах технологія руйнування порід перестає бути лише операцією відокремлення породи від масиву і перетворюється на фактор, який безпосередньо впливає на загальну безпеку та стабільність гірничих робіт[4].

Окремою проблемою глибоких шахт є обмежені можливості провітрювання та підвищені температури порід. Це накладає додаткові обмеження на застосування вибухових матеріалів, утворення вибухових газів і пилу. У сукупності перелічені фактори зумовлюють необхідність критичного перегляду традиційних підходів до руйнування порід і пошуку технологій, які дозволяють більш керовано впливати на гірський масив.

1.2 Напружено-деформований стан гірського масиву

Напружено-деформований стан гірського масиву є одним із визначальних чинників, що впливають на ефективність і безпечність процесу руйнування порід. У природному стані масив перебуває під дією системи напружень, які сформувалися внаслідок гравітаційних і тектонічних процесів. Проведення підземної виробки порушує цю рівновагу, викликаючи перерозподіл напружень у прилеглий зоні. Після утворення виробки частина напружень вивільняється, а інша концентрується у приконтурному масиві. Найбільші значення напружень зазвичай виникають у зонах біля кутів виробки та в місцях різкої зміни геометрії[1]. Саме в цих зонах масив найбільш чутливий до додаткових впливів, зокрема до динамічних навантажень, що виникають під час вибухового руйнування. Особливу роль у формуванні напружено-деформованого стану відіграє тріщинуватість порід. Наявність природних тріщин, шаруватість і анізотропія властивостей призводять до нерівномірного розподілу напружень і створюють локальні ослаблені зони. Під час руйнування

породи ці зони можуть ставати шляхами розвитку тріщин, що не завжди відповідає проектному контуру виробки. У глибоких шахтах напружено-деформований стан масиву часто перебуває на межі стійкості. Будь-який різкий імпульс, зокрема вибух, може спричинити лавиноподібний розвиток деформацій. Це є однією з причин, чому статичні або квазистатичні методи руйнування порід розглядаються як потенційно більш керовані в умовах великих глибин[3].

1.3 Фізико-механічні властивості гірських порід

Вибір технології руйнування порід безпосередньо залежить від їх фізико-механічних властивостей. Найважливішими з них є міцність на стиск, міцність на розтяг, модуль пружності, крихкість і характер тріщинуватості. Для порід, що залягають на великих глибинах, ці показники часто мають підвищені значення порівняно з приповерхневими умовами. Міцність на стиск для твердих магматичних і метаморфічних порід може досягати 150–300 МПа. Водночас міцність на розтяг зазвичай у 8–12 разів менша. Саме ця відмінність між опором стиску і розтягу широко використовується в технологіях безвибухового руйнування, де основний акцент робиться на створення розтягувальних напружень у масиві[6].

Таблиця 1.3 – Типові фізико-механічні властивості порід, характерних для глибоких шахт

Тип породи	Міцність на стиск, МПа	Міцність на розтяг, МПа	Модуль пружності, ГПа
Кварцит	200–300	15–25	60–80
Граніт	150–250	10–20	50–70
Базальт	180–300	15–30	70–90

Модуль пружності визначає здатність породи деформуватися під навантаженням. Породи з високим модулем пружності накопичують значні

пружні деформації, що в умовах глибоких шахт може призводити до раптових розвантажень і локальних руйнувань. Крихкі породи зазвичай руйнуються без значних пластичних деформацій, що також впливає на вибір способу впливу. Для теоретичного обґрунтування вибору технології важливим є не лише абсолютне значення міцності, а й поєднання властивостей[8].

Породи з високою міцністю на стиск, але відносно низькою міцністю на розтяг, є більш придатними для методів, що створюють контрольовані розтягувальні напруження.

1.4 Вплив способу руйнування на стійкість приконтурного масиву Спосіб руйнування порід визначає характер навантажень, які передаються на приконтурний масив, і, відповідно, впливає на його стійкість. Вибухове руйнування супроводжується короткочасними імпульсними навантаженнями великої інтенсивності. Такі навантаження здатні викликати розвиток мікротріщин за межами проектного контуру, формуючи зону порушених порід. У глибоких шахтах зона пошкодження приконтурного масиву має особливе значення. Навіть незначне її збільшення може призводити до втрати несучої здатності порід, підвищення навантаження на кріплення і необхідності додаткових заходів підтримання. Це негативно впливає як на безпеку, так і на економічні показники[11].

Безвибухові технології, що реалізують статичний або повільно змінний вплив, формують інший характер руйнування. Напруження зростають поступово, а тріщини розвиваються більш керовано, часто у напрямках, зумовлених схемою буріння. У результаті приконтурний масив зазнає значно меншого пошкодження, а контур виробки зберігає більшу стійкість. Саме тому при виборі технології руйнування в умовах великих глибин необхідно оцінювати не лише продуктивність процесу, а й його вплив на довготривалу стійкість виробок. Це положення є базовим для подальшого аналізу альтернативних технологій, який буде розглянуто в наступних розділах.

Таблиця 1.4 – Характер впливу різних способів руйнування на приконтурний масив

Спосіб руйнування	Характер навантаження	Пошкодження приконтурної зони
Буровибуховий	Імпульсний, динамічний	Значне
Механічний	Квазистатичний	Помірне
Гідравлічний сплітинг	Статичний	Мінімальне

РОЗДІЛ 2 АНАЛІЗ ТРАДИЦІЙНИХ І АЛЬТЕРНАТИВНИХ ТЕХНОЛОГІЙ РУЙНУВАННЯ ГІРСЬКИХ ПОРІД

2.1 Буровибухові технології руйнування порід

Буровибуховий спосіб залишається найбільш поширеним методом руйнування гірських порід у підземних умовах. Його застосування ґрунтується на використанні енергії вибуху, яка створює високі напруження стиску і розтягу в масиві, що призводить до дроблення і відокремлення породи від суцільного масиву. У практиці підземних робіт цей спосіб забезпечує високу продуктивність і відносну технологічну простоту. Основними параметрами буровибухового руйнування є діаметр шпурів, їх глибина, схема розташування, тип вибухової речовини та величина заряду. Для підготовчих виробок у твердих породах зазвичай застосовують шпури діаметром 38–45 мм і глибиною 2,5–4,5 м. У вибоях очисних вибоїв діаметри можуть збільшуватися до 48–51 мм. Питома витрата вибухових речовин у глибоких шахтах, залежно від міцності порід, коливається в межах 1,5–3,5 кг на 1 м³ зруйнованої породи. На великих глибинах ефективність буровибухових робіт знижується через підвищений гірський тиск. Породи перебувають у попередньо напруженому стані, що змінює характер розповсюдження хвиль вибуху і сприяє утворенню зон неконтрольованого тріщиноутворення. Дослідження, виконані в шахтах Південної Африки та Канади, показують, що в глибоких умовах зона порушення приконтурного масиву може сягати 0,5–1,2 м від проектного контуру, що істотно перевищує аналогічні показники на менших глибинах. Крім геомеханічних факторів, суттєвими обмеженнями буровибухових робіт є організаційні та безпекові аспекти. Проведення вибухів потребує зупинки робіт, евакуації персоналу, контролю газового режиму та провітрювання виробок. У глибоких шахтах тривалість простоїв після вибуху може досягати 40–90 хвилин, що негативно впливає на загальну продуктивність[13].

Таблиця 2.1 – Основні параметри буровибухового руйнування в підземних умовах

Параметр	Типові значення
Діаметр шпурів, мм	38–51
Глибина шпурів, м	2,5–4,5
Питома витрата вибухових речовин, кг/м ³	1,5–3,5
Зона порушення приконтурного масиву, м	0,5–1,2

2.2 Механічні способи руйнування гірських порід Механічне руйнування ґрунтується на безпосередньому контакті робочого органу з гірською породою та її руйнуванні шляхом різання, сколювання або стирання. До таких методів належать прохідницькі комбайни, дорожні фрези та різні типи різцевих установок[17]. Механічні способи широко застосовуються в породах з міцністю на стиск до 80–120 МПа. Ефективність механічного руйнування суттєво залежить від крихкості породи та її тріщинуватості. У твердих магматичних і метаморфічних породах із міцністю понад 150 МПа зношування різців різко зростає, а продуктивність знижується. Практичні дані показують, що при міцності порід 180–200 МПа питомі енерговитрати механічного руйнування можуть перевищувати 15–20 кВт·год на 1 м³, що робить такий спосіб економічно недоцільним[19]. У глибоких шахтах механічні методи мають перевагу з точки зору відсутності динамічних навантажень. Проте значні зусилля різання можуть спричиняти додаткове навантаження на приконтурний масив, особливо у вузьких виробках. Крім того, обмежена маневреність обладнання ускладнює його застосування в умовах складної геометрії виробок.

2.3 2.3 Хімічні розширювальні суміші Хімічні розширювальні суміші використовуються для руйнування порід шляхом створення внутрішнього тиску в попередньо пробурених шпурах. Найпоширенішими є суміші на основі оксиду кальцію, які в процесі гідратації розширюються і створюють тиск до 30–50 МПа. Такий рівень тиску достатній для ініціювання тріщин у породах з міцністю на розтяг 5–25 МПа. Діаметри шпурів для застосування хімічних сумішей зазвичай становлять 30–42 мм, а глибина може досягати 3–5 м. Процес руйнування є повільним і триває від 6 до 48 годин залежно від температури порід і складу суміші. За температур нижче 5 °С швидкість реакції істотно зменшується, що обмежує застосування цього методу в холодних виробках[21]. Перевагою хімічних методів є відсутність ударних навантажень і газовиділення.

Таблиця 2.2 – Характеристики хімічних розширювальних сумішей

Показник	Типові значення
Тиск розширення, МПа	30–50
Діаметр шпурів, мм	30–42
Час розвитку руйнування, год	6–48
Чутливість до температури	Висока

Водночас основними недоліками залишаються тривалість процесу та складність контролю розвитку тріщин. У глибоких шахтах, де важлива оперативність проведення робіт, ці фактори істотно обмежують сферу застосування хімічних сумішей[23].

2.4 Термічні методи руйнування порід Термічні методи базуються на різкому нагріванні поверхні породи з подальшим охолодженням, що спричиняє виникнення термічних напружень і розвиток тріщин. Такі методи застосовувалися переважно в гранітах і кварцитах з високою крихкістю. Температура нагріву поверхні може перевищувати 800–1000 °С, що призводить

до локального руйнування структури породи[28]. У підземних умовах термічні методи мають суттєві обмеження через складність забезпечення безпечних умов роботи, значне енергоспоживання і проблеми з вентиляцією. Практичні випробування показують, що питомі енерговитрати можуть перевищувати 25–30 кВт·год на 1 м³, що робить цей метод економічно не вигідним для масового застосування[25].

2.5 Гідравлічні методи руйнування Гідравлічні методи руйнування порід ґрунтуються на використанні рідини під високим тиском для створення напружень у масиві. Найбільш відомим є гідравлічне розкриття тріщин, де тиск рідини може досягати 20–40 МПа. У гірничій практиці цей метод застосовується переважно для ослаблення масиву перед подальшим механічним або вибуховим руйнуванням. Ефективність гідравлічних методів значною мірою залежить від проникності порід і наявності природних тріщин. У щільних і малотріщинуватих породах контроль поширення тріщин є складним, що обмежує точність формування контуру виробки.

2.6 Порівняльний аналіз технологій руйнування порід Порівняльний аналіз показує, що жодна з технологій не є універсальною для умов глибоких шахт. Буровибуховий спосіб забезпечує високу продуктивність, але супроводжується значним пошкодженням приконтурного масиву. Механічні методи обмежені міцністю порід і енерговитратами[34].

Таблиця 2.3 – Порівняльна характеристика технологій руйнування порід у глибоких шахтах

Технологія	Тип навантаження	Придатна міцність порід, МПа	Пошкодження приконтурної зони	Продуктивність	Сфера доцільного застосування
Буровибухова	Динамічне	до 300	Високе	Висока	Масові гірничі роботи
Механічна	Квазистатичне	до 120	Середнє	Середня	М'які та середні породи
Хімічна	Статичне	до 200	Низьке	Низька	Локальні роботи
Гідравлічна	Статичне	до 300	Мінімальне	Середня	Глибокі шахти, контрольований контур

Хімічні та термічні методи мають вузьку сферу застосування через тривалість процесу та економічні чинники. Гідравлічні методи, зокрема використання механічних сплітерів, поєднують у собі здатність створювати значні розтягувальні напруження без динамічного впливу. Це робить їх перспективними для застосування в глибоких шахтах, особливо в умовах підвищених вимог до стійкості приконтурного масиву[32]. Детальний аналіз цих технологій і результатів їх випробувань буде наведено в наступному розділі.

РОЗДІЛ 3 ГІДРАВЛІЧНІ МЕХАНІЧНІ СПЛІТЕРИ У СИСТЕМІ БЕЗВИБУХОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ РУЙНУВАННЯ ПОРІД

3.1 Принцип дії гідравлічних механічних сплітерів та фізичні основи руйнування порід Гідравлічні механічні сплітери належать до класу безвибухових технологій руйнування гірських порід, у яких основний вплив на масив здійснюється шляхом створення контрольованих розтягувальних напружень у попередньо пробурених шпурах. На відміну від буровибухового способу, де руйнування ініціюється імпульсним навантаженням високої інтенсивності, сплітери забезпечують поступове наростання зусилля, що дозволяє більш керовано формувати тріщини у породі[12].



Рисунок 3.1 Зовнішній вигляд гідравлічного механічного сплітера

Конструктивно гідравлічний механічний сплітер складається

з клинового механізму, який приводиться в дію за допомогою гідравлічного тиску. Типова схема включає центральний клин та два або більше бічних елементів, які під час висування передають зусилля на стінки шпура. При подачі робочої рідини під тиском центральний клин переміщується вздовж осі сплітера, розсовуючи бічні елементи і створюючи радіальне навантаження на породу[11]. Робочий тиск у гідравлічних системах сплітерів, залежно від моделі, зазвичай становить від 30 до 50 МПа. При цьому створюване зусилля на стінках шпура може досягати 400–1000 кН. Такі значення зусилля є

достатніми для перевищення міцності гірських порід на розтяг, яка для більшості твердих порід знаходиться в межах 10–30 МПа. Саме використання різниці між міцністю породи на стиск і на розтяг є фізичною основою ефективності цього методу. Процес руйнування при застосуванні сплітера має квазистатичний характер. Напруження в породі зростають поступово, що дає змогу тріщинам розвиватися вздовж напрямків найменшого опору[31]. У результаті тріщини часто орієнтуються між сусідніми шпурами або до вільної поверхні, якщо така попередньо створена. Це дозволяє контролювати напрямок відокремлення породи і зменшувати випадкове розтріскування приконтурного масиву.



Рис. 3.1 Схема руйнування породи клиновим механізмом гідравлічного сплітера

Важливою особливістю гідравлічних механічних сплітерів є відсутність динамічного впливу на масив. У глибоких шахтах, де масив перебуває у стані високих попередніх напружень, це має принципове значення. Дослідження, виконані в умовах глибоких золотих шахт Південної Африки, показали, що застосування сплітерів не супроводжується помітним зростанням сейсмічної активності, на відміну від буровибухових робіт, які можуть ініціювати локальні динамічні прояви[39]. З точки зору енергетики процесу, руйнування породи

сплітером відбувається з відносно низькими питомими енерговитратами. Енергія витрачається переважно на створення гідравлічного тиску і переміщення клинового механізму. За даними технічних звітів і підземних випробувань, питомі енерговитрати при використанні гідравлічних сплітерів у твердих породах можуть становити 2–6 кВт·год на 1 м³ зруйнованої породи, що істотно нижче, ніж для механічних або термічних методів[38].

Окремої уваги заслуговує питання масштабу руйнування. Гідравлічні механічні сплітери не призначені для масового дроблення великих об'ємів породи за один цикл. Їх застосування є доцільним у випадках, коли важлива точність формування контуру, мінімальне пошкодження масиву або необхідність роботи в умовах обмежень на використання вибухових матеріалів. Саме ці умови є характерними для глибоких шахт з підвищеними вимогами до безпеки і стабільності виробок.

3.2 Технологічні вимоги до буріння шпурів при застосуванні гідравлічних механічних сплітерів

Ефективність руйнування гірських порід гідравлічними механічними сплітерами значною мірою визначається якістю буріння шпурів. На відміну від буровибухових робіт, де вибухова енергія частково компенсує неточності буріння, при використанні сплітерів геометрія шпура безпосередньо впливає на працездатність обладнання і характер розвитку тріщин у масиві. Тому вимоги до буріння в цьому випадку є більш жорсткими. Діаметр шпура повинен відповідати технічним характеристикам конкретної моделі сплітера.

Таблиця 3.1 – Технологічні вимоги до буріння шпурів для гідравлічних механічних сплітерів

Параметр буріння	Рекомендоване значення	Вплив на ефективність руйнування
Діаметр шпура, мм	45–48	Забезпечує повний контакт клинів зі стінками шпура
Мінімальна глибина шпура, мм	650–700	Дає змогу повністю розкрити центральний клин
Відхилення осі шпура	не більше 2–3°	Запобігає деформації та заклинюванню клинів
Прямолінійність шпура	без викривлень	Забезпечує рівномірний розподіл навантаження
Стан стінок шпура	очищені від шламу	Підвищує стабільність розвитку тріщин

Таблиця 3.2 – Наслідки порушення технологічних вимог до буріння шпурів

Порушення вимог	Технічні наслідки
Недостатня глибина шпура	Пошкодження або руйнування центрального клина
Відхилення шпура від осі	Нерівномірне навантаження, деформація клинів
Збільшений діаметр шпура	Зниження зусилля розкриття тріщин
Забруднення шпура	Нестабільне або неповне руйнування породи

Для гідравлічних сплітерів типу DARDA, які застосовувалися у підземних випробуваннях, рекомендований діаметр шпура становить 45–48 мм. Виконання шпурів меншого діаметра унеможливилює встановлення клинового механізму, а перевищення допустимого діаметра призводить до зниження ефективності передачі зусилля на стінки шпура. Практичні спостереження показують, що навіть перевищення діаметра на 2–3 мм може спричиняти втрату контакту між клинами і породою, що негативно впливає на ініціювання тріщин. Довжина шпура є не менш критичним параметром. Вона має забезпечувати повне розміщення сплітера у робочому положенні з урахуванням ходу центрального клина[32].

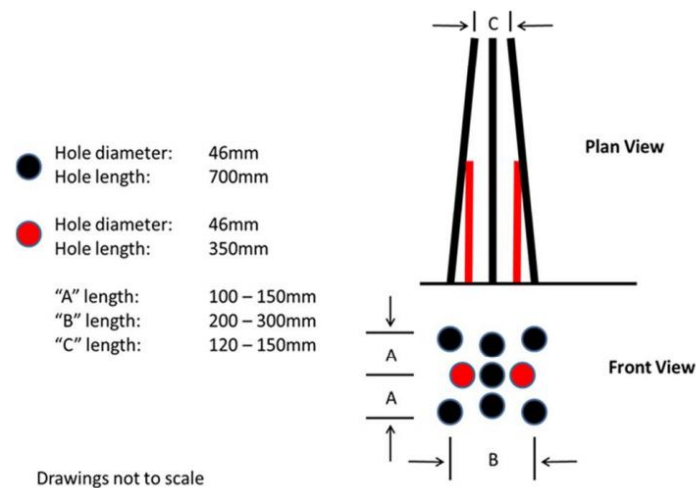


Рисунок 3.3 – Деформація клинового механізму гідравлічного сплітера внаслідок відхилення шпура від проектного напрямку

Для сплітерів середнього типорозміру мінімальна довжина шпура становить 650–700 мм. Недостатня глибина призводить до того, що клин не може повністю висунутися, що створює ризик його пошкодження або деформації. Наслідки такого дефекту наочно продемонстровані на рисунку 3.3, де показано деформовані клини після встановлення сплітера у шпур з відхиленням від проектної геометрії. Особливої уваги потребує прямолінійність буріння. Шпури повинні бути максимально прямими по всій довжині, без викривлень і різких змін напрямку. Навіть незначне відхилення

осі шпура призводить до нерівномірного розподілу навантаження між клинами. У результаті зусилля концентрується на окремих елементах механізму, що може спричиняти їх згин або заклинювання[39]. Саме така ситуація зафіксована під час підземних випробувань, результати яких відображені на рисунку 3.3, де видно пошкодження клинового механізму внаслідок відхилення шпура від заданого напрямку. Точність орієнтації шпурів у просторі також має істотне значення. У випадках, коли сплітер застосовується для формування вільної поверхні або створення «вирізу», шпури повинні бути орієнтовані відповідно до обраної схеми руйнування. Відхилення кутів буріння навіть на $2-3^{\circ}$ може змінювати напрямок розвитку тріщин і знижувати ефективність відокремлення породи. Це особливо актуально для периферійних шпурів, які можуть буритися під невеликим кутом до фронту вибою для збереження проектного контуру виробки. Якість буріння впливає не лише на ефективність руйнування, а й на тривалість технологічного циклу. За даними підземних випробувань, при точному бурінні час одного циклу встановлення і роботи сплітера становив у середньому 1,5–2 хвилини на шпур. У випадках, коли шпури мали відхилення або нерівності стінок, час циклу зростав до 3–4 хвилин через необхідність додаткових операцій, зокрема повторного змащення клинів або механічного вивільнення сплітера після руйнування породи. Крім геометричних параметрів, важливим є стан стінок шпура. Наявність шламу, уламків породи або нерівностей знижує коефіцієнт тертя між клинами і породою та погіршує передачу зусилля. Тому перед встановленням сплітера шпури повинні бути очищені стисненим повітрям або водою. Недотримання цієї вимоги може призводити до нестабільної роботи обладнання і неповного розкриття тріщин.

Таким чином, буріння шпурів при застосуванні гідравлічних механічних сплітерів слід розглядати як ключовий елемент технологічного процесу. В умовах глибоких шахт, де помилки буріння можуть мати серйозні наслідки для стійкості масиву і ресурсу обладнання, забезпечення високої точності буріння

є обов'язковою умовою ефективного використання безвибухових технологій руйнування порід.

3.3 Схеми розташування шпурів та формування вільної поверхні при гідравлічному руйнуванні порід Ефективність застосування гідравлічних механічних сплітерів значною мірою визначається не лише параметрами окремого шпура, а й схемою їх просторового розташування у вибою. На відміну від буровибухових робіт, де вибухова хвиля може компенсувати недоліки схеми буріння, при безвибуховому руйнуванні відсутність імпульсного навантаження вимагає створення сприятливих умов для розвитку тріщин. Ключовим фактором у цьому випадку є наявність вільної поверхні, у напрямку якої може відбуватися розкриття породи. Поняття вільної поверхні широко використовується у класичній теорії буровибухових робіт і означає поверхню, не обмежену масивом породи, у напрямку якої зменшується опір руйнуванню. При застосуванні гідравлічних сплітерів принцип створення вільної поверхні зберігається, проте реалізується іншими засобами. Найчастіше вона формується шляхом спеціального «вирізу», який складається з групи близько розташованих шпурів, у яких послідовно здійснюється руйнування породи. Під час підземних випробувань, результати яких наведені в англomовних джерелах, було розглянуто декілька типових схем розташування шпурів для формування вирізу[41].

Однією з найпростіших є п'ятишпурова схема у вигляді ромба з центральним шпуром. У цій схемі чотири периферійні шпури розташовуються по вершинах ромба, а п'ятий буриться у центрі. Саме центральний шпур використовується для первинного руйнування з метою створення початкової вільної поверхні[43].

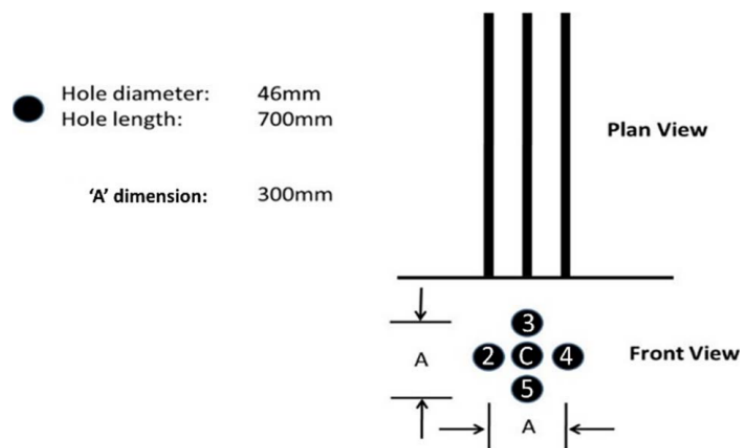


Рис. 3.4 П'ятишпурова схема типу «алмаз» для формування вільної поверхні

Така схема показана на рисунку 3.4. Практичні результати свідчать, що при глибині шпурів близько 700 мм і відстані між ними 300 мм забезпечується стабільне формування тріщин між центральним і периферійними шпурами. Більш розвиненим варіантом є семишпурова схема, у якій шпури розташовуються по вершинах правильного шестикутника з одним центральним шпуrom. У цьому випадку відстань між шпурами зазвичай становить 400–450 мм [46]. Центральний шпур використовується для початкового розкриття масиву, після чого послідовно активуються периферійні шпури. Така схема дозволяє створити більший за обсягом виріз і забезпечує кращі умови для подальшого руйнування породи. Приклад семишпурової схеми наведено на рисунку 3.5.

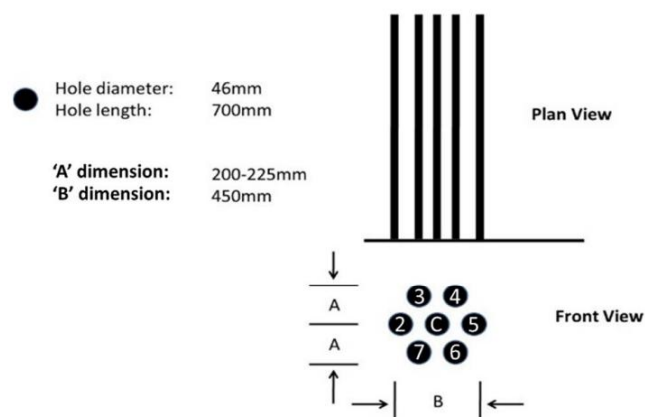


Рис. 3.5 – Семишпурова схема розташування шпурів з центральним шпуrom

Застосування цієї схеми показало підвищену стабільність процесу руйнування порівняно з п'ятишпуровою, особливо в породах з високою міцністю на стиск. Для більш складних умов, зокрема у міцних і малотріщинуватих породах, застосовуються схеми з більшою кількістю шпурів. Однією з таких є прямокутна схема з одинадцяти шпурів, у якій периферійні шпури розташовуються у вигляді замкненого контуру, а внутрішні шпури виконують роль допоміжних або розвантажувальних. У деяких варіантах внутрішні шпури буряться на меншу глибину і не використовуються безпосередньо для встановлення сплітера. Вони слугують для зменшення опору породи і спрямування розвитку тріщин. Така схема показана на рисунку 3.6.

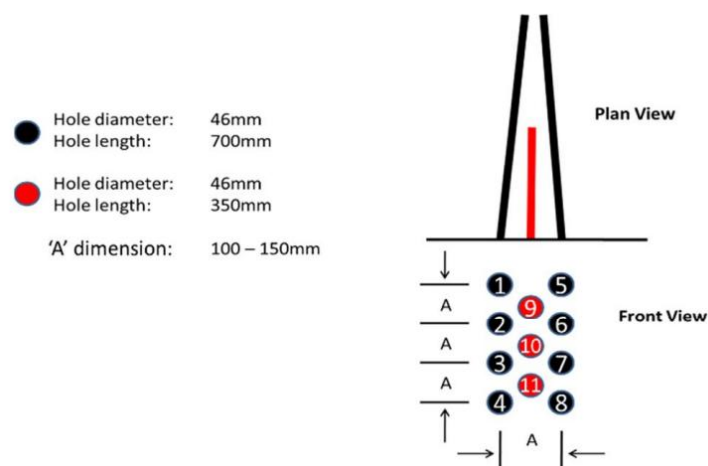


Рисунок 3.6 – Прямокутна схема розташування шпурів з використанням розвантажувальних отворів

Практичні спостереження свідчать, що використання розвантажувальних шпурів дозволяє знизити необхідне зусилля розкриття і зменшити ризик заклинювання клинового механізму. Окрему увагу в схемах розташування шпурів приділяють орієнтації периферійних шпурів. У деяких випадках вони буряться під невеликим кутом до фронту вибою, зазвичай у межах 3–6°. Така орієнтація дає змогу зберегти проектний контур виробки і водночас створити умови для розвитку тріщин у потрібному напрямку. Подібні рішення застосовуються переважно у приствольних і підготовчих виробках, де вимоги

до геометрії контуру є підвищеними. Вибір конкретної схеми розташування шпурів залежить від фізико-механічних властивостей порід, глибини залягання, геометрії виробки та доступного бурового обладнання. Для порід з міцністю на стиск до 150 МПа зазвичай достатні прості п'яти- або семишпурові схеми. У більш міцних породах доцільним є використання схем з більшою кількістю шпурів і наявністю розвантажувальних отворів. При цьому збільшення кількості шпурів неминуче призводить до зростання обсягу бурових робіт, що слід враховувати при техніко-економічному обґрунтуванні[43].

Таким чином, формування вільної поверхні є визначальним етапом у технології гідравлічного руйнування порід. Правильно обрана схема розташування шпурів забезпечує керований розвиток тріщин, зменшує навантаження на обладнання і підвищує загальну надійність процесу руйнування. Саме ці аспекти зумовлюють необхідність ретельного проектування схем буріння при впровадженні безвибухових технологій у глибоких шахтах.

3.4 Аналіз результатів підземних випробувань гідравлічних механічних сплітерів

Оцінка доцільності застосування гідравлічних механічних сплітерів у глибоких шахтах ґрунтується насамперед на результатах підземних випробувань, проведених у реальних гірничо-геологічних умовах. Такі випробування мають особливу цінність, оскільки дозволяють врахувати вплив напружено-деформованого стану масиву, обмеженого простору виробок і організаційних чинників, які неможливо повністю відтворити в лабораторних умовах. Одними з найбільш детально задокументованих є випробування, виконані у глибоких золотих шахтах Південної Африки[49]. Дослідження проводилися в межах спеціально підготовленої дослідної камери, розташованої на глибині понад 1000 м. Планування камери і розташування зон випробувань

наведено на рисунку 3.7, який доцільно використовувати для ілюстрації просторової організації робіт у підземних умовах.



Рис. 3.7 – Схема дослідної очисної камери для підземних випробувань гідравлічного механічного сплітера

Гірські породи в зоні випробувань були представлені кварцитами з одновісною міцністю на стиск близько 160 МПа. Такі породи належать до категорії твердих і традиційно вимагають застосування буровибухових технологій. Саме тому вибір цих умов для випробування безвибухових методів має принципове значення з точки зору перевірки їх реальної ефективності. У процесі випробувань використовувалися ручні гідравлічні механічні сплітери середнього типорозміру з робочим тиском гідравлічної системи до 50 МПа. Діаметр шпурів становив 45–48 мм, а глибина буріння знаходилася в межах 650–700 мм. Схеми розташування шпурів відповідали п'яти- та семишпуровим варіантам, описаним у попередньому підрозділі і проілюстрованим на рисунках 3.4 та 3.5. Результати випробувань показали, що при дотриманні технологічних вимог до буріння і послідовності встановлення сплітерів забезпечується стабільне формування тріщин між шпурами. У більшості випадків тріщини розвивалися у напрямку створеної вільної поверхні, що підтверджує

ефективність обраних схем буріння. Глибина проникнення тріщин у масив відповідала глибині шпурів, а характер відокремлення породи був близьким до площинного, без утворення значної зони дрібного дроблення. За результатами окремих циклів руйнування середній об'єм відокремленої породи становив близько 0,04–0,06 м³ на один цикл встановлення сплітера. При послідовному використанні сплітерів у групі шпурів сумарний об'єм зруйнованої породи за один технологічний етап досягав 0,25–0,30 м³. Ці значення є істотно нижчими порівняно з буровибуховими роботами, однак вони компенсуються високою точністю формування контуру і відсутністю пошкодження приконтурного масиву. Час одного повного циклу руйнування, включаючи встановлення сплітера, подачу тиску і вилучення обладнання, у середньому становив 2–3 хвилини на шпур. При цьому загальний час підготовки робочого місця був значно меншим, ніж при буровибухових роботах, оскільки не вимагав евакуації персоналу і тривалого провітрювання[42].

Таблиця 3.3 – Основні результати підземних випробувань гідравлічних механічних сплітерів

Показник	Значення
Глибина проведення випробувань, м	понад 1000
Тип гірської породи	кварцит
Міцність породи на стиск, МПа	близько 160
Діаметр шпурів, мм	45–48
Глибина шпурів, мм	650–700
Об'єм зруйнованої породи за цикл, м³	0,04–0,06
Час руйнування одного шпура, хв	2–3
Зона порушення приконтурного масиву, м	0,1–0,2

Зафіксовано, що навіть при послідовній роботі з декількома шпурами загальний технологічний цикл не перевищував 20–30 хвилин. Важливим результатом випробувань стала оцінка впливу гідравлічного руйнування на приконтурний масив. Візуальні спостереження і інструментальні вимірювання не виявили розвитку вторинних тріщин за межами проектного контуру. Зона порушення масиву, за оцінками дослідників, не перевищувала 0,1–0,2 м, що істотно менше, ніж при буровибуховому способі, де аналогічний показник у подібних умовах може досягати 0,8–1,0 м. Під час випробувань також були зафіксовані обмеження технології. У зонах з підвищеною природною тріщинуватістю розвиток тріщин мав менш передбачуваний характер, що іноді призводило до відокремлення породи у небажаному напрямку. Крім того, при порушенні геометрії шпурів або недостатній їх очистці спостерігалися випадки часткового заклинювання клинового механізму, аналогічні тим, що показані на рисунку 3.3.

Таблиця 3.4 – Порівняльна характеристика гідравлічного та буровибухового способів руйнування порід у глибоких шахтах

Показник	Гідравлічний механічний сплітер	Буровибуховий спосіб
Тип навантаження на масив	Статичний	Динамічний
Зона пошкодження приконтурного масиву, м	0,1–0,2	0,8–1,0
Контроль формування контуру	Високий	Обмежений
Необхідність евакуації персоналу	Відсутня	Обов’язкова

Сейсмічний вплив	Мінімальний	Помітний
Тривалість технологічного циклу	Коротка, без простоїв	Значні простої

Загалом результати досліджень підземних випробувань свідчать, що гідравлічні механічні сплітери можуть ефективно застосовуватися у глибоких шахтах для локального і контрольованого руйнування порід високої міцності. Їх використання є особливо доцільним у випадках, коли необхідно мінімізувати пошкодження приконтурного масиву, зменшити динамічний вплив на масив і підвищити рівень безпеки робіт. Водночас технологія потребує ретельного проектування схем буріння і не може розглядатися як повна заміна буровибухових робіт при масовому видобутку.

3.5 Переваги та обмеження застосування гідравлічних механічних сплітерів у глибоких шахтах

Застосування гідравлічних механічних сплітерів у глибоких шахтах слід розглядати як спеціалізовану безвибухову технологію, ефективність якої визначається поєднанням геомеханічних, технологічних і організаційних чинників. На основі аналізу принципу дії, схем буріння та результатів підземних випробувань можна сформулювати низку переваг і обмежень цієї технології, які мають практичне значення при виборі способу руйнування порід. Однією з основних переваг гідравлічних механічних сплітерів є статичний характер навантаження на гірський масив. Відсутність імпульсного впливу дозволяє мінімізувати додаткове порушення напружено-деформованого стану порід, що особливо важливо в умовах великих глибин. У таких умовах масив перебуває у стані високих попередніх напружень, і будь-який динамічний вплив може призводити до розвитку небезпечних явищ, зокрема раптових

викидів або локальних сейсмічних подій. Застосування сплітерів істотно знижує ймовірність таких проявів.

Важливою перевагою є високий рівень контролю процесу руйнування. Тріщини розвиваються переважно між шпурами та у напрямку створеної вільної поверхні, що дає змогу формувати проектний контур виробки з мінімальними відхиленнями. Це зменшує зону порушення приконтурного масиву і позитивно впливає на стійкість виробок. За результатами підземних випробувань зона пошкодження масиву при застосуванні сплітерів не перевищує 0,1–0,2 м, що істотно менше порівняно з буровибуховими роботами. Суттєвою організаційною перевагою є відсутність необхідності евакуації персоналу та тривалих простоїв після виконання руйнування. Роботи зі сплітером можуть виконуватися без повного припинення суміжних процесів, що підвищує гнучкість виробничого циклу[34].

У глибоких шахтах, де провітрювання та газовий контроль після вибухів є складними і тривалими, цей чинник має вагоме значення з точки зору загальної ефективності. До переваг також слід віднести зниження рівня шуму, відсутність вибухових газів і пилу, а також спрощення вимог до зберігання і транспортування матеріалів. Використання гідравлічних сплітерів не потребує роботи з вибуховими речовинами, що зменшує ризики і спрощує систему охорони праці. Це особливо актуально для шахт з підвищеними вимогами до безпеки або з обмеженнями на застосування вибухових матеріалів. Разом з тим, технологія має низку обмежень, які не дозволяють розглядати її як універсальну заміну буровибухових робіт.

Основним обмеженням є відносно низька продуктивність при масовому руйнуванні порід. Об'єм зруйнованої породи за один цикл є невеликим, що робить застосування сплітерів економічно недоцільним для великих очисних вибоїв або при необхідності швидкого проведення значних обсягів виробок. Ефективність роботи сплітерів істотно залежить від якості буріння шпурів.

Високі вимоги до діаметра, глибини та прямолінійності шпурів потребують точного бурового обладнання і кваліфікованого персоналу. Порушення цих вимог може призводити до зниження ефективності руйнування або пошкодження обладнання, що було зафіксовано під час підземних випробувань. Ще одним обмежувальним чинником є залежність результату від природної тріщинуватості порід. У масивах з нерівномірною структурою розвиток тріщин може бути менш передбачуваним, що ускладнює контроль процесу руйнування. У таких умовах застосування сплітерів потребує коригування схем буріння або комбінування з іншими методами ослаблення масиву. Таким чином, гідравлічні механічні сплітери доцільно розглядати як ефективний інструмент для локального і контрольованого руйнування порід у глибоких шахтах, особливо в зонах з підвищеними вимогами до стійкості приконтурного масиву і безпеки робіт. Вони не замінюють повністю традиційні буровибухові технології, проте можуть суттєво доповнювати їх, забезпечуючи більш гнучкий і безпечний підхід до ведення гірничих робіт[37].

РОЗДІЛ 4 ОБҐРУНТУВАННЯ ВИБОРУ ТЕХНОЛОГІЙ РУЙНУВАННЯ ГІРСЬКИХ ПОРІД ДЛЯ УМОВ ГЛИБОКИХ ШАХТ

4.1 Аналіз умов глибоких шахт як визначального фактору вибору технології руйнування гірських порід Умови ведення гірничих робіт у глибоких шахтах суттєво відрізняються від умов середніх і малих глибин, що безпосередньо впливає на вибір технології руйнування гірських порід. Зі збільшенням глибини залягання виробок відбувається поступове зростання природних напружень у гірському масиві, ускладнюється геомеханічна обстановка і підвищуються вимоги до стабільності приконтурної зони. У таких умовах традиційні підходи до руйнування порід не завжди забезпечують необхідний рівень безпеки та ефективності. Одним з ключових факторів є вертикальний гірський тиск, який зростає пропорційно глибині. На глибинах понад 800–1000 м вертикальні напруження можуть досягати 20–30 МПа і більше, залежно від щільності порід. Окрім вертикальних напружень, у глибоких шахтах значну роль відіграють горизонтальні тектонічні напруження, величина яких у деяких регіонах може перевищувати вертикальні. Такий напружений стан масиву призводить до концентрації напружень навколо підземних виробок і підвищує ризик утворення зон ослаблення та неконтрольованого тріщиноутворення. Ще одним важливим чинником є фізико-механічні властивості гірських порід, які розробляються на великих глибинах. У багатьох глибоких шахтах поширені магматичні та метаморфічні породи з високою міцністю на стиск, що часто перевищує 150 МПа. Такі породи характеризуються відносно низькою міцністю на розтяг і крихким характером руйнування, що створює передумови для використання технологій, орієнтованих на створення розтягувальних напружень. Водночас висока міцність на стиск істотно обмежує ефективність механічних різальних методів. Складні умови глибоких шахт проявляються також у підвищених вимогах до збереження приконтурного масиву[45]. На великих глибинах будь-яке додаткове порушення порід навколо виробки може

призводити до втрати її стійкості, збільшення обсягів кріплення і зростання витрат на підтримання. Тому технології руйнування, які супроводжуються значним динамічним впливом і утворенням розвиненої зони пошкоджень, у таких умовах потребують обмеженого або вибіркового застосування. Окремо слід враховувати організаційні та безпекові особливості глибоких шахт. Зі збільшенням глибини ускладнюється система провітрювання, зростає тривалість переміщення персоналу і матеріалів, а також збільшується час простоїв, пов'язаних з аварійними або регламентними зупинками. Технології, що потребують повної евакуації персоналу та тривалого відновлення нормального газового режиму, істотно впливають на загальний виробничий цикл і знижують його гнучкість. Важливим фактором є також обмежений простір підземних виробок. У вузьких підготовчих і приствольних виробках використання громіздкого обладнання або складних механізмів є ускладненим.

Таблиця 4.1 – Основні фактори умов глибоких шахт та їх вплив на вибір технології руйнування порід

Фактор	Характеристика умов	Вплив на вибір технології
Глибина розробки	понад 800–1000 м	Обмеження застосування динамічних методів
Напружений стан масиву	Високі вертикальні та горизонтальні напруження	Перевага статичних і квазистатичних методів
Міцність гірських порід	Понад 150 МПа	Обмеження механічного різання

Стійкість приконтурної зони	Підвищені вимоги до стабільності	Необхідність контрольованого руйнування
Організаційні умови	Складне провітрювання, тривалі простої	Вибір технологій без евакуації персоналу

Це накладає додаткові обмеження на вибір технологій руйнування і сприяє застосуванню компактних та мобільних технічних засобів, здатних працювати в умовах обмеженого простору. Таким чином, умови глибоких шахт формують комплекс взаємопов'язаних вимог до технологій руйнування гірських порід. До них належать мінімізація динамічного впливу на масив, збереження приконтурної зони, адаптивність до високих напружень і можливість безпечного застосування в умовах складної організації робіт. Саме ці чинники мають бути покладені в основу вибору і обґрунтування конкретних технологічних рішень.

4.2 Порівняльна оцінка технологій руйнування гірських порід з урахуванням глибини залягання та міцності масиву Порівняльна оцінка технологій руйнування гірських порід у глибоких шахтах має ґрунтуватися на поєднанні двох ключових параметрів: глибини залягання виробок та фізико-механічних властивостей гірського масиву. Саме ці параметри визначають напружено-деформований стан порід, характер їх руйнування і допустимі технологічні впливи. Ігнорування хоча б одного з них призводить до вибору рішень, які можуть бути ефективними в одних умовах, але неприйнятними в інших. Зі збільшенням глибини ведення робіт змінюється не лише абсолютний рівень гірського тиску, а й співвідношення між вертикальними та горизонтальними напруженнями. У багатьох глибоких шахтах горизонтальні напруження перевищують вертикальні, що створює асиметричний напружений стан

навколо виробок. У таких умовах технології, пов'язані з імпульсним динамічним навантаженням, можуть ініціювати розвиток тріщин у небажаних напрямках.

Це особливо характерно для буровибухового способу, де вибухова хвиля поширюється в уже напруженому середовищі. Буровибухові технології залишаються найбільш універсальними з точки зору здатності руйнувати породи високої міцності, включаючи кварцити, базальти і граніти з міцністю на стиск понад 200 МПа. Проте з ростом глибини їх негативний вплив на приконтурний масив посилюється. У глибоких умовах зона порушення порід навколо виробки може значно перевищувати проектні значення, що призводить до збільшення обсягів кріплення і зростання експлуатаційних витрат. Крім того, необхідність евакуації персоналу і відновлення нормального газового режиму після вибуху істотно ускладнює організацію робіт.

Таблиця 4.2 – Порівняльна характеристика технологій руйнування порід залежно від глибини залягання

Технологія	Ефективність на глибинах до 800 м	Ефективність на глибинах 800–1200 м	Обмеження при великих глибинах
Буровибухов а	Висока	Середня	Підвищене пошкодження масиву, простої
Механічна	Середня	Низька	Високе зношування, обмеження за міцністю

Хімічна	Низька	Низька	Тривалість процесу, температурна чутливість
Гідравлічна (сплітери)	Середня	Середня–висока	Обмежена продуктивність

Механічні способи руйнування, зокрема використання прохідницьких комбайнів і різальних органів, є ефективними в породах середньої міцності. Однак у глибоких шахтах їх застосування обмежується не лише високою міцністю порід, а й підвищеними контактними напруженнями між інструментом і масивом. У таких умовах різко зростає зношування робочих органів, а питомі енерговитрати можуть досягати значень, що роблять технологію економічно недоцільною. Крім того, значні зусилля різання можуть створювати додаткове навантаження на приконтурну зону. Хімічні розширювальні суміші та термічні методи руйнування мають обмежену сферу застосування незалежно від глибини. Хімічні методи характеризуються повільним розвитком процесу і сильною залежністю від температурних умов, що ускладнює їх використання в глибоких шахтах зі стабільним виробничим циклом.

Термічні методи, у свою чергу, потребують значних енерговитрат і створюють додаткові проблеми з вентиляцією, що робить їх непридатними для систематичного застосування. Гідравлічні методи руйнування, зокрема гідравлічні механічні сплітери, демонструють інший підхід до взаємодії з гірським масивом. Їх ефективність базується на використанні низької міцності порід на розтяг і можливості створення контрольованих статичних напружень. З ростом глибини переваги такого підходу стають більш очевидними, оскільки відсутність динамічного впливу знижує ризик розвитку вторинних порушень у

масиві. З урахуванням міцності порід, сплітери можуть застосовуватися в широкому діапазоні значень, включаючи породи з міцністю на стиск понад 150 МПа. Проте їх продуктивність залишається обмеженою, що не дозволяє використовувати їх як основний метод при масовому руйнуванні. Водночас у зонах підвищених напружень або поблизу нестійких ділянок масиву вони забезпечують значно кращий контроль процесу руйнування порівняно з вибуховими методами.

Таблиця 4.3 – Вплив міцності гірських порід на доцільність застосування технологій руйнування

Міцність порід на стиск, МПа	Механічні методи	Буровибухові методи	Гідравлічні сплітери
до 80	Доцільні	Доцільні	Доцільні
80–150	Обмежено доцільні	Доцільні	Доцільні
150–200	Недоцільні	Доцільні	Обмежено доцільні
понад 200	Недоцільні	Доцільні	Доцільні для локальних робіт

Таким чином, порівняльна оцінка показує, що жодна з технологій не є однаково ефективною для всіх умов глибоких шахт. Зі збільшенням глибини і міцності порід зростає доцільність використання методів зі статичним характером навантаження, тоді як динамічні технології потребують обмеженого і обґрунтованого застосування. Саме поєднання глибини залягання та фізико-механічних властивостей масиву має визначати вибір конкретного способу руйнування.

4.3 Обґрунтування доцільності застосування гідравлічних механічних сплітерів у глибоких шахтах. Доцільність застосування гідравлічних механічних сплітерів у глибоких шахтах визначається сукупністю факторів, які не завжди можуть бути враховані при використанні традиційних технологій руйнування порід. Аналіз умов глибоких шахт і порівняльна оцінка технологій показують, що саме безвибухові методи статичної дії найбільшою мірою відповідають вимогам безпеки, керованості та збереження приконтурного масиву. Основною технічною перевагою гідравлічних механічних сплітерів є спосіб взаємодії з гірським масивом. Руйнування породи відбувається за рахунок створення розтягувальних напружень у межах попередньо пробурених шпурів, що дозволяє використовувати низьку міцність порід на розтяг.

Таблиця 4.4 – Умови доцільного застосування гідравлічних механічних сплітерів у глибоких шахтах

Умова	Характеристика	Доцільність застосування
Глибина ведення робіт	понад 800–1000 м	Висока
Міцність гірських порід	понад 150 МПа	Доцільно для локальних робіт
Вимоги до збереження контуру	Підвищені	Висока
Сейсмічні обмеження	Наявні або потенційні	Висока
Обсяг руйнування	Невеликий або середній	Доцільно
Організаційні умови	Обмеження на вибухові роботи	Висока

Для більшості твердих магматичних і метаморфічних порід міцність на розтяг у 8–15 разів менша, ніж міцність на стиск, що робить такий механізм руйнування енергетично доцільним навіть у породах з високою міцністю. В умовах великих глибин особливе значення має статичний характер навантаження, яке створюється сплітером. Відсутність вибухового імпульсу та ударних хвиль зменшує ризик перерозподілу напружень у масиві та розвитку вторинних тріщин за межами проєктного контуру. Це підтверджується результатами підземних випробувань, де зона порушення приконтурного масиву при застосуванні сплітерів не перевищувала 0,1–0,2 м. Для порівняння, при буровибухових роботах у подібних умовах зона пошкодження може сягати 0,8–1,0 м. Застосування гідравлічних механічних сплітерів є особливо доцільним у виробках зі складними геометричними умовами або підвищеними вимогами до точності формування контуру. Це стосується приствольних дворів, камер розміщення обладнання, зон перетину виробок, а також ділянок поблизу нестійких геологічних порушень. У таких умовах можливість контролю напрямку розвитку тріщин є важливішою за максимальну продуктивність руйнування. Організаційні переваги сплітерів також відіграють значну роль у глибоких шахтах. Відсутність необхідності евакуації персоналу, зберігання вибухових матеріалів і тривалих перерв на провітрювання дозволяє інтегрувати процес руйнування у безперервний виробничий цикл. Це особливо важливо на великих глибинах, де час простоїв має істотний вплив на загальну ефективність робіт. Разом з тим, застосування гідравлічних механічних сплітерів має чітко окреслені межі доцільності. Їх продуктивність є недостатньою для масового руйнування великих об'ємів породи, що не дозволяє використовувати їх як основний метод при очисних роботах.

Крім того, ефективність сплітерів значною мірою залежить від якості буріння шпурів і дотримання технологічних параметрів, що потребує високої дисципліни виконання робіт. З урахуванням наведеного, гідравлічні механічні

сплітери доцільно розглядати як спеціалізований інструмент для вирішення конкретних технологічних завдань у глибоких шахтах.

Найбільший ефект від їх застосування досягається при комбінуванні з традиційними буровибуховими технологіями, коли сплітери використовуються для формування вільної поверхні, коригування контуру або виконання робіт у зонах підвищеного ризику.

4.4 Технологічні обмеження та ризики застосування безвибухових методів руйнування порід у глибоких шахтах

Незважаючи на очевидні переваги безвибухових методів руйнування гірських порід, зокрема гідравлічних механічних сплітерів, їх застосування у глибоких шахтах супроводжується низкою технологічних обмежень і потенційних ризиків. Ігнорування цих факторів може призвести до зниження ефективності робіт або створення небезпечних умов, тому їх аналіз є необхідною складовою обґрунтування вибору технології.

Одним з основних обмежень безвибухових методів є відносно низька продуктивність процесу руйнування. На відміну від буровибухових робіт, які дозволяють за один технологічний цикл відокремлювати значні об'єми породи, гідравлічні сплітери забезпечують локальне руйнування. Об'єм відокремленої породи за один цикл є обмеженим, що робить недоцільним використання сплітерів для масового руйнування при проведенні очисних робіт або швидкій проходці довгих виробок.

Істотним фактором є висока залежність ефективності безвибухових методів від якості буріння шпурів. Порушення геометрії шпурів, відхилення від проектного напрямку або нерівномірна глибина буріння призводять до нерівномірного розподілу напружень у масиві та зниження ефективності розколювання. У глибоких шахтах, де буріння часто ускладнене високими напруженнями і обмеженим простором, цей фактор набуває особливої ваги.

До технологічних обмежень також належить залежність результатів руйнування від структурних особливостей гірського масиву. У породах з вираженою природною тріщинуватістю або анізотропною будовою розвиток тріщин під дією сплітера може відбуватися у непередбачуваних напрямках. Це ускладнює контроль процесу і потребує коригування схем буріння або застосування додаткових заходів ослаблення масиву.

Певні ризики пов'язані з технічним станом гідравлічного обладнання. Робота сплітерів здійснюється при високих гідравлічних тисках, що вимагає підвищених вимог до надійності з'єднань, шлангів і запобіжних клапанів. В умовах підвищеної вологості, запиленості та обмеженого доступу до обладнання в глибоких шахтах навіть незначні відмови можуть створювати небезпечні ситуації для персоналу.

Окремо слід враховувати організаційні ризики. Безвибухові методи часто потребують більшої тривалості виконання операцій, що може призводити до збільшення часу перебування працівників у небезпечній зоні. За відсутності чіткої організації робіт і контролю це може нівелювати частину переваг, пов'язаних з відсутністю вибухів. В таблиці 4.1 представлено основні технологічні обмеження та ризики застосування безвибухових методів руйнування у глибоких шахтах.

Таблиця 4.5 – Основні технологічні обмеження та ризики застосування безвибухових методів руйнування у глибоких шахтах

Обмеження або ризик	Причина виникнення	Можливі наслідки
Низька продуктивність руйнування	Локальний характер дії безвибухових методів	Збільшення тривалості виконання робіт
Високі вимоги до якості буріння шпурів	Необхідність точної геометрії та глибини шпурів	Зниження ефективності розколювання породи
Некерований розвиток тріщин	Структурна анізотропія та природна тріщинуватість порід	Порушення проектного контуру виробки
Ризик відмов гідравлічного обладнання	Високий робочий тиск та зношування елементів	Підвищення ймовірності аварійних ситуацій
Організаційні труднощі	Збільшення тривалості технологічних операцій	Зростання часу перебування персоналу у небезпечній зоні

Таким чином, безвибухові методи руйнування порід у глибоких шахтах не можуть розглядатися як універсальне рішення для всіх умов. Їх ефективне і безпечне застосування можливе лише за умови врахування технологічних обмежень, ретельного планування робіт і поєднання з іншими методами руйнування. Аналіз ризиків дозволяє визначити ті умови, за яких використання гідравлічних механічних сплітерів є виправданим і технічно обґрунтованим.

РОЗДІЛ 5 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА РОБІТ ПРИ РУЙНУВАННІ ГІРСЬКИХ ПОРІД У ГЛИБОКИХ ШАХТАХ

5.1 Небезпечні та шкідливі виробничі фактори при руйнуванні порід у глибоких шахтах

Умови праці у глибоких шахтах характеризуються поєднанням природних і техногенних факторів, які істотно підвищують рівень виробничої небезпеки. При виконанні робіт з руйнування гірських порід ці фактори діють одночасно і можуть посилювати один одного, що потребує системного підходу до їх ідентифікації та оцінки.

Одним з основних небезпечних факторів є підвищений гірський тиск. На великих глибинах масив перебуває у напруженому стані, і будь-яке втручання у його структуру може призводити до раптових обвалень, відшарування порід або руйнування кріплення. Особливу небезпеку це становить під час руйнування порід, коли відбувається перерозподіл напружень у приконтурній зоні виробки.

Таблиця 5.1 – Основні небезпечні та шкідливі виробничі фактори при руйнуванні гірських порід у глибоких шахтах

Фактор	Джерело виникнення	Потенційна небезпека
Підвищений гірський тиск	Перерозподіл напружень у масиві при веденні робіт	Обвалення порід, деформація або руйнування кріплення
Газові фактори	Порушення вентиляції, виділення газів з масиву	Отруєння персоналу, вибухонебезпечні ситуації

Підвищена температура і вологість	Геотермічний градієнт, обмежений повітрообмін	Перегрів організму, зниження працездатності
Запиленість повітря	Буріння шпурів і руйнування гірських порід	Професійні захворювання органів дихання
Шум і вібрація	Робота бурового та гідравлічного обладнання	Порушення слуху, підвищена втомлюваність
Рухомі частини машин	Експлуатація механізмів у обмеженому просторі	Травмування працівників

Значну загрозу для безпеки працівників становлять газові фактори. У глибоких шахтах можливе накопичення метану, вуглекислого газу, оксидів азоту та інших шкідливих газів, особливо після виконання бурових або вибухових робіт. Навіть при застосуванні безвибухових методів існує ризик локального погіршення газового режиму через недостатню ефективність вентиляції або порушення повітрообміну.

Важливим шкідливим фактором є підвищена температура і вологість повітря. Зі збільшенням глибини температура гірських порід зростає, що призводить до підвищення температури повітря у виробках. Робота в умовах високої температури і вологості викликає швидко втому, зниження концентрації уваги і підвищує ймовірність травматизму, особливо при виконанні фізично напружених операцій.

При руйнуванні порід значну небезпеку створює запиленість повітря. Пил, що утворюється при бурінні і відокремленні породи, може містити

дрібнодисперсні частинки, які при тривалому впливі спричиняють професійні захворювання органів дихання. У глибоких шахтах через ускладнений повітрообмін концентрація пилу може досягати небезпечних значень.

Окрему групу небезпечних факторів становлять фізичні впливи, зокрема шум і вібрація від роботи бурового та гідравлічного обладнання. Тривалий вплив шуму призводить до зниження слуху, а вібрація негативно впливає на опорно-руховий апарат і нервову систему. У вузьких виробках ці фактори посилюються через відбиття звукових хвиль від поверхонь порід.

До небезпечних факторів також належать рухомі частини машин і механізмів, гідравлічні шланги під високим тиском, а також обмежений простір робочої зони. У глибоких шахтах ускладнений доступ до обладнання і обмежені можливості маневрування підвищують ризик травмування персоналу при обслуговуванні технічних засобів руйнування.

Таким чином, роботи з руйнування гірських порід у глибоких шахтах супроводжуються комплексом небезпечних і шкідливих виробничих факторів. Їх ідентифікація є необхідною передумовою для розробки ефективних заходів охорони праці та забезпечення безпечних умов виконання гірничих робіт.

5.2 Заходи з охорони праці при застосуванні безвибухових технологій руйнування гірських порід у глибоких шахтах

Застосування безвибухових технологій руйнування гірських порід у глибоких шахтах потребує дотримання комплексу організаційних, технічних і санітарно-гігієнічних заходів охорони праці. Незважаючи на відсутність вибухових робіт, такі технології не усувають усіх небезпек, а лише змінюють їх характер, що вимагає адаптації системи безпеки до нових умов виконання робіт.

Першочергове значення мають організаційні заходи, спрямовані на забезпечення чіткого порядку виконання робіт. Перед початком руйнування порід необхідно проводити аналіз гірничо-геологічних умов ділянки, оцінювати стан приконтурного масиву та перевіряти відповідність схеми

буріння проектним рішенням. До виконання робіт допускається лише персонал, який пройшов навчання з безпечної експлуатації гідравлічного обладнання та ознайомлений з особливостями безвибухових методів руйнування. Основні заходи описані в таблиці 5.2.

Таблиця 5.2 – Основні заходи з охорони праці при застосуванні безвибухових технологій руйнування гірських порід

Захід	Напрямок дії	Очікуваний ефект
Регулярний технічний огляд гідравлічного обладнання	Запобігання відмовам і витокам робочої рідини	Зниження ймовірності аварійних ситуацій
Контроль якості буріння шпурів	Забезпечення стабільного процесу руйнування	Підвищення керованості та безпеки робіт
Організація та огороження робочої зони	Обмеження доступу сторонніх осіб	Зменшення ризику травматизму
Забезпечення ефективної вентиляції	Зменшення запиленості та нормалізація мікроклімату	Поліпшення умов праці персоналу
Застосування засобів індивідуального захисту	Захист органів дихання, зору та рук	Зниження професійних ризиків
Проведення інструктажів і навчання персоналу	Підвищення рівня обізнаності працівників	Зменшення помилок і порушень безпеки

Важливу роль відіграють технічні заходи безпеки. Гідравлічні механічні сплітери працюють під високим тиском, тому особлива увага приділяється справності гідросистеми, стану шлангів, з'єднань і запобіжних клапанів. Перед кожною зміною необхідно проводити огляд обладнання з фіксацією результатів у журналі технічного стану. Забороняється експлуатація сплітерів при наявності витоків робочої рідини або ознак пошкодження гідравлічних елементів.

Суттєве значення мають заходи щодо безпечної організації робочої зони. Під час розколювання породи працівники повинні перебувати поза зоною можливого відлітання уламків. Робоча зона має бути чітко визначена і огорожена, а сторонні особи не допускаються до місця виконання робіт. У вузьких виробках необхідно забезпечити достатній простір для безпечного розміщення обладнання і персоналу.

Окрему увагу слід приділяти вентиляції та контролю повітряного середовища. Хоча безвибухові технології не супроводжуються утворенням вибухових газів, при бурінні і руйнуванні порід утворюється пил, який може накопичуватися у виробках. Тому роботи повинні виконуватися за умов ефективної вентиляції з постійним контролем запиленості та температури повітря. За необхідності застосовуються місцеві засоби пилопригнічення.

Важливим елементом системи охорони праці є використання засобів індивідуального захисту. Працівники повинні бути забезпечені захисними касками, спецодягом, захисними окулярами, рукавицями та засобами захисту органів дихання. При роботі з гідравлічним обладнанням додатково застосовуються засоби захисту від можливого розбризкування робочої рідини.

Для зменшення негативного впливу фізичних факторів необхідно обмежувати тривалість безперервної роботи з обладнанням, що створює шум і вібрацію. Організація раціональних режимів праці та відпочинку дозволяє знизити втому персоналу і зменшити ризик помилок, пов'язаних з перевтомою.

Особливу увагу слід приділяти діям персоналу у разі виникнення аварійних ситуацій. Працівники повинні бути проінструктовані щодо порядку зупинки обладнання, відключення гідросистеми та евакуації з небезпечної зони. У глибоких шахтах такі дії мають бути відпрацьовані заздалегідь з урахуванням обмеженого простору та складних умов пересування.

Таким чином, ефективне застосування безвибухових технологій руйнування гірських порід у глибоких шахтах можливе лише за умови комплексного підходу до охорони праці. Поєднання організаційних, технічних і санітарно-гігієнічних заходів дозволяє суттєво знизити рівень виробничих ризиків і забезпечити безпечні умови виконання гірничих робіт.

5.3 Особливості безпеки праці при застосуванні гідравлічних механічних сплітерів у глибоких шахтах

Застосування гідравлічних механічних сплітерів як безвибухової технології руйнування гірських порід у глибоких шахтах суттєво змінює характер виробничих небезпек порівняно з традиційними буровибуховими роботами. Водночас повна відмова від вибухових речовин не означає автоматичного зниження всіх ризиків, а потребує врахування специфічних факторів, пов'язаних з роботою гідравлічного обладнання та умовами глибокого залягання виробок.

Однією з ключових особливостей безпеки при використанні гідравлічних механічних сплітерів є робота під високим тиском робочої рідини. Тиск у гідросистемі може досягати десятків мегапаскалів, що створює потенційну небезпеку у разі пошкодження шлангів, фітингів або корпусу сплітера. У глибоких шахтах, де ускладнений доступ до обладнання і обмежений простір для маневрування, навіть незначна несправність може мати серйозні наслідки. Тому безпечна експлуатація сплітерів потребує систематичного контролю стану гідросистеми та суворого дотримання регламентів технічного обслуговування.

Особливу увагу слід приділяти стабільності гірського масиву під час процесу розколювання. Хоча статичний характер навантаження зменшує динамічний вплив на масив, у глибоких шахтах можливі локальні перерозподіли напружень, які можуть призводити до відшарування порід або утворення вторинних тріщин. З цієї причини перед початком робіт необхідно оцінювати стан приконтурного масиву, а після кожного циклу руйнування здійснювати візуальний огляд виробки та кріплення.

Важливим аспектом безпеки є організація робочого простору навколо шпурів. У момент розколювання можливе відокремлення окремих уламків породи, які можуть переміщуватися у напрямку вільної поверхні. У вузьких виробках глибоких шахт це створює підвищений ризик травмування персоналу. Тому при роботі зі сплітером працівники повинні знаходитися поза зоною можливого переміщення уламків, а сам процес руйнування виконуватися з використанням дистанційних або напівдистанційних засобів керування, якщо це передбачено конструкцією обладнання.

Безпека робіт також значною мірою залежить від якості буріння шпурів. Нерівномірна глибина або відхилення від проектного напрямку можуть призводити до непередбачуваного розвитку тріщин, що ускладнює контроль процесу руйнування і підвищує ризик обвалень. У глибоких шахтах, де масив перебуває у напруженому стані, ці фактори мають особливе значення, тому буріння шпурів повинно виконуватися з підвищеною точністю і під контролем відповідального персоналу.

Окрему групу факторів безпеки становлять умови мікроклімату і вентиляції. Під час роботи сплітерів не утворюються вибухові гази, проте процес буріння і руйнування порід супроводжується виділенням пилу і локальним підвищенням температури. У глибоких шахтах ці фактори можуть швидко погіршувати умови праці, тому роботи повинні виконуватися за наявності стабільного повітрообміну і контролю параметрів повітряного середовища.

Інформацію про основні фактори безпеки при застосуванні гідравлічних механічних сплітерів у глибоких шахтах представлено в таблиці 5.3

Таблиця 5.3 – Основні фактори безпеки при застосуванні гідравлічних механічних сплітерів у глибоких шахтах

Фактор безпеки	Джерело ризику	Заходи мінімізації
Високий гідравлічний тиск	Можливе пошкодження шлангів та з'єднань гідросистеми	Регулярний огляд, використання справних запобіжних клапанів
Стійкість гірського масиву	Перерозподіл напружень під час розколювання породи	Постійний контроль приконтурної зони та кріплення
Відліт уламків породи	Раптове відокремлення блоків при розколюванні	Огородження робочої зони, дистанційне керування
Якість буріння шпурів	Відхилення від проектної геометрії	Технічний контроль буріння та перевірка параметрів
Запиленість і мікроклімат	Утворення пилу та локальне підвищення температури	Посилена вентиляція та застосування ЗІЗ

Таким чином, безпека праці при застосуванні гідравлічних механічних сплітерів у глибоких шахтах визначається поєднанням технічних,

геомеханічних та організаційних чинників. Дотримання спеціалізованих вимог до експлуатації гідравлічного обладнання, контролю стану масиву та організації робочої зони дозволяє реалізувати переваги безвибухових технологій без зниження рівня промислової безпеки.

5.4 Порівняльна оцінка рівня безпеки безвибухових та буровибухових технологій руйнування порід у глибоких шахтах

Порівняльна оцінка рівня безпеки різних технологій руйнування гірських порід у глибоких шахтах є необхідною складовою обґрунтування їх вибору, оскільки саме безпека праці в умовах великих глибин часто є визначальним критерієм прийняття технологічних рішень. Традиційні буровибухові роботи та безвибухові методи, зокрема із застосуванням гідравлічних механічних сплітерів, суттєво відрізняються за характером і масштабом виробничих ризиків.

Буровибухові технології характеризуються наявністю динамічного впливу на гірський масив, який у глибоких шахтах може призводити до різкого перерозподілу напружень. Вибухові імпульси в умовах високого початкового напруженого стану масиву здатні ініціювати розвиток вторинних тріщин за межами проектного контуру виробки, а в окремих випадках спричиняти локальні сейсмічні прояви. Це підвищує ризик обвалень, пошкодження кріплення і створює додаткову небезпеку для персоналу після відновлення робіт.

Суттєвим фактором ризику при буровибухових роботах є необхідність поводження з вибуховими матеріалами. Транспортування, зберігання і заряджання вибухових речовин вимагають суворого дотримання регламентів і залучення спеціально підготовленого персоналу. У глибоких шахтах ускладнюється контроль за виконанням цих вимог, що підвищує ймовірність аварійних ситуацій. Крім того, після вибуху необхідні тривалі перерви на провітрювання виробок і перевірку газового режиму, що супроводжується

простоем і підвищеним ризиком для працівників, які першими повертаються у вибій.

Безвибухові технології руйнування, зокрема гідравлічні механічні сплітери, мають інший характер впливу на гірський масив. Відсутність вибухового імпульсу знижує ймовірність неконтрольованого перерозподілу напружень і дозволяє більш прогнозовано керувати процесом руйнування. У глибоких шахтах це є важливою перевагою, оскільки зменшується зона пошкодження приконтурного масиву і знижується навантаження на систему кріплення.

З точки зору організації безпечних умов праці безвибухові методи мають низку переваг. Вони не потребують евакуації персоналу на значну відстань, не супроводжуються утворенням вибухових газів і дозволяють виконувати роботи у більш стабільному виробничому режимі. Це особливо важливо у глибоких шахтах, де ускладнені маршрути пересування і тривалий час доступу до аварійних виходів.

Разом з тим, безвибухові технології не є повністю позбавленими ризиків. Робота гідравлічних механічних сплітерів пов'язана з високими тисками у гідросистемі, можливим відлітанням уламків породи та підвищеними вимогами до точності буріння шпурів. Проте ці ризики мають локальний характер і можуть бути ефективно знижені шляхом технічного контролю обладнання, організації робочої зони та дотримання регламентів безпеки.

Таблиця 5.4 – Порівняльна характеристика рівня безпеки буровибухових та безвибухових технологій руйнування порід у глибоких шахтах

Критерій безпеки	Буровибухові роботи	Безвибухові технології (гідравлічні сплітери)
Характер впливу на гірський масив	Динамічний, імпульсний	Статичний, контрольований
Зона пошкодження приконтурного масиву	Значна, до 0,8–1,0 м	Обмежена, до 0,1–0,2 м
Газова та пилова небезпека	Підвищена після вибуху	Низька, локальна
Необхідність евакуації персоналу	Обов’язкова	Не потребується
Керованість процесу руйнування	Обмежена	Висока
Рівень виробничих ризиків у глибоких шахтах	Підвищений	Знижений

Порівняльний аналіз (таблиця 5.4) показує, що в умовах глибоких шахт загальний рівень виробничих ризиків при застосуванні безвибухових технологій є нижчим, ніж при буровибухових роботах, особливо у зонах з підвищеним напруженим станом масиву або поблизу важливих інженерних об’єктів. Водночас буровибухові технології зберігають свою доцільність при масовому руйнуванні порід за умови суворого дотримання вимог охорони праці.

Таким чином, з позицій промислової безпеки у глибоких шахтах доцільним є диференційований підхід до вибору технологій руйнування порід. Безвибухові методи, зокрема гідравлічні механічні сплітери, доцільно застосовувати у зонах підвищеного ризику, при виконанні локальних робіт і формуванні проектного контуру, тоді як буровибухові роботи можуть використовуватися для масового руйнування за межами небезпечних ділянок.

ВИСНОВКИ

У випускній кваліфікаційній роботі виконано теоретичне обґрунтування вибору технологій руйнування гірських порід у глибоких шахтах з урахуванням гірничо-геологічних, геомеханічних, технологічних та безпекових факторів. Проведений аналіз підтвердив, що зі зростанням глибини ведення гірничих робіт істотно змінюються умови взаємодії технологічних засобів з гірським масивом, що потребує перегляду традиційних підходів до руйнування порід.

Встановлено, що в умовах глибоких шахт вирішальну роль відіграє напружено-деформований стан гірського масиву. Високі вертикальні та горизонтальні напруження зумовлюють підвищену чутливість масиву до динамічних впливів, що обмежує доцільність застосування буровибухових технологій у зонах з підвищеним рівнем геомеханічних ризиків. У таких умовах особливого значення набувають технології, які забезпечують контрольований і прогнозований характер руйнування порід.

Порівняльний аналіз основних технологій руйнування показав, що буровибухові роботи зберігають високу ефективність при масовому руйнуванні гірських порід, однак супроводжуються значним пошкодженням приконтурного масиву, динамічним впливом і підвищеними вимогами до безпеки праці. Механічні способи руйнування є обмежено ефективними в породах високої міцності, характерних для багатьох глибоких шахт.

Обґрунтовано, що гідравлічні механічні сплітери є доцільним безвибуховим засобом руйнування гірських порід у глибоких шахтах при виконанні локальних робіт, формуванні проектного контуру виробок, роботах у зонах підвищеного напруженого стану та поблизу важливих інженерних об'єктів. Статичний характер навантаження, який створюється сплітерами, дозволяє суттєво зменшити зону порушення приконтурного масиву та підвищити керованість процесу руйнування.

Аналіз технологічних обмежень показав, що безвибухові методи не можуть розглядатися як універсальна заміна буровибухових робіт. Їх застосування обмежується відносно низькою продуктивністю та високими вимогами до якості буріння шпурів. У зв'язку з цим найбільш раціональним є комбінований підхід до руйнування порід, який передбачає поєднання буровибухових і безвибухових технологій залежно від конкретних умов ділянки.

У роботі встановлено, що з позицій охорони праці та промислової безпеки безвибухові технології, зокрема із застосуванням гідравлічних механічних сплітерів, мають переваги в умовах глибоких шахт. Відсутність вибухових робіт, зниження газової небезпеки та можливість виконання робіт без евакуації персоналу дозволяють зменшити загальний рівень виробничих ризиків. Разом з тим, безпечне застосування сплітерів потребує суворого дотримання вимог до експлуатації гідравлічного обладнання, організації робочої зони та контролю стану гірського масиву.

Загалом результати дослідження підтверджують доцільність використання диференційованого підходу до вибору технологій руйнування гірських порід у глибоких шахтах. Обґрунтований вибір технологій з урахуванням глибини, фізико-механічних властивостей порід і вимог безпеки дозволяє підвищити ефективність гірничих робіт, зменшити негативний вплив на гірський масив і забезпечити безпечні умови праці персоналу.

АНОТАЦІЯ

У випускній кваліфікаційній роботі виконано теоретичне обґрунтування вибору технологій руйнування гірських порід у глибоких шахтах з урахуванням гірничо-геологічних, геомеханічних, технологічних та безпекових чинників. Розглянуто особливості напружено-деформованого стану гірського масиву на великих глибинах та його вплив на ефективність і безпечність застосування різних способів руйнування порід.

Проаналізовано традиційні буровибухові та безвибухові технології руйнування гірських порід, визначено їх переваги, обмеження та області доцільного застосування у складних умовах глибоких шахт. Особливу увагу приділено гідравлічним механічним сплітерам як засобу контрольованого статичного руйнування порід з мінімальним впливом на приконтурний масив.

У роботі обґрунтовано доцільність комбінованого застосування буровибухових і безвибухових технологій залежно від глибини ведення робіт, міцності гірських порід та вимог до збереження проектного контуру виробок. Наведено аналіз технологічних обмежень і ризиків безвибухових методів, а також розглянуто питання охорони праці та безпеки робіт при руйнуванні порід у глибоких шахтах.

Результати роботи можуть бути використані при виборі технологій руйнування гірських порід у підготовчих і допоміжних виробках глибоких шахт, а також при розробленні заходів з підвищення безпеки та ефективності гірничих робіт.

ГЛИБОКІ ШАХТИ, РУЙНУВАННЯ ГІРСЬКИХ ПОРІД, БЕЗВИБУХОВІ ТЕХНОЛОГІЇ, ГІДРАВЛІЧНІ МЕХАНІЧНІ СПЛІТЕРИ, ГІРСЬКИЙ МАСИВ, ОХОРОНА ПРАЦІ.

ANNOTATION

In the graduation qualification work, a theoretical substantiation of the selection of rock fragmentation technologies for deep mines is carried out, taking into account mining and geological, geomechanical, technological, and safety factors. The features of the stress–strain state of the rock mass at great depths and its influence on the efficiency and safety of various rock fragmentation methods are analyzed.

Traditional drilling and blasting technologies as well as non-explosive rock fragmentation methods are considered, and their advantages, limitations, and areas of effective application under deep mining conditions are identified. Special attention is paid to hydraulic mechanical splitters as a means of controlled static rock fragmentation with minimal impact on the surrounding rock mass.

The study substantiates the feasibility of a combined application of blasting and non-explosive technologies depending on mining depth, physical and mechanical properties of rocks, and requirements for maintaining the design contour of underground excavations. Technological limitations and risks associated with non-explosive methods are analyzed, and occupational safety issues related to rock fragmentation in deep mines are examined.

The results of the work can be applied in the selection of rock fragmentation technologies for development and auxiliary workings in deep mines, as well as in the development of measures aimed at improving the safety and efficiency of mining operations.

DEEP MINES, ROCK FRAGMENTATION, NON-EXPLOSIVE TECHNOLOGIES, HYDRAULIC MECHANICAL SPLITTERS, ROCK MASS, OCCUPATIONAL SAFETY.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Brady B. H. G., Brown E. T. Rock Mechanics for Underground Mining. Dordrecht: Springer, 2006. 628 p.
2. Hoek E., Brown E. T. Underground Excavations in Rock. London: CRC Press, 2019. 600 p.
3. Jaeger J. C., Cook N. G. W., Zimmerman R. Fundamentals of Rock Mechanics. Oxford: Blackwell Publishing, 2007. 488 p.
4. Hudson J. A., Harrison J. P. Engineering Rock Mechanics: An Introduction to the Principles. Amsterdam: Elsevier, 1997. 444 p.
5. Bieniawski Z. T. Engineering Rock Mass Classifications. New York: Wiley, 1989. 251 p.
6. Singh B., Goel R. K. Rock Mass Classification: A Practical Approach in Civil Engineering. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2011. 358 p.
7. Persson P. A., Holmberg R., Lee J. Rock Blasting and Explosives Engineering. Boca Raton: CRC Press, 1994. 540 p.
8. Langefors U., Kihlström B. The Modern Technique of Rock Blasting. Stockholm: Wiley, 1978. 438 p.
9. Hustrulid W. A., Bullock R. L. Underground Mining Methods: Engineering Fundamentals and International Case Studies. Littleton: SME, 2001. 718 p.
10. Hartman H. L., Mutmansky J. M. Introductory Mining Engineering. Hoboken: Wiley, 2002. 584 p.
11. Villaescusa E. Geotechnical Design for Sublevel Open Stopping. Leiden: CRC Press, 2014. 420 p.
12. Stacey T. R. Deep Mining: A Rock Engineering Challenge. Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy. 2010. Vol. 110. P. 747–756.
13. Ortlepp W. D. Rock Fracture and Rockbursts. Johannesburg: SAIMM, 2000. 260 p.

14. Cai M., Kaiser P. K., Tasaka Y. Rock Mass Strength Estimation and Application to Tunnel Design. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2004. Vol. 41. P. 3–19.
15. Zhang L. *Engineering Properties of Rocks*. Oxford: Elsevier, 2016. 420 p.
16. Ranjith P. G., Zhao J. Application of Hydraulic Splitting in Rock Engineering. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2012. Vol. 45. P. 841–855.
17. Liu J., Chen W., Yuan J. Non-explosive Rock Breaking Technology and Its Application. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2015. Vol. 49. P. 232–243.
18. Zhao J. *Rock Mechanics for Underground Construction*. Singapore: Springer, 2014. 620 p.
19. Dai F., Xia K. Laboratory Measurements of Dynamic Rock Properties. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2010. Vol. 43. P. 1–10.
20. De Graaf W. Preliminary Investigation into the Use of Hydraulic Rock Splitters as an Alternative to Blasting. Master's Thesis. Pretoria: University of Pretoria, 2018. 120 p.
21. Kou S., Rustan A. *Mechanical Rock Excavation Methods*. London: Taylor & Francis, 1993. 298 p.
22. Obert L., Duvall W. I. *Rock Mechanics and the Design of Structures in Rock*. New York: Wiley, 1967. 650 p.
23. Fairhurst C. Stress Estimation in Rock Masses. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2004. Vol. 41. P. 121–130.
24. Xie H. P., Ju Y., Li L. Energy Mechanism of Deformation and Failure of Rock Masses. *Science in China*. 2011. Vol. 54. P. 123–136.
25. Cook N. G. W. The Failure of Rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 1965. Vol. 2. P. 389–403.

26. Wang J., Park H. D. Hydraulic Fracturing and Rock Splitting Techniques in Underground Engineering. *Engineering Geology*. 2016. Vol. 210. P. 1–13.
27. Palmström A., Broch E. Use and Misuse of Rock Mass Classification Systems. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2006. Vol. 21. P. 575–593.
28. Li X., Zhao J. Stress Wave Propagation in Jointed Rock Masses. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2014. Vol. 47. P. 103–116.
29. Bieniawski Z. T., Celada B. *Rock Mass Excavability*. Rotterdam: Balkema, 1995. 412 p.
30. Stacey T. R., Wesseloo J. Managing Rockburst Risk in Deep Mines. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2019. Vol. 11. P. 695–704.
31. Singh S. P. Non-explosive Rock Breaking Methods in Mining. *Mining Technology*. 2008. Vol. 117. P. 33–40.
32. Hoek E. *Practical Rock Engineering*. Vancouver: Rocscience, 2007. 341 p.
33. Brady B. H. G. *Rock Mechanics for Mining Engineers*. London: Chapman & Hall, 1990. 573 p.
34. Cai M. Influence of Stress on Rock Fracturing. *Engineering Geology*. 2010. Vol. 116. P. 1–8.
35. Zhao Y., Yang S. Crack Propagation in Rock under Static Loading. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2018. Vol. 51. P. 151–168.
36. Li H., Ma G., Zhao J. Modeling of Rock Splitting Using Hydraulic Pressure. *Computers and Geotechnics*. 2015. Vol. 69. P. 41–52.
37. ISRM. *The Complete ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring*. Lisbon: ISRM, 2007. 628 p.
38. Goodman R. E. *Introduction to Rock Mechanics*. Hoboken: Wiley, 1989. 576 p.
39. Peng S. S. *Coal Mine Ground Control*. Morgantown: SME, 2008. 600 p.

40. Kaiser P. K., McCreath D. R. Stress Analysis in Deep Mining. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 1994. Vol. 31. P. 281–290.
41. Brady B. H. G., Brown E. T. Stability of Underground Excavations. *Rock Mechanics and Mining Sciences*. 1985. Vol. 22. P. 1–16.
42. Sun Q., Li X. Rock Damage Mechanisms under High Stress. *Engineering Fracture Mechanics*. 2019. Vol. 210. P. 225–237.
43. Zhang Z. X. *Rock Fracture and Blasting*. Amsterdam: Elsevier, 2016. 532 p.
44. Zhao J., Zhou Y. Application of Static Rock Breaking Agents. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2014. Vol. 43. P. 404–412.
45. Liu Q., Pan Y. Rockburst Mechanisms in Deep Mines. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2018. Vol. 10. P. 115–124.
46. Wesseloo J. Seismicity in Deep Mining Environments. *Mining Technology*. 2017. Vol. 126. P. 88–97.
47. Villaescusa E., Potvin Y. *Ground Control in Underground Mines*. Perth: Australian Centre for Geomechanics, 2008. 520 p.
48. Hudson J. A. *Rock Engineering Design*. London: ICE Publishing, 2015. 458 p.
49. Stacey T. R. Control of Rockburst Damage. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. 2007. Vol. 107. P. 473–482.
50. Zhao J., Li H. *Non-explosive Excavation in Underground Engineering*. Singapore: Springer, 2020. 410 p.