

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

«Допущено до захисту»
Гарант ОПП «Відкрита розробка корисних
копалин»

Ольга БОГОМАЗ

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня бакалавра

за підсумками виконання
освітньо-професійної програми
«Відкрита розробка корисних копалин»
за спеціальністю 184 Гірництво

на тему «Обґрунтування доцільного способу руйнування негабаритних
блоків при видобутку гранітоїдів»

Керівник роботи

Іван САХНО

Консультант від
бази практики

Олексій ХОЛОДЕНКО

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

Здобувач

Арсен ПОГОСЯН

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

Голова ЕК

Ігор ТОНЄВ

Запоріжжя 2026

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ
ЗДОБУВАЧА БАКАЛАВРСЬКОГО РІВНЯ ВИЩОЇ ОСВІТИ
ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»

Факультет гірничо-металургійний
Кафедра гірничої справи
Ступінь
вищої освіти бакалавр
Спеціальність 184 Гірництво
ОПП Відкрита розробка родовищ

ЗАТВЕРДЖУЮ
Гарант освітньої програми
_____ Ольга БОГОМАЗ
«20» лютого 2026р.

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ БАКАЛАВРА

Погосяна Арсена Вачагановича

(прізвище, ім'я, по батькові здобувача)

1. **Тема роботи** « Обґрунтування доцільного способу руйнування негабаритних блоків при видобутку гранітоїдів»

керівник роботи: Сахно Іван Георгійович, доктор техн. наук, професор

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом Університету від 21.02.2026 №41

2. **Термін подання роботи** 15.06.2026

3. **Вихідні дані до роботи** : результати переддипломної практики

4. **Зміст пояснювальної записки (перелік питань)**

Анотація. Зміст. Вступ.

1. Сучасні уявлення про механізм руйнування гірничих порід вибухом
2. Методи підвищення якості вибухової відбійки блочного каменю
3. Вплив вибухового впливу на міцнісні властивості гірничих порід
4. Опис запропонованого способу невибухового руйнування порід
5. Розрахунок параметрів запропонованого способу невибухового руйнування негабариту
6. Досвід застосування розробленого способу руйнування
7. Спрямоване руйнування гірських порід за допомогою НРС
8. Економічне порівняння варіантів

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

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта
Розділи 1–8	Сахно І. Г., доктор технічних наук, професор кафедри гірничої справи

7. Дата видачі завдання. 20 лютого 2026р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1.	Збір та аналіз інформації, аналіз літературних джерел	Лютий 2026 р.	Виконано
2.	Аналіз вибухового впливу на міцнісні властивості гірничих порід	Березень 2026 р.	Виконано
3.	Розрахунок параметрів запропонованого способу невибухового руйнування негабариту	Квітень 2026 р.	Виконано
4.	Економічне порівняння варіантів	Травень 2026 р.	Виконано
5.	Оформлення розділу з охорони праці, формування загальних висновків та списку джерел	Травень 2026 р.	Виконано
6.	Передзахист роботи та подання роботи керівнику	Червень 2026 р.	На захист

Керівник роботи

Іван САХНО

Здобувач

Арсен ПОГОСЯН

ЗМІСТ

АНОТАЦІЯ	5
ВСТУП	7
1. СУЧАСНІ УЯВЛЕННЯ ПРО МЕХАНІЗМ РУЙНУВАННЯ ГІРНИЧИХ ПОРІД ВИБУХОМ.....	8
2. МЕТОДИ ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ ВИБУХОВОЇ ВІДБІЙКИ БЛОЧНОГО КАМЕНЮ.....	12
3. ВПЛИВ ВИБУХОВОГО ВПЛИВУ НА МІЦНІСНІ ВЛАСТИВОСТІ ГІРНИЧИХ ПОРІД.....	22
4. ОПИС ЗАПРОПОНОВАНОГО СПОСОБУ НЕВИБУХОВОГО РУЙНУВАННЯ ПОРІД.....	27
4.1 Опис технології робіт.....	27
4.2 Загальні відомості про невибухові руйнівні склади.....	28
4.3 Характеристика умов і місця випробування.....	30
5. РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ ЗАПРОПОНОВАНОГО СПОСОБУ НЕВИБУХОВОГО РУЙНУВАННЯ НЕГАБАРИТУ.....	33
5.1. Фізичне обґрунтування запропонованого способу.....	33
5.2 Приклад розрахунків параметрів.....	35
6. ДОСВІД ЗАСТОСУВАННЯ РОЗРОБЛЕНОГО СПОСОБУ РУЙНУВАННЯ.....	36
7. СПРЯМОВАНЕ РУЙНУВАННЯ ГІРСЬКИХ ПОРІД ЗА ДОПОМОГОЮ НРС.....	42
8. ЕКОНОМІЧНЕ ПОРІВНЯННЯ ВАРІАНТІВ.....	51
8.1. Варіант 1. Механічне руйнування алмазною пилкою.....	51
8.2. Варіант 2. Спрямований гідроразрив.....	53
8.3. Варіант 3. Буровибуховий спосіб.....	56
8.4. Варіант 4. Використання НРС-1 (з патронами-концентраторами).....	59
.....	59
ВИСНОВКИ.....	62
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	64

АНОТАЦІЯ

Погосян А.В.. Удосконалення технології руйнування негабаритних брил граніту на прикладі ПАТ «Хлібодарівський кар'єр» – Кваліфікаційна праця на правах рукопису.

Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня бакалавр, за спеціальністю 184 Гірництво, ОПП «Відкрита розробка родовищ» – ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА», Запоріжжя, 2026.

Об'єкт дослідження – технологічні процеси додаткового руйнування негабаритних брил граніту, що утворюються після масових вибухів на кар'єрі.

Предмет дослідження – технологічні параметри, конструктивні особливості та порівняльна ефективність різних способів вторинного руйнування негабариту, включаючи механічне (алмазне пиляння), спрямоване гідроруйнування, буровибуховий спосіб та використання невзривних руйнуючих сумішей (НРС) із патронами-концентраторами.

У першому розділі проаналізована сучасна практика руйнування негабаритних брил граніту на ПАТ «Хлібодарівський кар'єр». Надана загальна характеристика фізико-механічних властивостей гранітів родовища (межа міцності на стиск 140-220 МПа). Приведено аналіз існуючих рішень щодо вторинного руйнування, виявлено недоліки традиційних методів (висока небезпека БВР, низька продуктивність, забруднення атмосфери, погіршення якості продукції мікротріщинами). В результаті визначена необхідність удосконалення технології шляхом розробки та впровадження ефективних безвибухових методів, сформульована невирішена частина проблеми, яку планується досліджувати та вирішувати в рамках кваліфікаційної роботи, а саме – обґрунтування найбільш раціонального безвибухового способу, що забезпечує максимальну якість та мінімальну собівартість руйнування негабариту.

У другому розділі проведено аналіз технологічних параметрів та розроблено детальні схеми для чотирьох варіантів руйнування негабариту (алмазна пилка, СГР, БВР, НРС).

У третьому розділі обґрунтовано конструктивні особливості та технологічні параметри використання невзривних руйнуючих сумішей (НРС) типу НРВ-80 із патронами-концентраторами, наведено схеми та опис фізики процесу.

У четвертому розділі розраховано параметри бурових робіт для всіх способів, включаючи сітку шпурів та їх глибину.

У п'ятому розділі наведено технічні характеристики та обґрунтовано вибір обладнання для кожного способу, включаючи алмазну пилку, установку СГР, перфуратори та насосну станцію для НРС.

У шостому розділі розроблено заходи з безпеки праці, екологічної безпеки та цивільного захисту при виконанні робіт з руйнування негабариту.

У сьомому розділі виконано економічний розрахунок собівартості руйнування 1 м³ граніту для всіх варіантів, встановлено, що НРС із патронами-концентраторами є найбільш ефективним способом.

У восьмому розділі виконано техніко-економічне порівняння та оцінку ефективності всіх варіантів на 2026 рік, з урахуванням зростання погодинних ставок кваліфікованого персоналу (340-360 грн/год). Наведено порівняльну діаграму структури витрат, яка наочно демонструє, що Варіант 4 (НРС із патронами) є найбільш економічно вигідним (~640 грн/м³). Його вартість у 2–2,5 рази нижча за розпил або БВР завдяки мінімізації витрат на персонал та охорону (70% — це вартість матеріалів). Також наведено діаграму цілісності, яка підтверджує, що використання НРС забезпечує максимальну якість та цілісність блоку, аналогічну найдорожчому алмазному розпилу.

Ключові слова: Хлібодарівський кар'єр, негабарит, граніт, спрямований гідророзрив (СГР), невзривна руйнуюча суміш (НРС), НРВ-80, патрон-концентратор, економічна ефективність, якість блоку.

ВСТУП

Актуальність теми. Сучасна розробка родовищ корисних копалин відкритим способом характеризується постійним наближенням контурів кар'єрів до житлових масивів, промислових споруд та охоронних зон інженерних комунікацій. У таких умовах традиційні масові вибухи стають неможливими через жорсткі екологічні норми та ризики сейсмічного пошкодження об'єктів на поверхні. Крім того, при видобутку штучного каменю та облицювальних матеріалів, вибухова хвиля знижує вихід придатної продукції, створюючи мережу мікротріщин у масиві.

Технологія невибухового руйнування міцних монолітних об'єктів за допомогою руйнівних сумішей (НРС) виступає як найбільш раціональна альтернатива. Метод базується на використанні енергії гідратації хімічних реагентів, що створюють тиск розширення у шпурах, достатній для подолання межі міцності породи.

Переваги застосування в умовах кар'єру:

Високий вихід сортового блоку: На відміну від динамічного удару, НРС забезпечує "м'яке" відокремлення моноліту від масиву, зберігаючи природну міцність і декоративні властивості каменю (граніту, лабрадориту, габро).

Відсутність розльоту уламків: Це дозволяє не припиняти роботу техніки (екскаваторів, самоскидів) у сусідніх зонах кар'єру та не проводити евакуацію персоналу, що значно оптимізує робочий цикл.

Екологічна безпека: Повна відсутність пилової хмари та отруйних продуктів детонації, що є критичним при роботі в глибоких кар'єрах з утрудненим природним провітрюванням.

Локальність впливу: Можливість точного контурного підризу (пасирування) великих негабаритів без загрози пошкодження транспортних берм та з'їздів кар'єру.

Технічна простота. Реалізація способу не потребує залучення ліцензованих вибухових служб чи використання детонаторів. Достатньо стандартного бурового обладнання для підготовки шпурів, що робить технологію доступною для малих та середніх кар'єрів.

Мета роботи полягає в обґрунтуванні параметрів шпурових зарядів НРС для ефективного руйнування негабаритів та відокремлення блоків від масиву в умовах кар'єру, а також у дослідженні економічної ефективності методу порівняно з гідроклинами та механічним ударним руйнуванням.

1. СУЧАСНІ УЯВЛЕННЯ ПРО МЕХАНІЗМ РУЙНУВАННЯ ГІРНИЧИХ ПОРІД ВИБУХОМ

Вплив вибуху на гірничі породи не обмежується лише подрібненням на окремоті, а призводить також до зміни їхніх фізико-механічних властивостей [1-5], зокрема, змінюється міцність шматків гірничої маси порівняно з міцністю зразків із масиву. Останнє явище становить значний інтерес з точки зору вибору оптимального ступеня вибухового впливу залежно від подальших технологічних процесів переробки мінеральної сировини (дроблення, подрібнення). Найбільш важливим видається таке дослідження для міцних гірничих порід, що мають типові мікроструктури. Проблема знеміцнення відбитої вибухом окремоті виникає також при видобутку будівельних матеріалів та штучного каменю, причому мікротріщинність, що розвивається, негативно впливає на якість продукції.

Незважаючи на вже наявні дослідження цього явища, досі залишаються невирішеними актуальні питання: які основні характеристики вибуху та породи і в яких діапазонах впливають на ступінь їхнього знеміцнення.

Основні положення механіки руйнування вказують, що міцність і руйнування структурно-неоднорідного середовища визначаються такими неоднорідностями гірничих порід, як тріщини (зокрема й мікротріщини), вклучення, порушення однорідності та дислокації. Вплив вибуху призводить як до росту макротріщин у породі, що визначають поділ масиву на окремоті, так і до росту мікротріщин, які лише послаблюють окремоті, тобто знижують їхню міцність.

Руйнування твердого середовища вибухом аж до поділу його на частини [6] (блоки) включає накопичення, розвиток і змикання тріщин різного розміру. Початкова стадія цього процесу пов'язана з ростом концентрації мікротріщин. В силу просторових і часових флуктуацій накопичення мікротріщин перехід до їхнього злиття з утворенням більших тріщин має локальний і ймовірнісний характер. Тому при даному напруженому стані та режимі навантаження середня концентрація мікротріщин, при якій починається перехід до макротріщин, буває різною. У досить малому об'ємі накопичення мікротріщин може бути рівномірним аж до значень n середньої концентрації, близьких до критичного $n_{кр}$ [7-9], якому відповідає перехід; у досить великому об'ємі руйнування може перейти в стадію макророзтріскування вже при малій середній концентрації мікротріщин $n \leftrightarrow n_{кр}$. У будь-якому випадку середня концентрація мікротріщин є

статистичним параметром ймовірнісного процесу переходу від мікро- до макротріщин, і для будь-якого опису цього процесу представляє інтерес залежність n від часу t при даному напруженому стані та режимі навантаження [10-13].

Для вирішення основних питань вибухового знеміцнення автором [14-16] розглянуто такі завдання: оцінка початкових довжин тріщин у породі з урахуванням розташування в масиві та відстаней від заряду, які почнуть розвиватися при вибуху; оцінка кінцевих довжин мікротріщин після вибуху. Авторами [17] основну увагу було приділено таким рівням дефектності підірваної маси, які розвиваються в глибині окремої тріщиноутворення на цьому рівні визначається квазістаціонарними складовими напруженого стану, що не залежать від локальних перерозподільників напружень, викликаних ростом нових поверхонь при вибуху.

Порушеність осколків підірваної гірничої маси впливає на низку їхніх технологічних властивостей і, насамперед, на міцнісні характеристики. Міцнісними характеристиками В.Я. Чертков [18] називає дві величини:

1. відношення середніх міцностей осколків заданого розміру в розвалі та окремої того ж розміру в масиві;
2. відношення середніх міцностей осколків підірваної гірничої маси (або окремої) двох різних розмірів (масштабний ефект). При цьому середня міцність осколків даного розміру в розвалі розуміється як результат послідовного усереднення (за локальним розподілом міцності осколків даного розміру; за просторовим розподілом осколків даного розміру в розвалі).

Якщо масив статистично однорідний за тріщинністю, середня міцність його окремої розуміється як результат тільки першого із зазначених усереднень. В.Я. Чертков зазначає, що вказані відносні міцнісні характеристики мають слабо залежати від виду випробувань на міцність.

Масштабний ефект $M^0(x)$ міцності окремої у масиві оцінюється відношенням середньої міцності для даного розміру x і середньої міцності для деякого обраного розміру x_0 :

$$M^0(x) = \frac{\sigma(x)}{\sigma(x_0)}$$

Масштабний ефект міцності осколків у розвалі оцінюється аналогічним відношенням із використанням середньої міцності:

$$M(x) = \frac{\sigma(x)}{\sigma(x_0)}$$

Відношення середніх міцностей осколків у розвалі та окремостей у масиві $R(x)$ визначається відношенням:

$$R(x) = \frac{\sigma(x)}{\sigma(x)}$$

Міцність осколків знижується за рахунок нових мікротріщин [19, 20]. Однак, як показують чисельні оцінки [18], для різних поєднань параметрів масиву та буровибухових робіт при деяких значеннях x середня міцність осколків у розвалі може виявитися вищою за середню міцність окремостей того ж розміру ($R(x) > 1$). Найбільш типово це для осколків малих розмірів ($x > 100$ мм). Найімовірніше, цей ефект має статистичну природу і пов'язаний зі зміною при вибуху самого розподілу осколків за міцністю.

Користуючись залежностями $M^0(x)$ та $R(x)$, можна оцінити середню міцність окремостей і осколків будь-якого розміру відповідно в масиві та розвалі, маючи у розпорядженні експериментально визначену середню міцність зразків (окремостей) із непошкодженого масиву.

При вибуху свердловинних зарядів поза зоною безпосереднього руйнування порід спостерігаються три різні типи порушень у масиві залежно від амплітуди хвиль або від відстані до заряду [21, 22].

У найбільш віддаленій зоні, де $v > v_1^{kp}$ (v - масова швидкість частинок у вибуховій хвилі, м/с; v_1^{kp} — перша критична швидкість), має місце формування невидимих мікропорушень, що призводять до зміни міцнісних, пружних і пластичних властивостей гірничих порід. У другій зоні при $v_1^{kp} > v > v_2^{kp}$, де v_2^{kp} - друга критична швидкість, крім генерації мікропорушень відбувається формування видимих, тонких (волосяних) тріщин. У третій зоні впливу вибухової хвилі з амплітудою $v > v_2^{kp}$ спостерігаються «вивали» окремих шматків, обвали.

Для зменшення ступеня знеміцнення гірничої породи в процесі вибуху необхідно досліджувати не тільки зниження цих характеристик з плином часу після вибухового впливу.

2. МЕТОДИ ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ ВИБУХОВОЇ ВІДБІЙКИ БЛОЧНОГО КАМЕНЮ

Україна посідає одне з провідних місць у світі за запасами сировини, придатної для виробництва декоративного каменю. На її території налічується близько трьохсот родовищ декоративного каменю. Річний видобуток блоків становить 150–160 тис. м³. В Україні працює близько 800 каменеобробних підприємств, які щорічно виготовляють продукцію з декоративного каменю. Для оцінки порушеності блока мікротріщинами на гранітних кар'єрах застосовують чотири способи:

- ультразвукове прозвучування випиляних із блока зразків;
- випробування зразків на міцність при стисканні або розтягуванні;
- візуальна оцінка зони тріщиноутворення методом кольорової дефектоскопії шляхом нанесення на поверхню блока фарбувального розчину з високою змочувальною здатністю;
- визначення виходу плит з 1 м³ блоків при їх розпилюванні на механічних верстатах.

В Україні найбільш поширені механічні, фізико-механічні, буровибуховий та комбіновані методи відокремлення блоків від масиву.

Відокремлення брил шаруватих, тріщинуватих, стовпчастих порід проводиться механічними засобами — клинами (з метою підвищення продуктивності праці клиновий пристрій може бути оснащений гідравлічним приводом). Гірничі породи середньої міцності (мармури та мармуризовані вапняки) видобувають шляхом розпилювання масиву каменю каменерізними машинами на блоки певних розмірів і форми. Як різальний орган каменерізної машини можуть бути використані кільцеві фрези, алмазно-канатний або баровий різальний інструмент [23].

Технологічний процес

Процес видобутку зазвичай складається з наступних етапів:

1. Підготовка горизонту: Вирівнювання робочого майданчика та прокладання рейкових шляхів для машин.

2. Нанесення сітки розпилювання: Розмітка майбутніх блоків відповідно до стандартних розмірів (наприклад, для подальшого виготовлення слябів або плитки).

3.Первинне відділення моноліту: Машина робить систему вертикальних і горизонтальних пропилів. Якщо використовується канатна пила, попередньо свердлять два перпендикулярні отвори, крізь які протягують канат.

4.Пасирування (розділення): Відокремлений великий моноліт розрізають на товарні блоки меншого розміру безпосередньо в кар'єрі.

5.Транспортування: Блоки підіймають кранами або навантажувачами для відправки на каменеобробні заводи.

При використанні механічного методу необхідно визначити міцність і тріщинуватість порід. Основний недолік перелічених методів — висока вартість обладнання та енергозатрат та потребують постійної подачі великої кількості води.

Відокремлення блоків від масиву можна здійснювати різними механічними методами [24-29]:

- за допомогою невибухової руйнуючої суміші (НРС) [30], яку розміщують у шпурах, пробурених у площині передбачуваного розколу;
- спрямованим розколом гірничих порід при заморожуванні рідини (води) у шпурі, наприклад, за допомогою рідкого азоту [31].

Вищеперелічені методи видобутку блочного каменю мають суттєві переваги — збереження каменю при видобутку та порівняльна безпека. Але існує і ряд недоліків: низька продуктивність, обмеження за міцнісними властивостями порід та кліматичними умовами. Ці проблеми можуть бути вирішені при використанні буровибухового методу. Однак великий обсяг бурових робіт, а також значні втрати сировини внаслідок знеміцнення породи стримують його широке застосування. Актуальною є проблема підвищення якості вибухової відбійки, тобто зменшення ступеня знеміцнення гірничої породи вздовж лінії розколу. Для усунення цих недоліків розроблено різні конструкції зарядів вибухових речовин, які дозволяють перерозподілити тиск продуктів детонації в шпурі так, щоб зменшити їхній вплив у напрямку розколу, а також способи, спрямовані на збереження міцності каменю після впливу на нього вибухом.

У гірничій справі називають контурним вибуханням (або методом ощадного підривання). Його головна мета — створити чітку площину розколу, мінімізуючи при цьому зону порушеності (тріщинуватості) в масиві, що залишається.

Для порід середньої міцності, як мармур чи вапняк, це критично важливо, оскільки надлишковий тиск продуктів детонації може перетворити цінний моноліт на купу щебеню.

Механізм перерозподілу тиску

Традиційний вибух діє радіально в усіх напрямках. Щоб спрямувати енергію саме вздовж лінії розколу, використовують такі підходи:

-Створення повітряного зазору: Заряд ВР займає не весь об'єм шпуру (свердловини). Між зарядом і стінками залишається повітряний або водяний прошарок. Це пом'якшує ударну хвилю, перетворюючи різкий "удар" на тривалий "тиск".

-Концентратори напружень: У шпурах роблять поздовжні надрізи (шліци) у напрямку бажаного розколу. Вибухові гази спрямовуються в ці мікротріщини, діючи за принципом клина.

Спеціальні конструкції зарядів

Для реалізації цього методу використовують специфічні типи зарядів:

-Гірляндні (розосереджені) заряди: Невеликі патрони вибухівки закріплюються на детонуючому шнурі на певній відстані один від одного. Це знижує концентрацію енергії в одній точці.

-Заряди з демпфуючими оболонками: Використання еластичних або пористих оболонок навколо ВР, які поглинають частину енергії початкового детонаційного імпульсу.

-Кумулятивні заряди: Мають спеціальну виїмку, яка формує струмінь газів у конкретному напрямку, "прорізаючи" породу між шпурами.

Ефективність методу залежить від точного розрахунку геометрії:

1. Буріння контурної мережі

На відміну від звичайної відбійки, де шпури бурять у шаховому порядку для кращого дроблення, тут використовується лінійне розташування.

-Шпури буряться строго паралельно один одному та площині майбутнього розколу.

-Відстань між ними (а) вибирається мінімальною, щоб зони напружень від сусідніх зарядів перетиналися саме на лінії розколу.

2. Формування розосередженого заряду

Це ключовий етап для збереження міцності каменю. Заряд не заповнює шпур повністю:

-Використовуються патрони меншого діаметра, ніж сам шпур. Наприклад, при діаметрі шпуру 76 мм використовують патрон 32 мм.

-Повітряний проміжок працює як демпфер: коли детонаційна хвиля б'є об стінки шпуру, вона вже втратила свою руйнівну "пікову" потужність, але зберегла достатньо тиску для розколу.

-Заряди фіксуються по центру шпуру за допомогою спеціальних пластикових фіксаторів або підвішуються на детонуючому шнурі.

3. Газодинамічний вплив та розкол

Коли відбувається детонація, процеси розвиваються за мілісекунди:

-Ударна хвиля: Завдяки повітряному зазору вона послаблюється і не створює зону радіальних тріщин навколо шпуру (зберігаючи монолітність).

-Розширення газів: Продукти вибуху заповнюють шпур і тиснуть на стінки. Оскільки шпури розташовані близько, напруження підсумовуються саме в площині між ними.

-Ефект клина: Гази вриваються в природні або штучно створені мікротріщини, діючи як велетенський гідравлічний клин, що акуратно відколює блок від масиву.

4. Роль забійки (закупорки)

Верхня частина шпуру обов'язково заповнюється інертним матеріалом (піском, відсівом або бетонними пробками). Це необхідно, щоб:

-Утримати гази всередині шпуру якомога довше.

-Спрямувати енергію в боки, а не вгору («виліт» газів через гирло шпуру робить вибух неефективним).

Фізико-математична логіка методу

Для того, щоб порода розкололася без розуміцнення, тиск у шпурі (P_w) має відповідати умові:

$$\sigma_{cm} > P_w > \sigma_p$$

де: σ_{cm} — границя міцності породи на стиск (щоб не розчавити стінки шпуру);

σ_p — границя міцності на розрив (щоб порода тріснула саме вздовж лінії).

Оскільки камінь (особливо мармур) значно гірше чинить опір розриву, ніж стиску, цей метод ідеально спрацьовує: ми даємо достатньо тиску, щоб розірвати зв'язки, але недостатньо, щоб розтрити структуру.

На невеликих кар'єрах знаходить застосування відбійка блоків за допомогою димного пороху [32, 33]. Поряд з певними недоліками (низька працездатність і вологостійкість, висока чутливість до механічних впливів), він дозволяє отримати блоки з низькою наведеною тріщинністю. Також науково-виробничим колективом "Контех" розроблено новий засіб видобутку кам'яних блоків, що об'єднує позитивні якості механічних і вибухових методів видобутку блочної сировини: збереження міцнісних властивостей каменю, висока продуктивність, легкість розбирання відколотої гірничої маси, безпека зберігання та застосування.

Відомі патенти [34, 35], в яких пропонується комбінований метод видобутку штучного каменю — спрямований гідророзрив. Початкова тріщина утворюється вибухом спеціального кумулятивного заряду, орієнтованого вздовж лінії розколу. Після вибуху кумулятивного заряду проводиться нагнітання рідини в порожнину та розвиток поверхні руйнування.

Цей метод є вершиною інженерної думки у видобутку декоративного каменю, оскільки він поєднує швидкість вибухового впливу з делікатністю гідравлічного тиску. Його часто називають спрямованим гідророзривом із попередньою ініціацією.

Основна ідея — повністю виключити хаотичне розтріскування масиву, підмінивши вибухове руйнування керованим «розклинюванням» рідиною. Комбінований метод «спрямований кумулятивний вибух + гідророзрив» — це технологія, що дозволяє керувати процесом руйнування гірської породи на мікрорівні. Якщо звичайний вибух — це «кувалда», то цей метод — «хірургічний скальпель».

Розглянемо детально кожен аспект цієї технології: від фізики процесу до технічної реалізації.

1. Фізика спрямованої концентрації напружень

Головна проблема звичайного підривання шнура полягає в тому, що тріщини розходяться радіально (в усі боки), руйнуючи цінний камінь навколо.

У комбінованому методі ми спочатку створюємо «дефект-провідник». Кумулятивний заряд при детонації формує надтонкий струмінь газів та розплавленого металу (облицювання), що рухається зі швидкістю понад 7-9 км/с. Цей струмінь прошиває породу на глибину кількох сантиметрів точно в площині розколу.

Створюється надріз із дуже гострою вершиною.

Згідно з законами механіки руйнування, саме на гострому кінці тріщини виникає колосальна концентрація напружень. Це знижує необхідний тиск для подальшого розриву в 3–5 разів порівняно з цільним масивом.

На підставі вищевикладеного можна зробити висновок про найбільш раціональне застосування буровибухового методу при видобутку блочного каменю. Однак для поліпшення якості відбитої поверхні необхідно використовувати спеціальні ВР, конструкції зарядів, що сприяють розколу моноліту в потрібному напрямку, при зниженні наведеної тріщинності у відбитих блоках.

Для вибухової відбійки блочного каменю А.З. Яшкін пропонує використовувати заряди зниженої бризантності, що досягається введенням до складу ВР добавок-розущільнювачів, включенням у конструкцію заряду спеціальних елементів у вигляді порожнин (повітряних або заповнених інертним матеріалом), зменшенням діаметра заряду. Бризантність прямо залежить від швидкості детонації. Для граніту чи мармуру стандартні ВР (наприклад, амоніт) мають $V_d \approx 4000 - 5000 \text{ м/с}$. Це створює ударну хвилю, що перевищує межу міцності каменю на стиск у десятки разів. Використання добавок (перліт, деревна тирса) знижує до $V_d \approx 2000 - 2500 \text{ м/с}$. Результаті чого замість різкого удару, який «кришить» породу, виникає квазістатичний тиск газів, який «розштовхує» масив за природними або штучно створеними напрямками. В звичайному вибуху 90% енергії йде на подрібнення і сейсміку, а 10% — на відбійку. За методом Яшкіна: До 40–50% енергії спрямовується саме на утворення магістральної тріщини та відокремлення блоку. Цей підхід дозволяє працювати навіть з «капризними» породами, такими як лабрадорит або кольорові граніти, де будь-яка внутрішня тріщина миттєво знецінює блок.

Заряди ударно-спрямованої дії та заряди з кумулятивною виїмкою належать до зарядів спрямованої дії [36-38]. При відколі кам'яного блоку від масиву відносно хороший стан поверхонь блоку забезпечують заряди з поздовжньою кумулятивною виїмкою. Найчастіше на кар'єрах застосовують осьову кумуляцію, при якій напрямок кумулятивного струменя збігається з віссю заряду. Але відомі експерименти і з кільцевою кумуляцією, коли кумулятивні виїмки виконані кільцеподібно за довжиною заряду.

Використання кумулятивних виїмок дозволяє сконцентрувати енергію вибуху у вузькому секторі, що створює ефект «вибухового ножа».

1. Поздовжня кумулятивна виїмка (Linear Shaped Charges)

Це найбільш затребуваний метод для отримання рівних поверхонь блоку. Заряд має одну або дві виїмки, що йдуть вздовж усієї його довжини.

Принцип дії: При детонації кумулятивний струмінь б'є перпендикулярно до осі шпуру, прорізаючи в камені чітку «направляючу» тріщину. В результаті тріщина між сусідніми шпурами поширюється суворо в заданій площині. Стан поверхні блоку після такого розколу наближається до результатів канатного пиляння.

Яку застосовують для відокремлення монолітів від масиву та первинна пасировка (розбиття моноліту на товарні блоки).

2. Осьова кумуляція (Axial Cumulation)

Тут кумулятивна виїмка розташована в торці заряду, а струмінь спрямований вздовж його осі (на дно шпуру). Вона рідше використовується для формування площини розколу, оскільки діє точково. Найчастіше — для «прошивання» породи, поглиблення шпурів або створення ініціюючого імпульсу в складних точках масиву. У блочному видобутку це допомагає «підрізати» підшву уступу, якщо там є затиснення породи.

3. Кільцева кумуляція (Radial/Annular Cumulation)

Це більш експериментальний і складний підхід, де виїмки оперізують заряд по колу. Вибухова хвиля розходить «диском» від осі заряду. Спроба створити рівномірний розкол у всіх напрямках радіально. Проте для видобутку прямокутних блоків цей метод є менш ефективним, ніж поздовжній, оскільки він провокує розтріскування в площинах, які нам не потрібні.

Відмінна особливість вибуху заряду ударно-спрямованої дії — його двоступеневий вплив у заданому напрямку: спочатку посиленою ударною хвилею проводиться надкол стінки шпуру в потрібному напрямку, а потім — поглиблення зони руйнування в зазначеному напрямку газоподібними продуктами вибуху.

Ефект послабленої бризантної дії в потрібному напрямку може бути досягнутий шляхом застосування демпфуючих прокладок, влаштування повітряних зазорів різної форми тощо. Такі заряди називають зарядами спрямовано-послабленої бризантності. Демпфуючий елемент послаблює дію ударної хвилі та газоподібних продуктів детонації (ПД) у певному напрямку.

А.Л. Ісаков у статті [39] запропонував класифікацію способів спрямованого руйнування гірничих порід. Запропонована класифікація

включає відомі на даний час принципові можливості завдання переважних напрямків руйнування гірничих порід при вибуху одиничного свердловинного або шпурового заряду ВР. Умовно всі способи спрямованого руйнування можна розбити на три основні класи: з механічним послабленням контурної зони шпуру або свердловини (попереднім або одночасним із вибухом) і без механічного послаблення контурної зони шпуру або свердловини. До першого класу відносять способи, пов'язані з попереднім (до вибуху) послабленням контурної зони свердловини шляхом створення в ній концентраторів напружень. Одним із найбільш ефективних варіантів створення концентраторів є нанесення на стінки свердловини по всій довжині насічок трикутної форми. Недоліком цього способу є відсутність прийнятних технічних засобів, що дозволяють отримувати насічки в промислових умовах.

Другий клас об'єднує способи, при яких концентратори напружень у контурній зоні свердловини утворюються одночасно з вибухом основного заряду ВР (за допомогою кумулятивної дії продуктів детонації або концентрації ударних хвиль при використанні зарядів ВР спеціальних конструкцій; шляхом впливу детонаційних хвиль на стінки свердловини в місцях торкання їх зарядом ВР; за допомогою передачі вибухового навантаження на стінки свердловини через проміжні елементи з високою акустичною жорсткістю).

Третій клас охоплює способи, що не потребують ні попереднього, ні одночасного з вибухом послаблення контурної зони свердловини. Одним із найпростіших пристосувань при відбійці штучного каменю є вставлена в шпур жорстка труба з поздовжніми розрізами. При прикладанні рівномірно розподіленого навантаження до внутрішніх стінок такої труби на контурі шпуру біля прорізів виникають концентрації розтягуючих напружень, які й призводять до появи радіальних тріщин у намічених місцях раніше, ніж вони з'являться в іншому місці. Однак у реальних умовах між стінками шпуру та поверхнею вставлених у нього труб завжди є певний зазор, величина якого залежить від конкретних умов буровибухових робіт. Наявність такого зазору, як показали експерименти, найсуттєвішим чином впливає на якість спрямованого тріщиноутворення. Це пояснюється тим, що стінки труби, які отримують у момент вибуху величезне прискорення, маючи місце для розгону, завдають високошвидкісного удару по стінці шпуру, що призводить до руйнування всієї приконтурної зони шпуру вже на початковій (хвильовій) стадії вибуху. В таких умовах

ріст спочатку запланованих тріщин різко зменшується, що обумовлює зниження ефективності всього процесу. Крім того, область можливого застосування цієї конструкції заряду обмежена складнощами щодо розміщення зі строгою орієнтацією труб з прорізами в шпурах середньої та великої довжини.

Ісаковим А.Л. був запропонований спосіб спрямованого руйнування гірничих порід вибухом [39], суть якого полягає в наступному. У пробуреній свердловині по всій її довжині утворюють міцну оболонку з поздовжніми щілинними вирізами, що має щільний контакт зі стінками свердловини. Кількість і розташування вирізів обирають відповідно до кількості та напрямків проєктованих площин руйнувань. Вибух подовженого заряду, розміщеного всередині такої оболонки, забезпечував задане руйнування навколишнього масиву радіальними тріщинами, що виникали при цьому. Головним недоліком цього способу є неконтрольоване знеміцнення матеріалу поблизу шпуру (не запропонована демпфуюча прокладка для зниження знеміцнення каменю поза лінією розколу).

Таким чином, існує безліч варіантів конструкцій зарядів ВР для вибухової відбійки блочного каменю, кожен з яких має свої переваги та недоліки. Однак, вивчивши та проаналізувавши наявні літературні джерела, можна зазначити, що ще не знайдено оптимальних варіантів конструкцій зарядів і способів ведення вибухових робіт для відбійки блочного каменю, які б дозволяли проводити видобуток якісних окремоостей при низьких матеріальних і трудових витратах.

Авторами [40] розроблено заряди спеціальної конструкції для відокремлення моноліту від масиву, розбирання монолітів на блоки та пасирування блоків, що отримали назву «заряди м'якого висадження» — ЗМВ [41]. З проведених ними досліджень випливає, що при збільшенні відстані між зарядами з 0,5 до 1 м мережа радіальних тріщин навколо зарядів збільшується у 3,5 раза [42].

Створити орієнтоване поле напружень на початковому етапі тріщиноутворення дозволяє застосування еліптичних шпурів, велика вісь яких розташована в площині розколу. В таких шпурах навантаження, необхідне для поширення тріщини, в 1,7 раза менше порівняно з навантаженням, створеним шпурами круглого поперечного перерізу.

Відомо, що в умовах крихкого руйнування зародження тріщини на контурі шпуру відбувається в місцях концентрації мікро- і макротріщин або будь-яких дефектів у структурі гірничої породи при перевищенні

межі її міцності створеними напруженнями. Будь-який штучний дефект, наприклад, надріз трикутної форми на стінці шпуру, стане додатковим місцем концентрації напружень. Поле розтягуючих напружень навколо шпуру з надрізами набуває форми еліпса, велика вісь якого проходить через вершини надрізів, що дозволяє його орієнтувати в бажаному напрямку, наприклад, по лінії блоку [42].

Роботи з використання шпурів з профільними надрізами при руйнуванні гірничих порід і зі створення інструменту для буріння таких шпурів проведені наприкінці 1970-х років у ВНДІ транспортного будівництва Мінтрансбуку СРСР. При цьому розроблені основні технологічні прийоми при використанні профільних шпурів та обґрунтовані базові параметри інструменту. Встановлено, що оптимальною є трикутна форма надрізу з кутом при вершині 90° , а найбільше зниження енергоємності руйнування досягається при відношенні глибини надрізу h до діаметра шпуру d_{un} , що дорівнює:

$$\frac{h}{d_{un}}=0,2-0,3$$

Профільні надрізи на стінках шпурів можна формувати або одночасно з бурінням шпуру, або в раніше пробурених шпурах. Стеновими випробуваннями було встановлено, що при бурінні перфоратором ПР-25 шпурів діаметром 42 мм з одночасним виконанням надрізів глибиною 4 мм у граніті Токівського родовища швидкість буріння знижується до 20%. При бурінні гідроперфоратором НЛ-438 («Тамрок») шпурів того ж діаметра з надрізами глибиною 4–5 мм у скельному масиві (міцність 72–130 МПа) швидкість буріння знизилася лише на 11% (0,63 м/хв) проти 0,71 м/хв при бурінні без надрізів. Швидкість виконання ручним перфоратором надрізів у пробурених шпурах становить близько 2 м/хв [44].

Виходячи з основної вимоги до блоків із природного каменю, а саме необхідності отримання товарної продукції з міцнісними характеристиками, властивими неторканому масиву, великого значення поряд із вибором способу висадження набуває і конструкція заряду, що особливо важливо у разі використання бризантних вибухових речовин [45].

3. ВПЛИВ ВИБУХОВОГО ВПЛИВУ НА МІЦНІСНІ ВЛАСТИВОСТІ ГІРНИЧИХ ПОРІД

Дія вибуху проявляється не тільки в дробленні та руйнуванні гірничих порід поблизу заряду [46], а й у виникненні області знеміцнення, обумовленої розвитком мікропорушень. Зміна властивостей гірничих порід за межами зони вибухового дроблення описується в ряді робіт [17, 47, 48]. Відзначається зміна властивостей середовища і зменшення швидкості поширення поздовжніх хвиль у міру наближення до центру вибуху.

Область, у якій після вибуху відбуваються незворотні зміни, вивчалася Є.І. Шемякіним як зона пружно-пластичних деформацій [49]. У роботах В.Н. Родіонова ця область названа зоною залишкових напружень [50, 51].

Проведені на зразках пісковика, мармуру і граніту експериментальні дослідження знеміцнюючої дії вибуху [42-55] показали, що розміри зони передруйнування досягають 200 радіусів заряду. Радіус цієї зони визначався як координата точки, в якій зменшення швидкості поширення поздовжніх хвиль не перевищує 5%. У ході експериментальних досліджень виявлено залежність ефекту вибухового передруйнування від вихідного стану середовища, характеристикою якого є швидкість поширення поздовжніх хвиль у середовищі до вибухового впливу. Виділено три якісні особливості поведінки породи після вибухового впливу:

1. зростання швидкості поздовжніх хвиль у породі з віддаленням від центру вибуху;
2. кореляція змін швидкості поздовжніх хвиль у зразках пісковика зі зміною концентрації зерен кварцу з грануляційною мозаїчністю;
3. зростання швидкості поздовжніх хвиль у породі з плином часу, що свідчить про те, що в зоні вибухового передруйнування відбуваються зміни структури, які мають оборотний характер. Швидкість «самозагоєння» зразків залежить від ступеня порушеності породи.

При визначенні швидкості поздовжніх хвиль застосовували метод наскрізного ультразвукового прозвучування зразків. Зміна стану породи після вибуху оцінювалася за відносною зміною швидкості поширення поздовжніх хвиль.

Дослідження мікроструктури пісковиків після вибуху проводилися на шліфах за допомогою поляризаційного мікроскопа. В результаті петрографічних досліджень встановлено, що після вибухового впливу мікропористість досліджуваних пісковиків змінювалася в межах від 3 до 18%. Встановлено також лінійну залежність швидкості поздовжніх хвиль від мікропористості.

Для оцінки вибухового знеміцнення порід на різній відстані від заряду (R) в роботі [56] пропонується використовувати показник структурного ослаблення $\lambda(R)$. За ступенем і характером порушень при вибуху в гірничих породах виділяються зона руйнувань $\lambda(R)=1$, зона передруйнування $0 < \lambda(R) < 1$ та пружна зона $\lambda(R)=0$. Для радіуса зони передруйнування умова руйнування за граничним розтягуючим напруженням замінюється умовою рівноваги мікротріщин. Розвиток мікротріщин відбувається, якщо напруження на фронті вибухової хвилі $\sigma(R)$ в даній точці перевищують певний пороговий рівень [57]:

$$\sigma(R) \geq \sigma_n \approx \frac{\frac{\sqrt{\pi}}{2} * K_{IC}}{\sqrt{l_0}}$$

де K_{IC} — модуль зчеплення, Па * м^{1/2};

σ_n — порогове напруження росту дефектів, Па;

l_0 — характерний розмір структурних дефектів породи, м.

Якщо припустити, що при виконанні цієї умови відбувається ріст розмірів мікротріщин із середньою швидкістю v_{cp} , рівною [58]:

$$v_{cp} = \frac{\sigma(R) - \sigma_n}{4\eta} * l_0$$

де η — в'язкість породи, то це дає можливість оцінити зміну розміру за час дії вибухового імпульсу Δt . Зміна розміру мікротріщин за час дії вибухового імпульсу Δt буде дорівнювати .

Завдання встановлення закономірностей впливу буровибухових робіт на зниження міцності порід вирішувалося також Г.М. Крюковим та іншими авторами [21, 59-61].

При вибуху свердловинних зарядів за зоною безпосереднього дроблення в зоні неруйнівної дії вибуху автори [21] спостерігали три різні типи порушень у масиві залежно від відстані від заряду. У найбільш віддаленій зоні спостерігалось формування невидимих мікропорушень, що призводять до зниження міцнісних, пружних і пластичних властивостей гірничих порід. У другій зоні, розташованій ближче до заряду, крім генерації мікропорушень відбувається формування видимих тонких (волосяних) тріщин. У третій зоні, розташованій за зоною дроблення, спостерігаються "вивали" окремих шматків.

Вивченню знеміцнювальної дії вибуху присвячено ряд робіт С.А. Гончарова та ін. [62-64], в яких досліджували зміни мікроструктури та міцнісних властивостей шматків породи, зруйнованої в зоні дроблення. При цьому передбачається, що зниження міцності шматків породи після вибухового впливу відбувається в результаті накопичення і розвитку дефектів у зонах зростання мінералів.

Зниження міцності зразків, встановлене за тимчасовим опором одноосьовому стисканню, склало 25–45% від міцності в природному стані, визначеної на зразках, що не піддавалися вибуховим навантаженням. Максимальне зниження міцності відповідало найбільшому за тривалістю вибуховому навантаженню.

Знеміцнювальній дії вибуху присвячено ряд робіт П.А. Кочеткова [65-69]. На основі експериментальних досліджень закономірностей зміни властивостей порід під дією вибухового навантаження, проведених на блоках руди, ним запропонована модель багаторівневого руйнування масиву скельних порід вибухом свердловинних зарядів. Він вважає, що руйнування гірничих порід вибухом відбувається на трьох основних рівнях:

1. на рівні мінеральних зерен і визначається процесами накопичення мікродефектів та утворення макротріщин;
2. на рівні структурних блоків і характеризується процесом дроблення шляхом розвитку магістральних тріщин та розуцільнення за природними тріщинами;
3. на рівні уступу і визначається руйнуванням масиву гірничих порід шляхом зсуву за тріщинами та розривами.

Зв'язок середньої концентрації мікротріщин у скельній породі з напруженнями при вибуху подовженого заряду обговорюється в роботах В.Я. Черткова і ґрунтується на кінетичних уявленнях про утворення накопичень і злиття мікротріщин [11, 17, 18]. Початкова

стадія цього процесу пов'язана з ростом і концентрацією мікротріщин. Перехід до їхнього злиття з утворенням більших тріщин має локальний і ймовірнісний характер. Тому при заданому напруженому стані та режимі навантаження середня концентрація мікротріщин, при якій починається перехід до макротріщин, буває різною. Середня концентрація мікротріщин є статистичним параметром ймовірнісного процесу переходу від мікро- до макротріщинності, що залежить від часу.

Останнім часом при розгляді процесів знеміцнення при вибуху розвивається новий підхід, який полягає у використанні результатів досліджень рівня енергонасиченості різних зон відбиваної частини масиву для обґрунтування раціональних параметрів розташування основних і додаткових зарядів ВР при проектуванні масових вибухів у кар'єрах. У своїй роботі Пеєва Н.Е. [70-74] досліджує процеси знеміцнювальної та руйнівної дії вибуху в твердих середовищах, залишкову міцність гірничих порід при неруйнівному вибуховому та механічному впливах; інтенсивність і рівномірність дроблення моделей і масивів гірничих порід залежно від параметрів розташування додаткових і основних зарядів ВР. Мислицький С.М. описує процеси руйнування вибухом зразків і масивів гірничих порід блочної та шаруватої будови, напружено-деформований стан шаруватих і тріщинуватих середовищ при вибуху [75-77]. Він експериментально визначає залишкову міцність зразків, що піддавалися неруйнівним імпульсним впливам, яка дозволяє без принципових труднощів оцінювати коефіцієнт передачі енергії удару та вибуху в масив гірничих порід. Оцінка коефіцієнта передачі загальної енергії заряду показує, що енергетичні витрати на зіткнення окремих частин блочних моделей гірничих порід не перевищують 0,5%, а втрати енергії хвилі напружень навіть при переході через щільно зімкнуту тріщину можуть досягати 50%.

Порівняно з механічним дробленням і подрібненням руйнування при вибуху характеризується на порядок більшою часткою енергії, що витрачається на розуміцнення породи. Вибухове руйнування відбувається за рахунок розвитку довгих тріщин під дією розтягуючих напружень і розклинювальної дії газів вибуху. Місця виникнення тріщин не випадкові. Вони, як правило, беруть початок від макродефектів у структурі породи. Крім того, при вибуховому впливі відбувається зародження тріщин, які надалі не розвиваються, але впливають на міцність одержуваної сировини.

У світлі вищевикладеного, на наш погляд, найбільш перспективним напрямком є руйнування за допомогою НРС.

4. ОПИС ЗАПРОПОНОВАНОГО СПОСОБУ НЕВИБУХОВОГО РУЙНУВАННЯ ПОРІД

4.1 Опис технології робіт.

При реалізації запропонованого способу роботу починають із буріння шпурів 1 для розміщення невибухової руйнівної суміші 2 (див. рис. 2.1), яке здійснюють із боку найбільшої відкритої поверхні об'єкта 3, як правило, вертикально вниз. Кут нахилу шпурів у вертикальній площині може змінюватися в діапазоні 65–80°, при цьому він залежить від потужності негабариту і визначається з міркувань забезпечення мінімальної корисної довжини шпуру 0,5 м.

Шпури бурять рядами у площині передбачуваного розколу. Можливий діаметр шпурів — від 20 до 50 мм, рекомендований — 43 мм. Пробурені шпури очищають від пилу та бурового дріб'язку продувкою.

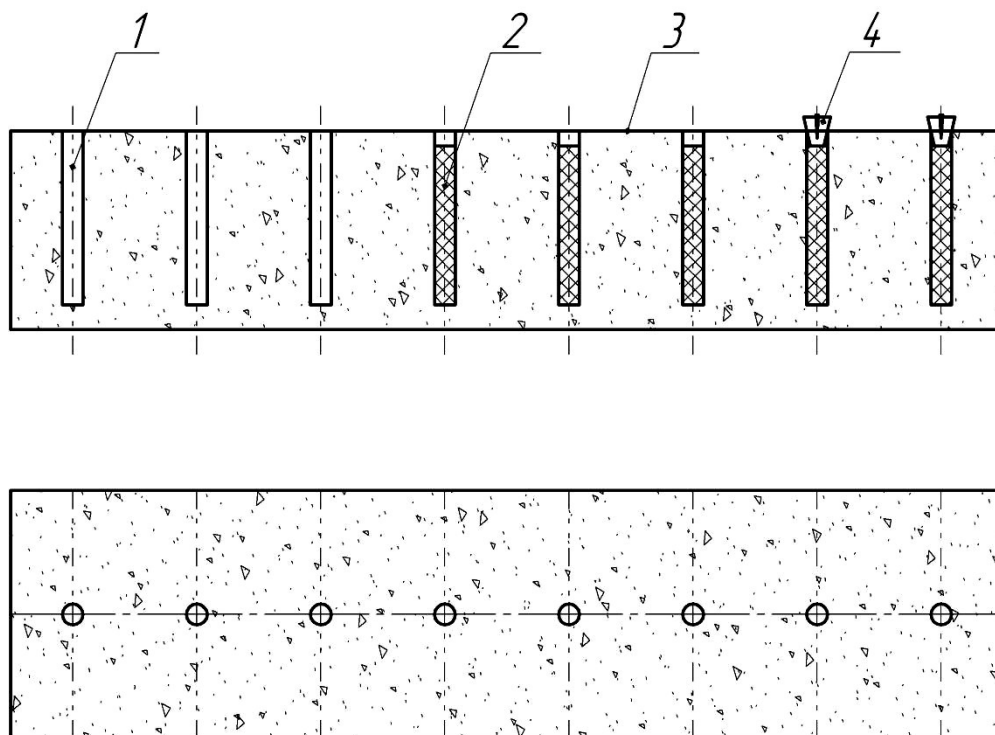


Рисунок 4.1 – Принципова схема способу невибухового руйнування негабаритних блоків

Після цього у пробурені шпури заливають приготований розчин невибухової руйнівної суміші (НРС) на глибину, що дорівнює 0,9 довжини шпуру. Потім гирлова частина шпуру герметизується глиняною забойкою. Крім того, як герметизатор гирлової частини

шпуру встановлюються дерев'яні клини 4. У такому разі після встановлення клинів зверху на об'єкт, що руйнується, укладається настил із дощок або відрізків конвейерної стрічки для запобігання вильоту клина зі шпуру при його неякісному встановленні.

Внаслідок перебігу реакції гідратації розчин НРС збільшується в об'ємі та чинить тиск на стінки шпуру, що призводить до руйнування порід по площині розколу, створеній рядами шпурів з НРС.

Руйнування негабариту відбувається протягом 3–8 годин. Після відколювання блоку порід площини його розколу змочуються водою для запобігання утворенню пилової хмари, оскільки матеріал є таким, що пилить.

4.2 Загальні відомості про невибухові руйнівні склади.

Невибухові руйнівні суміші (НРС) протягом останніх 30 років знайшли широке застосування у світовій практиці. За цей час було розроблено понад 60 невибухових руйнівних композицій. Здебільшого ці композиції застосовуються у будівництві під час ліквідації несучих елементів, конструкцій і фундаментів будівель, споруд, промислових та житлових об'єктів в умовах, коли використання традиційних вибухових матеріалів неможливе або заборонене вимогами правил безпеки. Також є досвід застосування зазначених матеріалів при видобутку та обробці блоків цінних гірських порід; у цьому випадку використання НРС за рахунок відсутності динамічного ефекту при руйнуванні дозволяє підвищити якість обробки матеріалів, що видобуваються, і знизити кількість відходів.

Перші згадки про руйнівні суміші на основі оксиду кальцію в зарубіжній літературі належать до 1981–1982 років, у вітчизняній літературі — до 1984–1985 років.

Найбільшу кількість НРС розроблено в Японії, найвідомішими є матеріали японських компаній Онода Сімент Ко ЛТД (Брістар), Сумітомо Сімент Ко ЛТД (С-Майт), Ніппон Сімент Ко (Хемібрекер); більш доступними аналогами є матеріал НРС-1, що випускається в Росії, та НРВ-80, який випускається вітчизняною промисловістю.

Як правило, невибухові руйнівні склади (НРС) являють собою порошок, який при взаємодії з водою твердне зі збільшенням об'єму; при опорі саморозширенню матеріалу він здатний розвивати високий тиск.

Як основний реагент НРС застосовується оксид кальцію. При цьому використовується відома властивість збільшення об'єму продуктів оксиду кальцію при його взаємодії з водою. Для отримання вказаного ефекту потрібне термічно стабілізоване вапно, отримання якого потребує або підвищених (понад 1300°C) температур при випалюванні, або введення до складу вапняку, що випалюється, стабілізуючих добавок.

Як компоненти, що підвищують тиск розширення вапна, застосовують алюмоферитні, силікатні та сульфатні сполуки; для поліпшення експлуатаційних властивостей додають пластифікатори, прискорювачі або сповільнювачі твердіння. Попри відмінності в технології приготування та застосуванні різних добавок, основні властивості всіх саморозширюваних композицій подібні, що пояснюється однаковою хімічною реакцією основного складника — оксиду кальцію з водою.

Основні характеристики деяких доступних на ринку України НРС наведено в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 Основні характеристики деяких НРС.

№	Тип НРС	Країна виробник	Час дії, год	Водопотребність, %	Рекомендований діапазон температур °C	Тиск що розвивається, МПа
1	НРВ-80	Україна	24-72	30	-10...+35	Не менш 80
2	НРС-1	Росія	24-72	28-32	+2...+25	Не менш 30
3	Брістар В-100	Японія	24-96	30	+15...+25	30
4	Брістар В-200	Японія	24-96	30	+5...+15	30
5	Webac Divicret	Німеччина	12-24	29-35	+15...+20	90

У міру вдосконалення саморозширюваних складів зростає тиск, що розвивається останніми за рахунок самонапруження. Аналіз

літератури дозволяє зробити висновок, що за 30 років застосування невибухових руйнівних матеріалів тиск, який розвивається при їхньому саморозширенні, зріс більш ніж у 3 рази, при цьому досягнуто помітної стабілізації властивостей останніх. Так, тиск саморозширення, що розвивається вітчизняним складом НРВ-80 при температурі навколишнього середовища 25–35°C через 24 години після замішування, досягає 153 МПа.

Оскільки склади застосовуваних НРС в основі своїй мають одну й ту саму речовину — оксид кальцію, наведемо тут для прикладу приготування робочої суміші однієї з типових НРС-речовин — НРВ-80, що випускається вітчизняною промисловістю України.

Згідно з ТУ на НРВ-80 матеріал готують безпосередньо на місці ведення робіт. Робоча суміш готується шляхом додавання у воду сухого порошку НРС при постійному перемішуванні з додаванням пластифікатора СП-6. Масові частки компонентів В:НРВ-80:СП-6 становлять 0,25:0,73:0,02. Витрата матеріалу на 1 м.п. шпуру діаметром 43 мм становить близько 2,2 кг. Приготовлену порцію розчину слід залити в шпури протягом 20 хв після замішування порошку водою.

Приклад приготування матеріалу з 6 кг порошку:

У ємність об'ємом 10–12 л влити 2,0 л води, до якої додати ретельно перемішаний пластифікатор СП-6 у кількості 100–240 мл, після чого отриману суміш перемішати. У готовий розчин при постійному перемішуванні малими порціями засипати 6 кг порошку НРВ-80. Рекомендована температура води для замішування має становити від 10°C до 20°C. При необхідності приготування іншої кількості суміші, кількість компонентів змінюється у відповідній пропорції.

4.3 Характеристика умов і місця випробування.

Перевірка запропонованого способу руйнування з розрахованими параметрами ведення бурових робіт проводилася на кар'єрі Хлібодарівського рудоуправління, що здійснює видобуток граніту. Корисними копалинами родовища є інтрузивні кристалічні породи, представлені гранітоїдами (граніт порфіроподібний, граніт лужний, апліт рожевий), серед яких зустрічаються дайки лампрофіру.

Усі проби свіжих гранітоїдів за морозостійкістю відповідають вимогам ВСВ-60-61 для виготовлення цільноблокових шпал, колійного та будівельного щебеню, а також бутового каменю.

Межа міцності на стиск у водонасиченому стані за 8 пробами розвідки становить 528–984 / середнє — 797 кг/см², а за 43 пробами розвідки вона становить 508–1136 кг/см², середнє — 818,59 кг/см². Як видно, середні результати випробувань різних періодів не мають значних розбіжностей і лежать нижче 1200 кг/см². Це свідчить про те, що гранітоїди за цим видом випробувань не відповідають вимогам ВСВ-60-61, але відповідають вимогам ТУ-159-53 за ГОСТом 8267.56.

Було проведено додаткові випробування гірської породи — щебеню (готової продукції), відбраного з навантажувальних бункерів фракцій 7–25, 25–40 та 40–70 мм, які випробувані на вміст пилоподібних, мулистих і глинистих часток, зерен пластинчастої та голчастої форми, зерен слабких порід, а також подрібнюваності при стиску в циліндрі. Результати випробувань наведено в таблиці 4.2

Таблиця 4.2 Результати випробувань

Показник	Номер проби							
	2	3	4	5	6	7	8	9
Об'ємна вага	29	2,6	2,85	2,69	4 3	2,6	3	2,72
Питома вага	29	2,6 6	2,89	2,74	2 9	2,64	2,04	2,78
Пористість	29	0,4	4,6	1,5	2 9	0,69	6,6	2,2
Водопоглинання	51	0,1	0,5	0,2	5 0	0,08	1,18	0,21
Опірність щебеню удару на копрі	51	50	168	58				
Зношуваність у барабані Деваля					4 5	2	6,1	4,18

Стійкість у NO ₂ SO ₄ (втрата ваги у %%)					4 2	0,08	3,6	0,71
Границя міцності на стиск, кг/см ²								
-у повітряно- сухому стані	8	580	109 8	881	4 3	580, 8	1634, 2	907,8 9
-у водонасиченому стані	8	528	984	797	4 3	508	1196, 8	818,5 9
'-після випробування на стійкість					4 3	500, 6	1278, 4	818,5 9
'-після 100 циклів заморожування	4	526	862	704				
'-після 50 циклів заморожування	8	443	952	781				
Коефіцієнт розм'якшення	8	0,8 8	0,98	0,94	4 3	0,7	1,13	0,91
Морозостійкість (кількість циклів)	12	50	100	Витри м				
Коефіцієнт морозостійкості	12	0,8 2	0,98	0,89				

5. РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ ЗАПРОПОНОВАНОГО СПОСОБУ НЕВИБУХОВОГО РУЙНУВАННЯ НЕГАБАРИТУ.

5.1. Фізичне обґрунтування запропонованого способу

Оскільки температура об'єкта, що руйнується, при дії невибухових руйнівних матеріалів підвищується незначно (не досягає 400–600 К), а час прикладання руйнівного навантаження відносно невеликий, вирішення задачі про руйнування гірських порід за допомогою невибухових руйнівних речовин, на наш погляд, найбільш коректно проводити, використовуючи енергетичний критерій.

На сьогодні теорія Гріффітса–Ірвіна є основою для всіх розрахунків на тріщиностійкість в інженерній справі; вона досить задовільно узгоджується з даними практики в умовах квазістатичного навантаження. Користуючись зазначеною теорією, отримано формулу для розрахунку відстані між шпурами в ряду та між рядами шпурів.

Протяжність тріщини залежить від діаметра шпуру, модуля пружності НРС та параметрів гірської породи $E_m, k_k P(t^{\dot{c}})$:

$$L_{mp} = \frac{P^2(t^{\dot{c}}) r_0^2 E_m}{2(k_k)^2 E_{НРС}} \quad (5.1)$$

де: 2 — чисельний коефіцієнт перетворень енергетичного критерію Гріффітса;

- $P(t^{\dot{c}})$ - напруження сталого розвитку тріщин, що створюється НРСу (невибуховою руйнівною сумішшю) всередині шпуру, МПа;

- r_0^2 - радіус шпура, м

- E_m - модуль пружності матеріалу що руйнується, МПа,

- $E_{НРС}$ - модуль пружності НРС, МПа,

- k_k - коефіцієнт інтенсивності напружень матеріалу, що руйнується, МПа($\sqrt{м}$),

Розрахунок відстані між шпурами виконують у такій послідовності:

- $P(t^{\dot{c}})$ - приймається рівною тиску розширення через заданий час руйнування об'єкта (рис. 4).

- $E_{НРС}$ - беремо рівним 10^4 МПа,

Вираз (5.1) дозволяє розрахувати відстань між шпурами (паспорт бурових робіт).

Розроблено методику та стенд для отримання робочих характеристик НРС $P(t)$. Стенд являє собою жорсткий «недеформівний» циліндр, у який заливають приготувану робочу

суміш, розширення якої під час затвердіння висуває поршень, рух якого реєструється індикатором годинникового типу та динамометром. За пружною деформацією та тарувальною кривою динамометра визначають зусилля, що створюється сумішшю під час затвердіння.

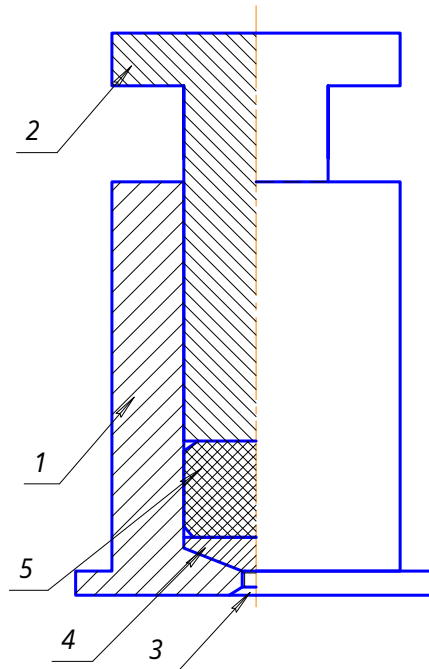


Рисунок 5.1 – Стенд для проведення випробувань

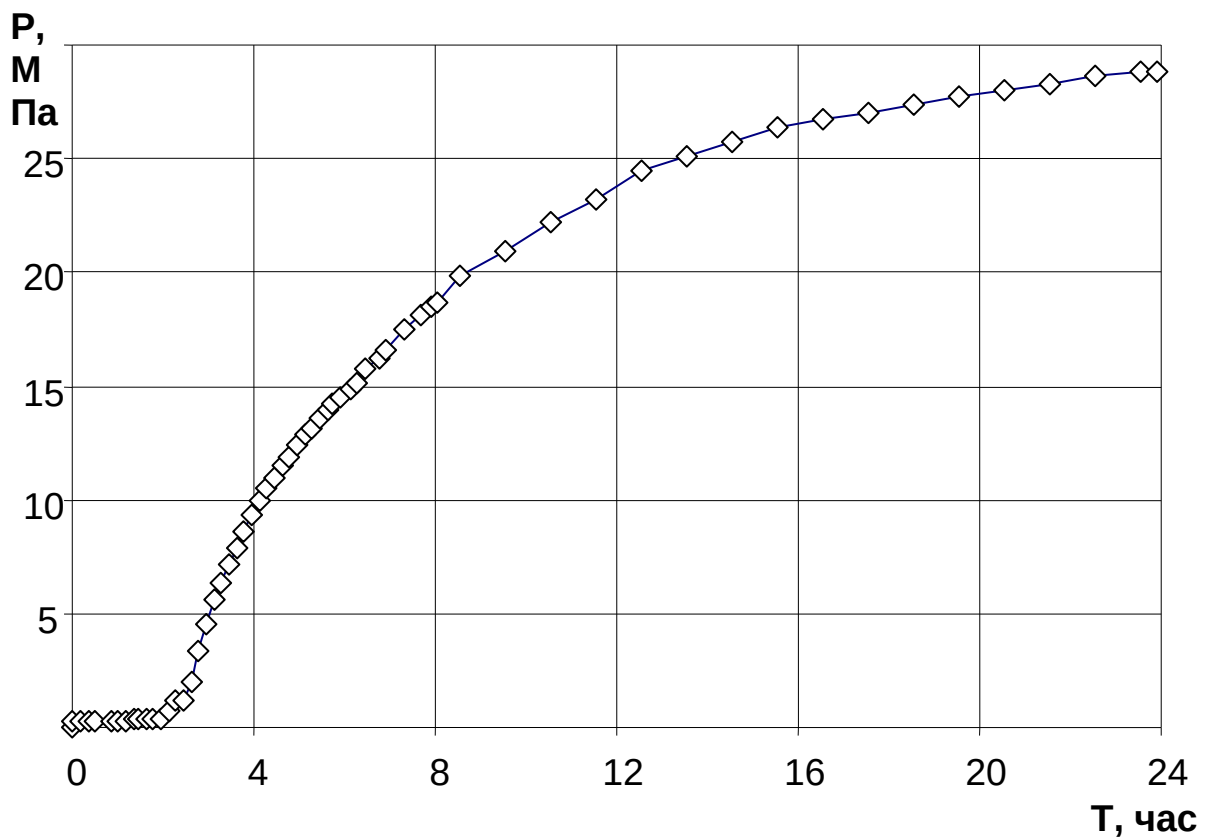


Рисунок 5.2 – Графік зростання тиску (P) саморозширення НРВ-80 у часі (T) за відсутності попереднього навантаження.

Однак залежність (5.2) отримана аналітичним методом; для отримання скоригованої залежності для шахтних умов необхідний цикл додаткових досліджень, що дозволить визначити коефіцієнт інтенсивності напружень матеріалу, що руйнується, з урахуванням попереднього розпору.

5.2 Приклад розрахунків параметрів.

Користуючись формулою (5.1) та рисунком 2, розрахуємо відстань між шпурами для таких умов: негабаритний блок представлений дрібнозернистим пісковиком із границею міцності на одновісний розтяг 8,5 МПа, діаметр шпуру для заряджання НРВ — 42 мм, температура об'єкта — 31 °С, час руйнування — 4 години.

$$L_{mp} = \frac{P^2(t^i)r_0^2 E_M}{2(k_k)^2 E_{HPC}}$$

$$L_{mp} = \frac{10^2 * 0,021^2 * 1,8 * 10^{10}}{2 * 1^2 * 10^9} = 0,397$$

Таким чином, рекомендована відстань між шпурами в ряду становить 40 см.

6. ДОСВІД ЗАСТОСУВАННЯ РОЗРОБЛЕНОГО СПОСОБУ РУЙНУВАННЯ.

Перевірка запропонованого способу руйнування з розрахованими параметрами ведення бурових робіт проводилася на кар'єрі Хлібодарівського рудоуправління, що здійснює видобуток граніту.

На першому етапі експериментальних робіт розглядалися такі параметри, як кількість шпурів для руйнування негабариту та відстань між ними, а також час руйнування негабариту.

Першим із них був негабарит (рис. 6.1), довжина, ширина та висота якого становили відповідно 1200x800x690 мм. У ньому було пробурено п'ять шпурів із відстанню між ними 0,2 м. Після чого в них помістили невибухову руйнівну суміш НРС-80 (НРВ-80), при цьому було заряджено перші чотири шпури, що пов'язано з технічною стороною експерименту.



а)

б)

Рисунок 6.1 – Загальний вигляд негабариту:
а) - негабарит із пробуреними шпурами; б) - загальний вигляд негабариту після руйнування.

На рисунку 6.1. видно, що по лінії шпурів проходить головна тріщина, при цьому перпендикулярно до стінок негабариту від шпурів проходять дрібні тріщини. Повне руйнування відбулося через 9 годин.

У другому блоці (рис. 6.2.) відстань між пробуреними трьома шпурами становила 0,3 м, а розмір блоку дорівнював 1200x600x800 мм. Аналогічно до першого блоку, у шпури було поміщено НРС.

На рисунку 6.2.(б) можна побачити, що три шпури повністю зруйнували негабарит. Видно, що через два шпури пройшла магістральна тріщина, при цьому від кожного зі шпурів пішли тріщини

поперек перерізу негабариту, що загалом розділило цілий блок на п'ять частин. За висотою тріщини пройшли паралельно до поздовжнього перерізу шпурів. Руйнування негабариту відбулося через 5 годин після приготування суміші.

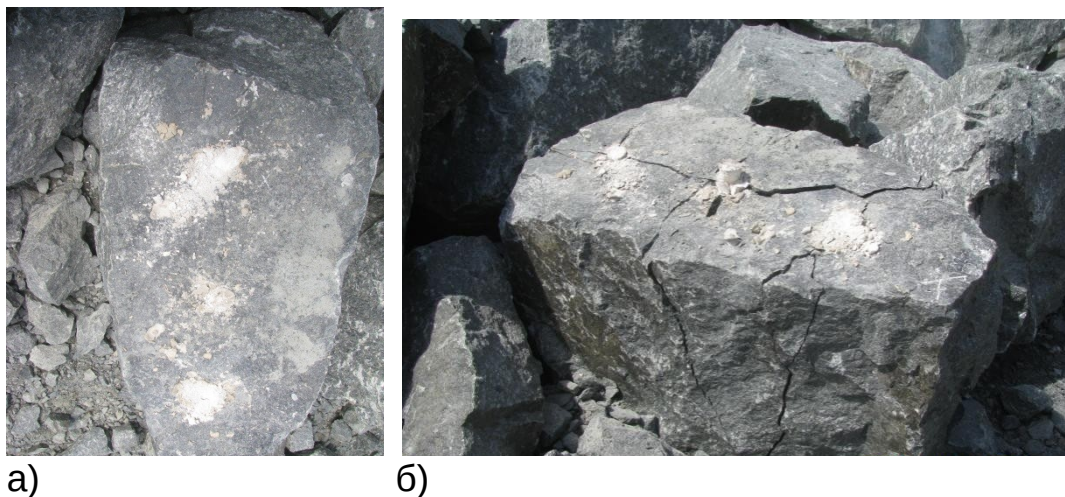


Рисунок 6.2 – Загальний вигляд негабариту:
а) - негабарит із зарядженими шпурами; б) - загальний вигляд негабариту після руйнування.

У наступному негабариті (рис. 6.3) відстань між шпурами становила 0,4 м. Було взято блок, довжина, ширина та висота якого відповідно дорівнюють 1500x900x600 мм. Аналогічно до перших двох дослідів, у шпури було поміщено НРВ-80 (або НРС-80).



Рисунок 6.3 – Загальний вигляд зруйнованого негабариту з відстанню між шпурами 0,4 м.

У результаті цього дослідів видно, що продуктивним став лише середній шпур, оскільки тільки через нього проходить поперечна тріщина. У районі третього шпура утворення тріщин не спостерігалось.

Наступним дослідом перевірялися параметри руйнування негабаритів при відстані між шпурами 0,5 м. Було взято гранітний блок (рис. 6.4) розміром 1250x750x600 мм, у якому на рівній відстані від сторін блоку пробурили два шпури. Далі всі операції проводилися аналогічно до попередніх експериментів. У результаті експерименту можна зазначити, що негабарит не зруйнувався і через добу.



а)

б)

Рисунок 6.4 – Загальний вигляд гранітного блоку до поміщення матеріалу в шпур(а) та через 24 години(б).

Таким чином, наведені експерименти показали практичну доцільність розробленого способу руйнування та вірність розрахункового методу, запропонованого в розділі 4.

На другій стадії експериментів були проведені дослід з руйнування негабариту модифікованою НРС із додаванням прискорювача.

Для вивчення параметрів руйнування гранітних блоків було взято 4 негабарити, у яких пробурили шпури з відстанню між ними 0,2 м, 0,3 м, 0,4 м, 0,5 м.

Для першого досліді було взято блок (рис.6.5(а)) розмірами 1150x950x550 мм. У ньому було пробурено 4 шпури, відстань між якими становила 0,2 м. Температура навколишнього середовища була до 30°C. Заряджання шпурів НРС здійснювали аналогічно до описаних вище способів.



а)

б)

Рисунок 6.5 – Загальний вигляд гранітного блоку з відстанню між шпурами 0,2 м до руйнування (а) та після руйнування (б).

На рисунку видно, що чотири шпури зруйнували негабарит на дві частини, при цьому тріщина пройшла через середню вісь шпурів. Руйнування відбулося через 4 години після поміщення матеріалу в шпур. У другому досліді було взято негабарит (рис.6.6) розмірами 950x650x900 мм. Відстань між шпурами становила 0,3 м. Температура навколишнього середовища була до 30°C. Заряджання шпурів НРС здійснювали аналогічно до описаних вище способів.



а)

б)

Рисунок 6.6 – Загальний вигляд гранітного блоку з відстанню між шпурами 0,3 м до руйнування (а) та після руйнування (б).

Руйнування негабариту відбулося через 6 годин. Гранітний блок був зруйнований симетрично на дві великі частини за лінією шпурів і дві малі частини поперек лінії шпурів.

У третьому досліді відстань між шпурами мала дорівнювати 0,4 м. Для цього було взято негабарит (рис. 6.7) із розмірами 1200x700x500 мм. Спосіб приготування суміші та поміщення її в шпур був аналогічним до описаного вище.

Для руйнування негабариту невибуховій руйнівній речовині знадобилося 4,5 години. При цьому негабарит був зруйнований на три частини двома тріщинами, одна з яких пройшла за лінією шпурів, а інша — перпендикулярно до неї через нижній шпур.

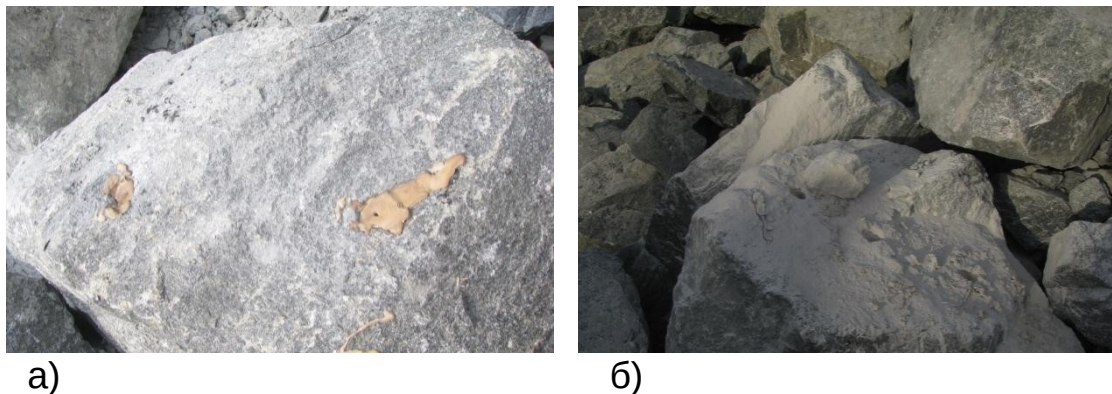


Рисунок 6.7 – Загальний вигляд гранітного блоку з відстанню між шпурами 0,4 м до руйнування (а) та після руйнування (б).

Для четвертого експерименту було взято негабарит розмірами 1300x1000x550 мм, при цьому шпури були пробурені на відстані, що дорівнювала 0,2 м від однієї зі сторін блоку. Відстань між шпурами дорівнювала 0,5 м. Зарядження шпурів НРС здійснювали аналогічно до описаних вище способів. Через 8 годин від блоку почала відколюватися частина, при цьому тріщина пройшла за лінією шпурів.

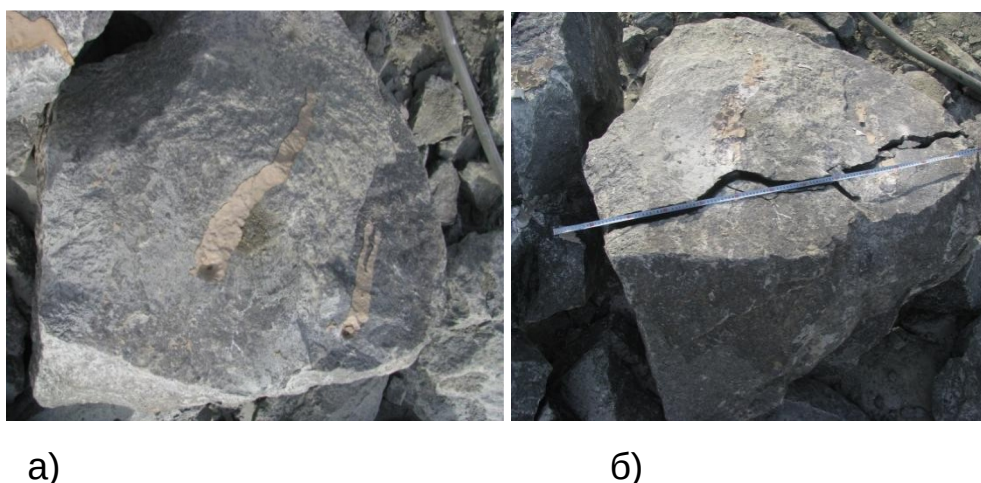


Рисунок 6.8 – Загальний вигляд гранітного блоку з відстанню між шпурами 0,5 м до руйнування (а) та після руйнування (б).

З проведених експериментів можна зробити такі висновки:

- застосування НРС при вторинному дробленні знижує втрати та витрати на руйнування;

- застосування прискорювача для руйнування негабариту зменшує час його руйнування в 1,5–2 рази залежно від концентрації прискорювача;

- вплив геометричних параметрів: Встановлено пряму залежність між відстанню між шпурами та ефективністю руйнування. Оптимальною відстанню для гранітних блоків зазначених розмірів є діапазон 0,2–0,3 м, при якому досягається повне розділення негабариту на фрагменти.

- граничні параметри сітки шпурів: Збільшення відстані між шпурами до 0,4–0,5 м (без використання прискорювача) призводить до неповного руйнування або повної відсутності магістральних тріщин, що свідчить про перевищення критичного радіусу дії напружень, створюваних НРС.

- характер руйнування: Руйнування блоків відбувається переважно шляхом утворення магістральних тріщин, що проходять через осі шпурів (лінії найменшого опору), з одночасним формуванням поперечних тріщин, що забезпечує якісне подрібнення об'єкта.

- температурний чинник та прискорювачі: Підтверджено, що поєднання високої температури навколишнього середовища (до 30°C) та хімічного прискорювача дозволяє максимально інтенсифікувати процес, скорочуючи термін очікування результату з 9–24 годин до 4–5 годин.

7. СПРЯМОВАНЕ РУЙНУВАННЯ ГІРСЬКИХ ПОРІД ЗА ДОПОМОГОЮ НРС.

При використанні існуючих технологічних рішень руйнування за допомогою НРС у процесі гідратації суміші створюється однаковий у всіх напрямках тиск на стінки шпуру. При цьому місця утворення тріщин і шляхи їхнього розвитку визначаються структурними послабленнями та неоднорідностями порід, що мають випадковий характер розподілу за об'ємом. Тому складно виключити небажане руйнування за площинами, що не збігаються з рядами шпурів, або появу додаткових тріщин на стінках шпуру, які не збігаються з магістральним напрямком.

Таким чином, відомі способи руйнування порід за допомогою НРС не дозволяють забезпечити спрямоване руйнування шляхом створення магістральної тріщини та підтримання її росту в потрібному напрямку при збереженні суцільності решти масиву.

Тому завданням досліджень була розробка та дослідження способу спрямованого руйнування порід за допомогою НРС. Ідея, що лежить в основі запропонованого способу спрямованого руйнування, полягає у створенні на стінках шпуру концентраторів напружень у потрібному місці. При цьому, враховуючи, що міцність гірських порід на розтягнення набагато менша за міцність на стискання, для забезпечення спрямованого руйнування ефективніше створювати зони концентрації розтягувальних напружень.

Реалізація зазначеної ідеї здійснюється у способі руйнування гірських порід невибуховими руйнівними сполуками, що включає буріння шпурів для розміщення сполуки, приготування робочої суміші НРС, поміщення її в порожнину патрона, встановлення патрона в шпур. Патрон являє собою водонепроникну оболонку, всередині якої розміщена НРС. Водонепроникна оболонка патрона виконана не менше ніж із двох половин труби (елементів), отриманих поздовжнім діаметральним розрізом, кожна з яких має глухий торець.

Поміщення невибухової руйнівної сполуки в шпур у патронах забезпечує при збільшенні об'єму НРС у процесі її гідратації виникнення в об'єкті руйнування в одному з діаметральних напрямків шпуру підвищених розтягувальних напружень. При перевищенні ними межі міцності матеріалу на розтягнення відбувається розрив зв'язків у матеріалі та створюються умови для росту магістральної тріщини від стінок шпуру вглиб масиву. При цьому запобігається руйнування

матеріалу в напрямках, що не збігаються з напрямком магістральної тріщини. Вивчення механізму утворення тріщини в породах проводилося шляхом аналізу розподілу напружень навколо шпуру з НРС. Дослідження проводили за допомогою чисельного математичного моделювання методом скінченних елементів (МСЕ). Розв'язувалася об'ємна задача в нелінійній постановці.

Моделювалася ділянка масиву, представлена піщаником із межею міцності на одновісне стискання 80 МПа, межею міцності на одновісне розтягнення 8 МПа, що містить шпур із НРС діаметром 45 мм. Ріст тиску саморозширення НРС задавався шляхом покрокового підвищення навантаження зі збереженням результатів попереднього кроку рішення, тобто час задавався неявно. Вихідні дані для моделювання були взяті з кадастру фізичних властивостей гірських порід. Для проведення порівняння моделювали два випадки:

варіант 1 — поміщення НРС безпосередньо в шпур;

варіант 2 — поміщення НРС у патроні.

Патрон моделювали матеріалом із властивостями сталі Ст3.

За робочу було прийнято першу теорію міцності. Оскільки для досліджуваного матеріалу допустимі напруження на розтягнення $[\sigma_p]$ та на стискання $[\sigma_c]$ різні, то умова міцності виражається у вигляді:

$$\begin{cases} \sigma_1 \geq [\sigma_p] \\ \sigma_3 \geq [\sigma_c] \end{cases}$$

Результати моделювання представлені на рисунках 7.1, 7.2 у вигляді картин розподілу алгебраїчно найбільших σ_1 та найменших σ_3 головних напружень відповідно для варіанта 1 та варіанта 2.

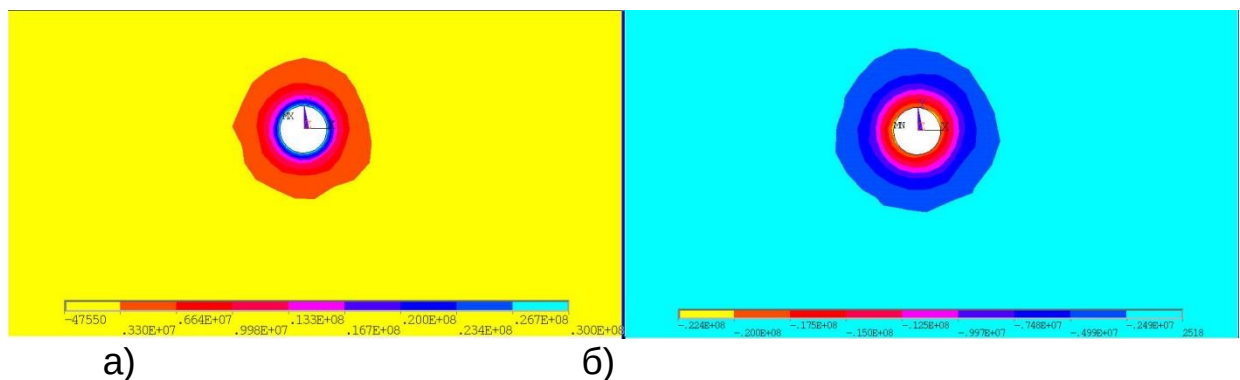


Рисунок 7.1 – Картини розподілу головних напружень σ_1 (а) та σ_3 (б) моделі при поміщенні НРС безпосередньо в шпур і тиску саморозширення 30 МПа.

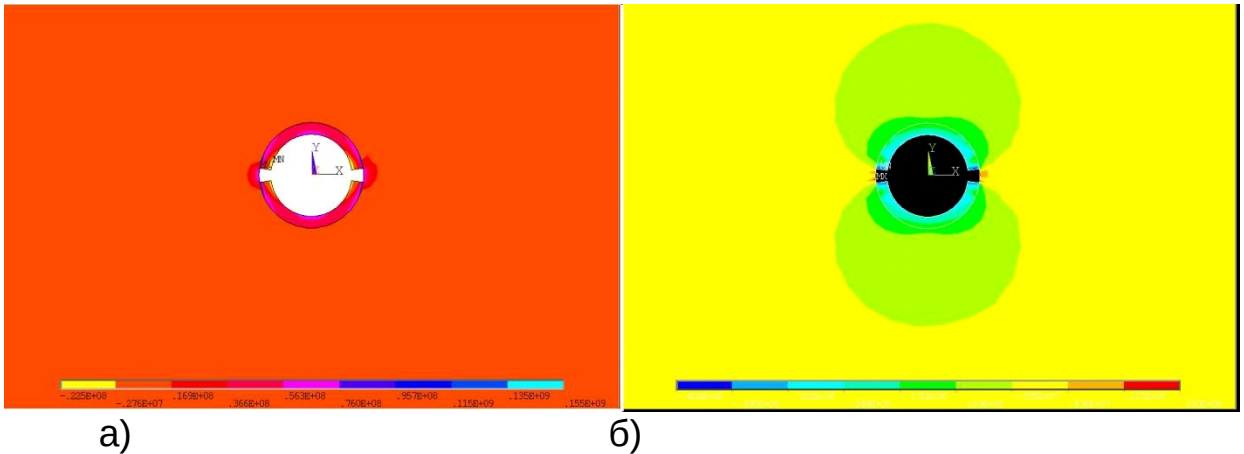


Рисунок 7.2 – Картини розподілу головних напружень σ_1 (а) та σ_3 (б) у моделі при поміщенні НРС у шпур у патроні із зазором між елементами патрона 6 мм та тиску саморозширення 30 МПа.

Результати моделювання у вигляді графіків зміни алгебраїчно найбільших σ_1 та найменших σ_3 головних напружень у міру віддалення від стінки шпуру за лінією передбачуваного руйнування для наведених вище випадків представлені на рисунку 7.3.

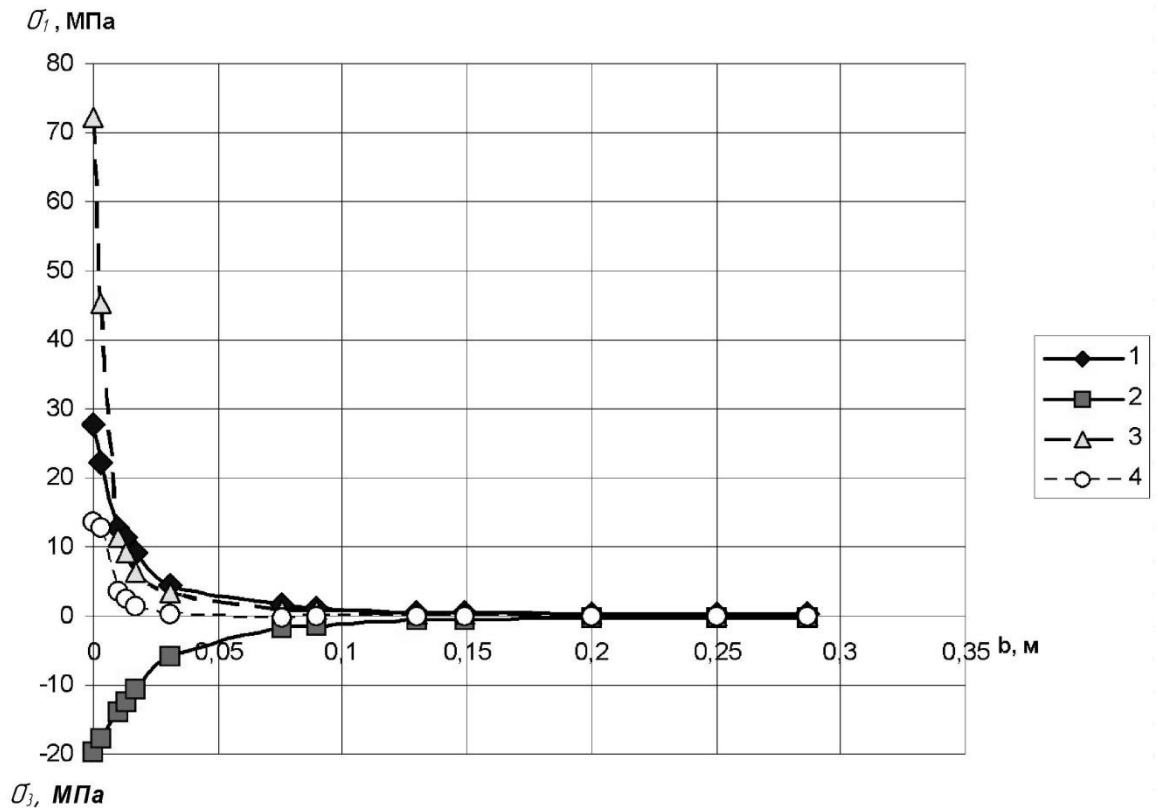


Рисунок 7.3 – Графіки розподілу головних напружень σ_1 та σ_3 у моделі за лінією руйнування при тиску саморозширення 30 МПа на відстані від стінки шпуру, м:

1, 2 - при розміщенні НРС безпосередньо в шпур; 3, 4 - при розміщенні НРС у шпур у патроні із зазором 6 мм. між елементами патрона.

Аналіз рисунків 7.1–7.3 показує, що використання запропонованого способу спрямованого руйнування призводить до зміни характеру розподілу напружень у навколошпуровій області. Максимальні головні напруження σ_1 та σ_3 виникають на стінках шпуру.

Головні напруження σ_1 у першому випадку (Варіант 1) у всій моделі є розтягувальними або дорівнюють нулю; підвищені напруження розподілені рівномірно навколо шпуру. За абсолютною величиною максимальне значення σ_1 становить 27,7 МПа на стінках шпуру, тобто у 3,4 рази перевищує межу міцності піщанику на розтягнення. Рівномірний розподіл напружень створює умови для утворення тріщини на стінках шпуру (1) за лінією найменшого опору з урахуванням локальних послаблень, що не дозволяє керувати напрямком руйнування.

У другому випадку (Варіант 2) напруження σ_1 у тілі моделі є як розтягувальними, так і стискальними:

Між елементами оболонки патрона σ_1 вони є розтягувальними; за абсолютною величиною максимальне значення σ_1 дорівнює 72,1 МПа на стінках шпуру за лінією спрямованого руйнування, що у 9 разів перевищує межу міцності піщанику на розтягнення.

На стінках шпуру за межею зони впливу зазору між елементами патрона НРС σ_1 напруження є стискальними.

Таким чином, можна стверджувати, що неконтрольованого руйнування при використанні патронів не буде. Крім того, найбільші головні напруження σ_1 при використанні патронів за абсолютною величиною у 2,6 рази більші, ніж при розміщенні НРС безпосередньо в шпур.

Головні напруження σ_3 у першому випадку у всій моделі є стискальними або дорівнюють нулю. Підвищені напруження розподілені рівномірно навколо шпуру; за абсолютною величиною максимальне значення σ_3 становить -19,6 МПа на стінках шпуру, що у 4 рази менше за межу міцності піщанику на стискання. Тобто умови (1) для руйнування від стискання не виникають.

При застосуванні патронів характер розподілу σ_3 збігається з характером розподілу σ_1 . Між елементами оболонки патрона НРС σ_3 напруження є розтягувальними, максимальне значення σ_3 дорівнює

13,5 МПа на стінках шпуру за лінією спрямованого руйнування. На стінках шпуру за межами зони впливу зазору вони є стискальними (максимальне значення -17,6 МПа). Умови (1) для руйнування від стискання також не виникають.

Таким чином, можна зробити висновок, що застосування патронів НРС призводить до зміни картини розподілу напружень навколо шпуру з НРС, виникнення критичного стану в породі в потрібному місці, тоді як решта області екранована від розтягувальних напружень. При цьому найбільші головні напруження $\sigma_{1(n)}$ при використанні патронів із зазором між елементами 6 мм за абсолютною величиною у 2,6 раза більші, ніж при розміщенні НРС безпосередньо в шпур, та в 9 разів більші за межу міцності породи на розтягнення.

Проведені за допомогою МСЕ дослідження за описаною вище методикою показали, що при зміні зазору між елементами патрона в діапазоні 4–27% від діаметра шпуру, коефіцієнт концентрації розтягувальних напружень задовільно описується степеневу залежністю вигляду:

$$k_{\sigma_1} = 1,078 \left(\frac{a}{b}\right)^{-0,424}$$

Таким чином, за допомогою запропонованого способу можна підвищити розтягувальні напруження в потрібному місці до 4 разів порівняно з розміщенням НРС безпосередньо в шпур.

Перевірку описаного способу проводили в лабораторних умовах при руйнуванні гіпсових плит. Для цього в плитах бурили отвори діаметром 27 мм, залишаючи в донній частині недобурену пробку 10 мм, у які поміщали НРС безпосередньо в шпур та в патронах. Патрони являли собою дві половини пластикової тонкостінної труби, отримані шляхом поздовжнього діаметрального розрізу. Гирлову частину отворів герметизували гіпсом. Загальний вигляд зруйнованих плит при заливці НРС безпосередньо в отвір та при розміщенні її в патрон наведено на рисунку 7.4.



а)

б)

Рисунок 7.4 – Зруйновані гіпсові плити при розміщенні НРС безпосередньо в шпур (а) та в патроні із зазором 2 мм між елементами патрона (б).

Аналіз характеру руйнування показує, що в першому випадку в плиті утворилися дві великі та одна дрібніша тріщини, які вийшли на межу плити та зруйнували її на три частини. Від стінок шпуру утворилися також дві дрібніші тріщини, що не проросли до межі плити. При розміщенні НРС у патроні в плиті утворилася одна магістральна тріщина в напрямку, що збігається із заданим (заданий напрямок позначено рисою на плиті), яка зруйнувала плиту за довгою стороною на дві частини. Інших тріщин не виникло, навколошпурова область залишилася непорушеною. Таким чином, характер руйнування був різним. Проведений експеримент підтвердив працездатність запропонованого способу.

Випробування способу в натурних умовах було проведено в умовах Хлібодарівського рудоуправління.

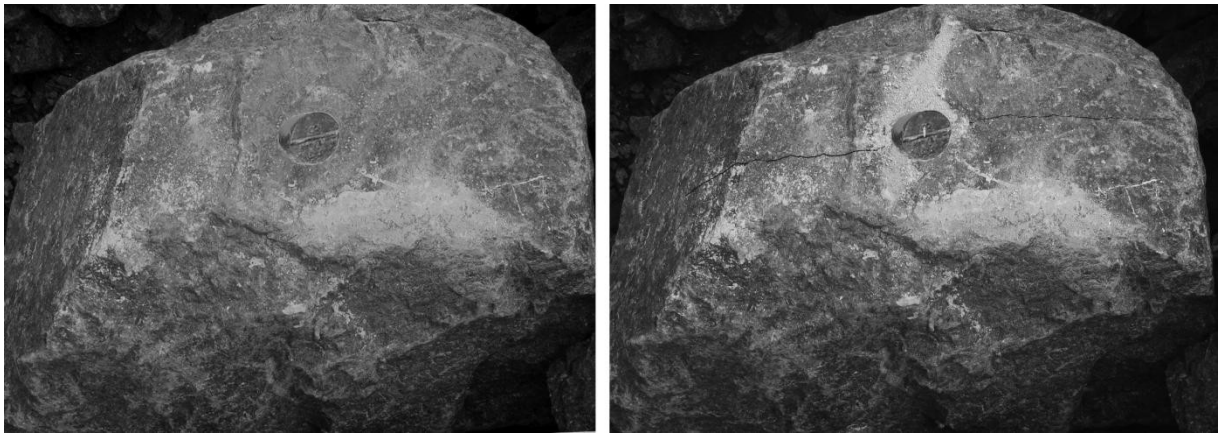
Дослідження спрямованого руйнування проводили на негабаритних блоках, у яких за допомогою перфоратора бурили шпури діаметром 40 мм. Потім готували суміш НРС і поміщали її в патрони (рис. 7.5). Після чого патрони з НРС встановлювали в шпури. При цьому довжина шпурів приймалася кратною довжині патрона. Відстань між шпурами розраховували, використовуючи залежності (2), (3).



Рисунок 7.5 – Заливка НРС в патрони

В результаті протікання реакції гідратації та перекристалізації суміші відбувався ріст структурних елементів НРС, що супроводжувався збільшенням тиску на елементи патрона. Це викликало концентрацію розтягувальних напружень на стінках шпуру в області зазорів між елементами патрона. При виникненні критичних напружень у блоці відбувався ріст магістральної тріщини від стінок шпуру вглиб масиву та розкол блоку за лінією заданого руйнування.

На рисунку 6 наведено результати експерименту з руйнування негабаритного блоку розмірами 600x350x550 мм за допомогою запропонованого способу спрямованого руйнування. Блок зруйновано за довгою стороною одним шпуром із патроном НРС. З рисунка видно, що магістральна тріщина проходить рівно по всьому блоку, починається від стінок шпуру в місцях зазору між елементами патрона НРС. Спостережуваний механізм руйнування збігається з описаним вище.



а)

б)

Рисунок 7.6 – Процес спрямованого руйнування граніту: а) загальний вигляд блоку після встановлення патрона в шпур; б) загальний вигляд блоку після утворення магістральної тріщини.

Для порівняння характеру руйнування блоків при заливці НРС безпосередньо в шпур та при поміщенні НРС у шпур у патронах були проведені відповідні експерименти. На рисунку 7.7 представлено результати проведених експериментів.



а)

б)

Рисунок 7.7 – Характер руйнування гранітних блоків: а) при заливці НРС безпосередньо в шпур; б) при поміщенні в шпур патрона з НРС.

Аналіз отриманих результатів дозволяє зробити висновки, що при заливці НРС безпосередньо в шпур від його стінок утворюється кілька різноспрямованих тріщин (переважно — три), які мають різну траєкторію росту. Навіть при ряді шпурів, пробурених за необхідною лінією руйнування (на рис. 7.7а — три шпури за довгою стороною блоку), забезпечити руйнування в потрібному напрямку вдається не завжди. При використанні патронів завжди утворюється магістральна

тріщина в заданому напрямку (рис. 7.7б). Це дозволяє забезпечити спрямоване руйнування, виключивши утворення тріщин у решті масиву.

Висновки:

1. Проведені роботи дають підстави вважати запропонований спосіб спрямованого руйнування таким, що пройшов дослідно-промисловою перевірку.

2. Запропонована методика розрахунку параметрів спрямованого руйнування за допомогою НРС, апробована при руйнуванні блоків граніту, дозволяє розраховувати паспорт бурових робіт.

8. ЕКОНОМІЧНЕ ПОРІВНЯННЯ ВАРІАНТІВ

Метою даного розділу є визначення найбільш раціонального та економічно вигідного способу руйнування негабаритних блоків граніту для умов Хлібодарівського рудоуправління. Вибір методу базується на комплексному аналізі, що враховує не лише прямі витрати на матеріали, а й рівень безпеки персоналу, якість отриманої продукції та витрати на підготовку робочого місця.

Для порівняльного аналізу обрано блок граніту об'ємом 1 м³ (20*0,5*1,0м). Дослідження проводиться за чотирма основними варіантами, які представляють різні технологічні підходи:

1. Механічний спосіб (Алмазна пилка) — застосування високотехнологічного обладнання для отримання ідеальної поверхні розколу, що є еталоном якості, але потребує значних енерговитрат.

2. Спрямований гідророзрив — сучасний безвибуховий метод, заснований на створенні надлишкового тиску рідини в шпурах, що виключає сейсмічний вплив.

3. Буровибуховий спосіб (ВВ) — традиційний метод із використанням сучасних вибухових речовин (Україніт-П, Емулініт-2, Ердоганіт 35, Грануліт), що характеризується високою швидкістю, але суворими вимогами до безпеки.

4. Невзривні руйнуючі сполуки (НРС) з патронами-концентраторами — запропонована технологія вітчизняного виробництва, спрямована на поєднання низької вартості робіт із високою керованістю процесу руйнування.

8.1. Варіант 1. Механічне руйнування алмазною пилкою



Рисунок 8.1 – Підшвоуступна дискова каменорізна машина.

Цей метод потребує використання професійного обладнання та спеціальної підготовки робочого місця. Розрахунок проведено для пропилю площєю 1^3 м (найбільша грань блока).

1. Підготовка та монтаж

Встановлення напрямних рейок, нівелювання установки та підключення до мереж займає в середньому 1,25 год.

При ставці оператора 360 грн/год витрати на зарплату складуть:

$$1,25 * 360 = 450 \text{ грн}$$

2. Процес різання (Основний час).

При середній швидкості різання твердого граніту $2 \text{ м}^2/\text{год}$, чистий час роботи складе 0,5 год.

Зарплата оператора за цей етап:

$$0,5 * 360 = 180 \text{ грн}$$

3. Енерговитрати та матеріали

Враховуючи актуальні тарифи ($\approx 10,25 \text{ грн/кВт}\cdot\text{год}$) та потужність установки 22 кВт:

Електроенергія

$$22 * 0,5 * 10,25 = 112,75 \text{ грн}$$

Знос алмазного інструменту (сегментів):

$$500 \text{ грн/м}^2$$



Рисунок 8.2 – Механічне руйнування гірської породи дисковою алмазною пилкою.

Таблиця 8.1 Підсумок по варіанту 1

Стаття витрат	Розрахунок	Сума,грн
Заробітна плата	(1,25+0,5)год*360 грн	630
Електроенергія	За фактичним споживанням	112,75
Алмазний інструмент	Знос на 1 м ²	500,0
Транспортування	Логістика установки в кар'єрі	500,0
Разом :		1742,75

8.2. Варіант 2. Спрямований гідроразрив.



Рисунок 8.3 – Загальний вигляд мобільної насосної установки середньої потужності для створення високого статичного тиску рідини при СГР.

1. Енерговитрати (Електроенергія)

Потужність: Середня промислова установка споживає близько 37 кВт.

Час роботи: Для розриву блока 1 м³ (з урахуванням підготовки тиску) потрібно близько 15 хвилин (0,25 год).

Тариф: 10,25 грн/кВт·год.

Розрахунок:

$$37 \text{ кВт} * 0,25 \text{ год} * 10,25 \text{ грн} = 94,81 \text{ грн}$$

2. Заробітна плата

Буріння: 2 шпури (0,8 м)

Для 2 шпурів по 0,4 м (разом 0,8 м) при нормі часу 0,55 м/хв:

Час буріння:

$$\frac{0,8 \text{ м}}{0,55 \text{ м/хв}} = 1,45 \text{ хв}$$

Зарплата бурильника: Якщо брати середню ставку 340 грн/год, то за 1,45 хв це складе:

$$\frac{340}{60} * 1,45 = 8,21 \text{ грн}$$

Амортизація бурового інструменту 15,0 грн

Операційні роботи: Встановлення пакерів, підключення станції та сам розрив займають близько 1 години для двох осіб (оператор та помічник). Розрахунок:

$$1 \text{ год} * 300 \text{ грн/год} * 2 \text{ особи} = 600 \text{ грн}$$

3. Витратні матеріали та амортизація

Матеріали: Високонапірні ущільнювачі (пакери) мають обмежений ресурс. У середньому на один цикл розриву припадає 120 грн зносу.

Обслуговування: Гідравлічне мастило та фільтри — 30 грн

4. Транспортування та розгортання.

Оскільки станція важка, її переміщення територією Хлібодарівського рудоуправління потребує залучення техніки — 400 грн.

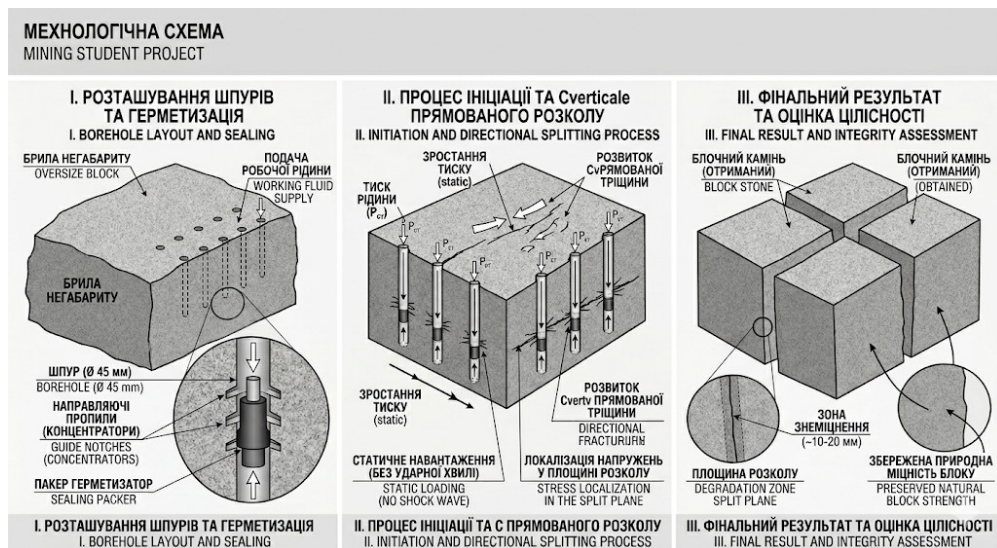


Рисунок 8.4 – Схема спрямованого гідророзриву.

Таблиця 8.2 Підсумок по варіанту 2.

Стаття витрат	Складові	Сума ,грн
буріння	Робота+енергія+знос коронок	95,00
Зарплата операторів	2 особи/1 год	600
Електроенергія станції	Чиста робота насоса	94,81
Матеріали та амортизація	Пакери, мастило, обслуговування	150,00
Транспортування	Логістика обладнання	400,00
Разом		1339,81*

8.3. Варіант 3. Буровибуховий спосіб.



Рисунок 8.5 – Процес буріння шпурів у брилі негабариту ручним пневматичним перфоратором перед зарядженням ВР. а) перфоратор на теліскопічному шттовхачі. б) ручний перфоратор

1. Буровий цикл (повний):

Зарплата бурильника (340 грн/год) + енергія: 95,00 грн.

Амортизація інструменту (знос коронок по міцному граніту): 15,00 грн.

Підготовка, очистка та продувка шпурів (5 хв): 12,50 грн.

2. Заробітна плата персоналу

Ланка підричників (2 особи, 1 год на весь цикл): 900,00 грн.

Охорона та оточення (2 пости безпеки на 30 хв): 200,00 грн.

3. Спеціалізована логістика

Доставка ВМ спецтранспортом зі складу (з урахуванням супроводу): 800,00 грн.

Разом постійних витрат (без ВМ): 2215,00 грн.



Рисунок 8.6 – Процес комутації (з'єднання) зарядів для вторинного підривання негабариту в умовах гранітного кар'єру.

Таблиця 8.3 Підсумок варіанту 3(без урахування вартості ВМ).

Стаття витрат	Розрахунок	Сума,грн
Бурові роботи	Робота+енергія+знос	115,00
Організаційні роботи	Підричники+Охорона (пости)	1300,00
Вибухові матеріали	Середня вартість заряду	По Табл. 8.4

Транспортування	Спецавтомобіль+Охорона а ВМ	800,00
Разом :		2215

Таблиця 8.4. Порівняння вартості різних типів ВМ та засобів ініціювання.

№	Тип вибухової речовини	Вартість заряду (ВР+детонатор) грн	Всього за варіант (Ф+Б) грн
1	Амоніт - 6ЖВ (Україна)	34,00	2249,00
2	Україніт-П (Україна)	48,50	2263,5
3	Emulinit-2 (Польща)	52,00	2267,00
4	Erdoganit - 35М (Туреччина)	55,50	2270,00
5	Грануліт-(АС-8)(Україна)	29,00	2244,00

Середня вартість руйнування 1 м³ негабариту буровибуховим способом для Хлібодарівського рудоуправління становить 2256,5 грн.

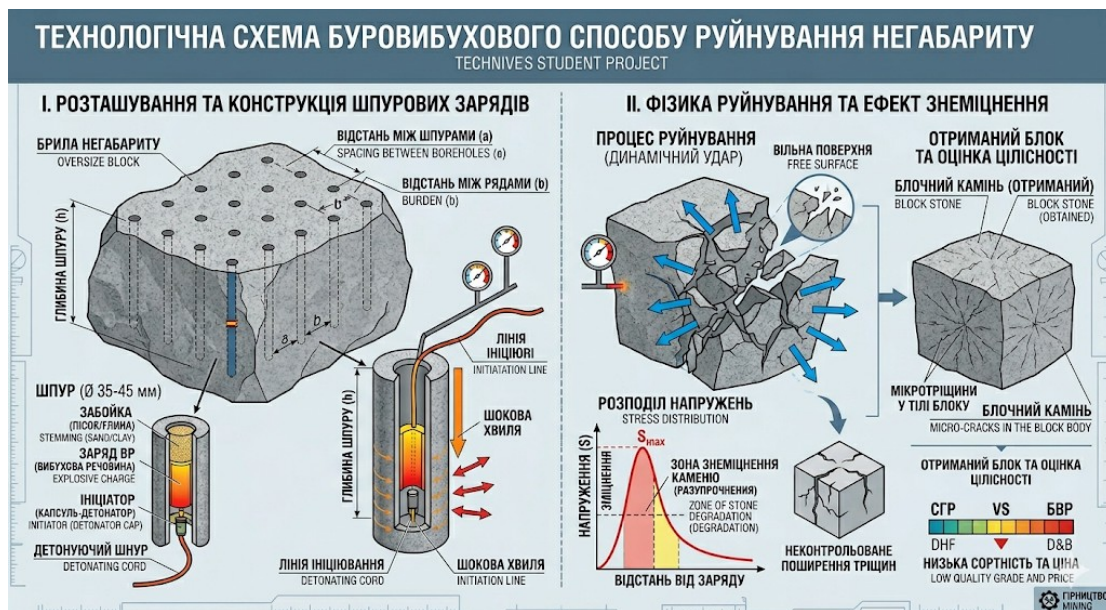


Рисунок 8.7 – Технологічна схема буровибухового способу руйнування негабариту.

8.4. Варіант 4. Використання НРС-1 (з патронами-концентраторами)



Рисунок 8.8 – Процес заповнення шпурів невзривчастою руйнуючою сумішшю типу НРВ-80 у гранітному кар'єрі.

1. Етап буріння та підготовки.

Витрати на буріння ідентичні до попередніх варіантів, але підготовка шпурів простіша:

Буріння (2 шпури):

Зарплата + енергія + амортизація інструменту = 95,00 грн.

Підготовка шпурів: Очищення від пилу (важливо для контакту НРС зі стінками) = 12,50 грн.

2. Заробітна плата персоналу:

Метод не потребує дипломованих підрильників. Роботу виконує 1 робітник (наприклад, той самий бурильник), що значно економить бюджет:

Заряджання блока: Встановлення патронів та заливка водою займає близько 20 хв.

Зарплата:

$$340 \text{ грн/год} * 0,5 \text{ год} = 170,00 \text{ грн}$$

3. Матеріали (НРС та патрони).

Для міцного Хлібодарівського граніту витрата НРС-1 складає приблизно 2–3 кг на шпур (залежно від діаметра).

Вартість НРС-1: (середня ціна 2026 р. — 45 грн/кг) × 5 кг на блок = 225,00 грн.

Патрони-концентратори: (вартість виготовлення/закупівлі 2 шт.) = 80,00 грн.

4. Логістика .

НРС перевозиться як звичайний вантаж. Спецтранспорт та охорона не потрібні.

Внутрішньокар'єрна доставка (звичайним авто) = 50,00 грн.



Рисунок 8.9 – Технологічна схема використання патрона для заливки НРС.

Таблиця 8.5. Підсумок по варіанту 4.

Стаття витрат	Розрахунок	Сума,грн
Бурові роботи	Робота+енергія+знос	115,00
Організаційні роботи	Робота 1 працівника	170,00
Матеріали НРС-1+патрони концентратори	5кг суміші 2 одиниці патронів	225,00 80,00
Транспортування	Звичайна доставка	50,00
Разом :		640,00

8.5. Зведене техніко-економічне порівняння та оцінка ефективності для всіх варіантів.

Для остаточного вибору раціонального методу руйнування негабаритів ми звели всі отримані дані в єдину аналітичну таблицю. Розрахунок проведено для базового блока граніту об'ємом $1\text{ м}^3(2,0*0,5*1,0\text{ м})$.

Таблиця 8.5. Зведена таблиця витрат по варіантах грн/м³.

Стаття витрат	Варіант 1 (грн)	Варіант 2 (грн)	Варіант 3 (грн)	Варіант 4 (грн)
Буріння шпурів	0,0	19,86	32,36	32,36
Оплата праці (основний персонал)	630,00	695,00	1415,00	170,00
Енергоносії, пальне	125,25	94,81	0,0	0,0
Матеріали , амортизація	700,00	150,00	37,00 (ВР)	305,00 (НПС+патрони)
Логістика , спецтранспорт, охорона та безпека	150,00	400,00	800,00 200,00	50,00
Разом грн/м ³	1742,75	1339,81	2256,5	640

Діаграма наведена нижче наочно демонструє структуру витрат для кожного методу та підкреслює економічну перевагу для запропонованого методу руйнування порід .

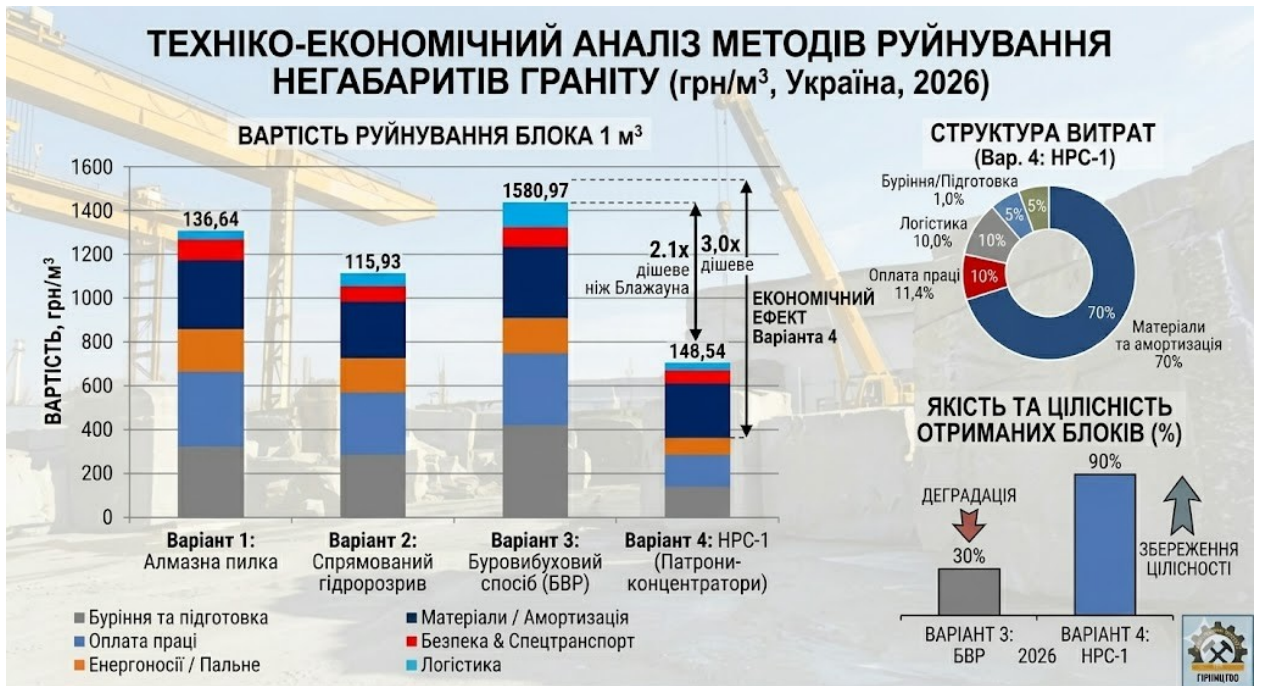


Рисунок 8.10 – Діаграма техніко-економічного аналізу методів руйнування негабаритів граніту.

ВИСНОВКИ

На основі проведеного комплексного аналізу та порівняльних розрахунків чотирьох методів руйнування негабаритних блоків граніту для умов Хлібодарівського рудоуправління (станом на середні ціни в Україні на 2026 рік), можна зробити наступні висновки:

1. Технологічна доцільність: Усі розглянуті методи (алмазне пиляння, спрямований гідророзрив, буровибуховий спосіб та застосування НРС-1) технічно здатні вирішити задачу руйнування гранітних блоків міцністю понад 120 МПа. Однак, методи із застосуванням алмазного інструменту та гідророзриву є більш чутливими до внутрішньої тріщинуватості породи та потребують складної підготовки робочого простору. Буровибуховий метод та НРС-1 демонструють стабільну ефективність незалежно від структури моноліту.

2. Економічна ефективність (Грошовий вимір): Абсолютним лідером за критерієм мінімальної вартості на 1 м³ зруйнованої породи виявився Варіант 4 (застосування НРС-1 з патронами-концентраторами). Питома вартість робіт за цим методом складає 640 грн/м³, що є в 3,5 раза нижчим за вартість традиційного буровибухового способу (2256,5 грн/м³) та у 2,7 раза нижчим за алмазне пиляння (1742 грн/м³). Спрямований гідророзрив зайняв проміжну позицію (1339,81 грн/м³).

3. Структура витрат та "приховані" втрати: Аналіз показав, що основна економічна слабкість традиційних вибухових робіт (Варіант 3) полягає не у вартості вибухівки (вона складає лише ~4%), а у величезних витратах на забезпечення безпеки — спецтранспорт, охорону ВМ та виставлення постів оточення. На ці статті припадає понад 93% від загальної вартості вибухового методу для негабаритів. Застосування НРС повністю усуває ці витрати, оскільки сполука не є небезпечним вантажем.

Вплив розробки на собівартість: Ключовим фактором високої ефективності є використання спеціально розроблених патронів-концентраторів. Вони дозволяють спрямувати зусилля розширення НРС точно по лінії розколу, що мінімізує витрату дорогої хімічної суміші НРС-1 (до 5 кг на блок) та знижує ризик неконтрольованого руйнування. Це підтверджує наукову та практичну цінність запропонованої технології.

4.Операційна гнучкість та безпека: Окрім прямої економічної вигоди, метод НРС із патронами-концентраторами забезпечує найвищий рівень безпеки робіт (відсутність сейсмічного впливу, розльоту осколків та отруйних газів). Це дозволяє проводити роботи без зупинки основного виробництва, виведення важкої техніки з кар'єру та евакуації персоналу, що дає додатковий прихований економічний ефект у вигляді відсутності простоїв.

Враховуючи вищезазначене, метод руйнування негабаритів із застосуванням невзривних руйнуючих сполук НРС-1 та патронів-концентраторів (Варіант 4) є найбільш раціональним та економічно обґрунтованим для впровадження на Хлібодарівському рудоуправлінні. Його застосування дозволить кардинально знизити собівартість переробки негабаритів та підвищити загальну безпеку праці в кар'єрі.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Нормативно-правові акти та державні стандарти

1. Гірничий закон України: Закон України від 06.10.1999 № 1127-XIV (зі змінами).
2. НПАОП 0.00-1.66-13. Правила безпеки під час поводження з вибуховими матеріалами промислового призначення.
3. ГОСТ 8267-93. Щебень и гравий из плотных горных пород для строительных работ. Технические условия. (впроваджено замість ГОСТ 8267-64).
4. ТУ-159-53. Гранитоиды Хлебодаровского месторождения. Технические условия.

2. Монографії, підручники та навчальні посібники

5. Чертков В. Я. Статистические методы оценки прочности взорванной горной массы. Москва: Недра, 1988.
6. Яшкин А. З. Буровзрывные работы на карьерах облицовочного камня. Москва: Недра, 1990.
7. Кузнецов В. М. Математическое моделирование разрушения горных пород взрывом. Новосибирск: Наука, 1977.
8. Гриффитс А. А. Теория хрупкого разрушения твердых тел. (в контексті енергетичного критерію Гріффітса-Ірвіна).

3. Наукові статті та періодичні видання

9. Исаков А. Л. Классификация способов направленного разрушения горных пород при взрыве. Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 1982. № 3. С. 45–52.
10. Чертков В. Я. О масштабном эффекте прочности отдельностей в массиве и осколков в развале. Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 1987. № 1.
11. Исследование процесса разупрочнения горных пород взрывом / авт. [1-5]. Горный журнал. 2021.
12. Технології використання НРС у гірничій справі / авт. [24-29]. Вісник ДонНТУ.

4. Патенти та авторські свідоцтва

13. Патент України на винахід № [34]. Спосіб видобутку блочного каменю спрямованим гідророзривом.
14. Патент України № [35]. Комбінований метод спрямованого кумулятивного вибуху.
15. Авторське свідоцтво СРСР № [30]. Невибухова руйнуюча суміш (НРС) для розколу блоків.
5. Технічна документація та звіти
16. Технічні умови ТУ на НРВ-80 (невзривна руйнуюча речовина). Виробник: Україна.
17. Звіт про геологічну розвідку Хлібодарівського родовища гранітів (1954, 1964 рр.).
18. Паспорт буровибухових робіт кар'єру Хлібодарівського рудоуправління (2026 р.).
19. Сахно И.Г. Лабораторные исследования свойств и разработка методов управления компрессионно-прочностными характеристиками саморасширяющихся составов / Вісті Донецького гірничого інституту. – 2010. - №1. – С. 32-38.