

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»**

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

ІГНАТЮК Роман Мирославович

УДК 622.35:622.233

ДИСЕРТАЦІЯ

**ОБҐРУНТУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ВИДОБУВАННЯ
ПРИРОДНОГО ОБЛИЦЮВАЛЬНОГО КАМЕНЮ КОМБІНОВАНИМ
СПОСОБОМ**

Спеціальність 184 Гірництво
Галузь знань 18 – виробництво та технології

Подається на здобуття наукового ступеня
доктора філософії з гірництва

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

_____ Р.М. Ігнатюк

Науковий керівник:
ШАМРАЙ Володимир Ігорович,
кандидат технічних наук, доцент

Житомир – 2026

АНОТАЦІЯ

Ігнатюк Р.М. Обґрунтування технологічних параметрів видобування природного облицювального каменю комбінованим способом. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 184 «Гірництво» галузі знань 18 «Виробництво та технології» – Державний університет «Житомирська політехніка», Житомир, 2026.

Дисертаційна робота присвячена вирішенню актуального науково-практичного завдання обґрунтування технологічних параметрів видобування природного облицювального каменю комбінованим способом з урахуванням природної тріщинуватості масиву та особливостей відокремлення монолітів. Дослідження спрямоване на підвищення виходу кондиційної блочної продукції, більш повне використання запасів родовищ та зменшення технологічних втрат.

Природний облицювальний камінь є важливою складовою мінерально-сировинної бази України та широко використовується у будівництві й архітектурі. Водночас ефективність розробки родовищ визначається не стільки обсягом видобутої гірської маси, скільки виходом якісної блочної продукції. Значні втрати часто пов'язані з природною тріщинуватістю масиву та недосконалістю технологічних схем відокремлення монолітів. Саме тому особливого значення набуває застосування комбінованих технологій, які поєднують алмазно-канатне різання з невибуховими способами відокремлення каменю та забезпечують краще збереження його природної структури.

Метою роботи є обґрунтування параметрів комбінованої технології видобування облицювального каменю шляхом встановлення закономірностей впливу способу відокремлення монолітів на вихід, товарність і розмірну структуру блочної продукції.

Для досягнення поставленої мети досліджено гірничо-геологічні умови Катеринівського родовища лабрадориту, проаналізовано особливості застосування комбінованих схем видобування, встановлено вплив способу

відокремлення монолітів на якість продукції та обґрунтовано раціональні параметри технологічного процесу.

У роботі використано комплекс сучасних методів дослідження, що включає аналіз науково-технічної інформації, гірничо-геологічні дослідження, виробничі спостереження, математичне моделювання та статистичну обробку результатів. Основою досліджень стали матеріали Катеринівського родовища лабрадориту та результати виробничих випробувань комбінованих технологічних схем.

У першому розділі проаналізовано сучасний стан каменевидобувної галузі та тенденції розвитку ринку природного облицювального каменю. Аналіз наукових публікацій і виробничого досвіду показав, що одним із найбільш перспективних напрямів підвищення ефективності видобування є використання комбінованих технологій, які поєднують алмазно-канатне різання з невибуховими способами відокремлення монолітів. Встановлено, що традиційні технології не завжди забезпечують належне збереження природної блочності масиву, особливо за складної системи тріщин. Це стало підґрунтям для визначення мети, завдань та напрямів подальших досліджень.

У другому розділі наведено характеристику гірничо-геологічних умов Катеринівського родовища лабрадориту та розроблено методику дослідження технологічних параметрів комбінованого видобування природного облицювального каменю. Визначено основні фактори, що впливають на формування блочної продукції, серед яких провідне значення має природна тріщинуватість масиву. Обґрунтовано систему показників, критеріїв та математичних залежностей, використаних для оцінювання впливу геометричних параметрів монолітів, параметрів буріння та способу їх остаточного відокремлення на вихід кондиційної блочної продукції. Встановлено, що середня відстань між основними системами природних тріщин становить близько 1,1 м, що визначає можливі розміри монолітів та суттєво впливає на ефективність їх відокремлення від масиву.

Досліджено вплив параметрів уступу на процес формування монолітів. Отримані результати свідчать, що зі збільшенням висоти уступу зростає об'єм моноліту та зменшуються питомі витрати на підготовчі роботи, однак одночасно підвищується ризик порушення його цілісності внаслідок перетину природних тріщин. Встановлено кількісні залежності між висотою уступу, об'ємом моноліту, питомими обсягами буріння та кратністю перетину природних тріщин, які стали основою для подальшого обґрунтування раціональних параметрів комбінованої технології видобування. У результаті визначено, що для умов досліджуваного родовища найбільш доцільною є висота уступу 3 м, яка забезпечує ефективне поєднання технологічних та якісних показників видобування.

Також досліджено вплив гірничо-геологічних і технологічних факторів на вихід кондиційної продукції. Встановлено, що якість блоків визначається не лише природними особливостями масиву, а й способом їх остаточного відокремлення від масиву. Отримані результати стали основою для подальшого обґрунтування параметрів комбінованої технології видобування та вибору найбільш ефективної схеми розробки родовища.

У третьому розділі обґрунтовано технологічні параметри комбінованого способу видобування природного облицювального каменю для умов Катеринівського родовища лабрадориту. Основну увагу приділено вибору раціональних параметрів монолітів, параметрів буріння та оцінюванню ефективності різних способів їх остаточного відокремлення від масиву.

Для дослідження було розглянуто дві комбіновані технологічні схеми: «алмазно-канатне різання + ГТХ «Літокол»» та «алмазно-канатне різання + гідроклини». В обох випадках алмазно-канатне різання використовувалося для формування основних площин відокремлення моноліту, а відмінність полягала у способі його остаточного відриву від масиву.

На основі математичного моделювання та аналізу виробничих даних встановлено раціональні параметри монолітів для умов родовища. Отримані

результати підтвердили доцільність формування монолітів розмірами $6 \times 6 \times 3$ м об'ємом 108 м^3 , що забезпечує ефективне використання природної блочності масиву та мінімізує ризик втрат, пов'язаних із природною тріщинуватістю. Встановлено математичні залежності між висотою уступу, об'ємом моноліту, питомими обсягами буріння та кратністю перетину природних тріщин, а також між параметрами буріння і показниками підготовчих робіт. На їх основі обґрунтовано раціональні параметри комбінованої технології: висоту уступу 3 м, моноліт розмірами $6 \times 6 \times 3$ м, діаметр шпурів 40 мм, крок шпурів 0,6 м та глибину шпурів 2,7–2,85 м.

Порівняння досліджуваних схем показало суттєву перевагу використання гідроклинів. Завдяки більш контрольованому розвитку тріщини відриву забезпечується краще збереження цілісності моноліту та підвищується вихід якісної блочної продукції. Частка блоків II–III груп зростає з 25,8 до 59,7 %, тобто у 2,31 раза. При цьому коефіцієнт товарності збільшується до 0,516, а коефіцієнт некондиційності зменшується до 0,484, що свідчить про більш повне використання запасів родовища.

Для комплексного оцінювання ефективності технологій використано інтегральний показник технологічної результативності, який враховує якість отриманої продукції та рівень використання природної блочності масиву. Встановлено, що для схеми «алмазно-канатне різання + гідроклини» його значення становить 0,308, тоді як для схеми із застосуванням ГТХ «Літокол» – 0,128. Таким чином, використання гідроклинів забезпечує підвищення технологічної результативності у 2,41 раза.

Наукова новизна одержаних результатів полягає у встановленні закономірностей впливу способу остаточного відокремлення монолітів на розмірну структуру блочної продукції, встановленні кількісних залежностей між висотою уступу, параметрами моноліту, природною тріщинуватістю масиву та обсягами підготовчих робіт, а також в удосконаленні підходу до оцінювання технологічної ефективності комбінованих схем видобування природного

облицювального каменю.

Практичне значення одержаних результатів полягає в обґрунтуванні раціональних параметрів комбінованої технології видобування природного облицювального каменю, розробленні математичних моделей прогнозування параметрів формування та відокремлення монолітів, а також рекомендацій щодо впровадження схеми «алмазно-канатне різання + гідроклини» на каменевидобувних підприємствах.

Отримані результати підтвердили доцільність застосування комбінованих технологій видобування природного облицювального каменю для умов Катеринівського родовища лабрадориту. Встановлені залежності між параметрами монолітів, природною тріщинуватістю масиву та показниками якості блочної продукції стали основою для обґрунтування раціональних параметрів технологічного процесу та вибору способу остаточного відокремлення монолітів. Запропоновані рішення спрямовані на підвищення виходу кондиційної продукції, більш повне використання запасів родовища та зменшення технологічних втрат під час видобування природного облицювального каменю.

Ключові слова: природний облицювальний камінь, лабрадорит, комбінований спосіб видобування, алмазно-канатне різання, гідроклини, газогенерувальні технологічні суміші, моноліт, блочна продукція, коефіцієнт товарності, природна тріщинуватість, математичне моделювання, ресурсозбереження, каменевидобування.

ABSTRACT

Ihnatiuk R.M. Substantiation of technological parameters for the extraction of natural facing stone by a combined method. – Qualifying scientific work on the rights of manuscript.

Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in the specialty 184 «Mining», field of knowledge 18 «Production and Technologies» – Zhytomyr Polytechnic State University, Zhytomyr, 2026.

The dissertation is devoted to solving an important scientific and practical problem related to the substantiation of technological parameters for the extraction of natural dimension stone using a combined mining method that takes into account the natural fracturing of the rock mass and the specific features of monolith separation. The research is aimed at increasing the yield of marketable block stone, improving the utilization of deposit reserves, and reducing technological losses.

Natural dimension stone is an important component of Ukraine's mineral resource base and is widely used in construction and architecture. At the same time, the efficiency of deposit development is determined not so much by the volume of extracted rock mass as by the yield of high-quality block products. Significant losses are often associated with the natural fracturing of the rock mass and the imperfection of technological schemes used for monolith separation. For this reason, special attention is paid to the application of combined technologies that integrate diamond wire sawing with non-explosive methods of stone separation, ensuring better preservation of its natural structure.

The purpose of the research is to substantiate the parameters of a combined dimension stone extraction technology by establishing the patterns governing the influence of monolith separation methods on the yield, marketability, and dimensional structure of block products.

To achieve this goal, the mining and geological conditions of the Katerynivske labradorite deposit were investigated, the specific features of applying combined extraction technologies were analyzed, the influence of monolith separation methods on

product quality was determined, and rational parameters of the technological process were substantiated.

The research employed a comprehensive set of modern methods, including the analysis of scientific and technical information, mining and geological investigations, field observations, mathematical modeling, and statistical processing of the obtained results. The study was based on materials from the Katerynivske labradorite deposit and the results of industrial testing of combined technological schemes.

The first chapter analyzes the current state of the dimension stone industry and the development trends of the natural facing stone market. A review of scientific publications and industrial experience demonstrated that one of the most promising ways to improve extraction efficiency is the use of combined technologies integrating diamond wire sawing with non-explosive methods of monolith separation. It was established that conventional technologies do not always ensure adequate preservation of the natural block structure of the rock mass, particularly under conditions of complex fracture systems. These findings served as the basis for defining the aim, objectives, and directions of further research.

The second chapter presents the mining and geological characteristics of the Katerynivske labradorite deposit and develops a methodology for investigating the technological parameters of combined dimension stone extraction. The main factors affecting the formation of block products were identified, among which natural fracturing of the rock mass plays a dominant role. A system of indicators, criteria, and mathematical relationships was substantiated and used to assess the influence of monolith geometry, drilling parameters, and monolith separation methods on the yield of marketable block products. It was established that the average spacing between the main systems of natural fractures is approximately 1.1 m, which determines the possible dimensions of monoliths and significantly affects the efficiency of their separation from the rock mass.

The influence of bench parameters on the monolith formation process was also investigated. The obtained results indicate that increasing bench height leads to an

increase in monolith volume and a reduction in specific preparation costs, while simultaneously increasing the risk of monolith damage due to the intersection of natural fractures. Quantitative relationships were established between bench height, monolith volume, specific drilling requirements, and the frequency of natural fracture intersections. These relationships formed the basis for substantiating rational parameters of the combined extraction technology. As a result, a bench height of 3 m was identified as the most suitable for the conditions of the studied deposit, providing an effective balance between technological and quality-related extraction indicators.

The influence of mining-geological and technological factors on the yield of marketable products was also investigated. It was established that block quality depends not only on the natural characteristics of the rock mass but also on the method used for final monolith separation. The obtained results served as the basis for further substantiation of the parameters of the combined extraction technology and for selecting the most efficient deposit development scheme.

The third chapter substantiates the technological parameters of the combined extraction method for natural dimension stone under the conditions of the Katerynivske labradorite deposit. Particular attention was paid to the selection of rational monolith dimensions, drilling parameters, and the assessment of the effectiveness of different methods for final monolith separation from the rock mass.

Two combined technological schemes were considered: “diamond wire sawing + Litokol gas-generating mixture” and “diamond wire sawing + hydraulic wedges.” In both cases, diamond wire sawing was used to create the main separation surfaces of the monolith, while the difference between the schemes lay in the method used for its final detachment from the rock mass.

Based on mathematical modeling and analysis of industrial data, rational monolith parameters were established for the deposit conditions. The results confirmed the feasibility of forming monoliths measuring $6 \times 6 \times 3$ m with a volume of 108 m^3 , which ensures efficient utilization of the natural block structure of the rock mass and minimizes losses associated with natural fracturing. Mathematical relationships were established

between bench height, monolith volume, specific drilling requirements, and the frequency of natural fracture intersections, as well as between drilling parameters and indicators of preparatory work. On this basis, the rational parameters of the combined technology were substantiated: a bench height of 3 m, monolith dimensions of $6 \times 6 \times 3$ m, a borehole diameter of 40 mm, a borehole spacing of 0.6 m, and a borehole depth of 2.7–2.85 m.

A comparison of the investigated technological schemes revealed a significant advantage of hydraulic wedges. Owing to a more controlled development of the separation crack, the integrity of the monolith is better preserved and the yield of high-quality block products is increased. The share of blocks belonging to Groups II and III increased from 25.8% to 59.7%, i.e., by a factor of 2.31. At the same time, the marketability coefficient increased to 0.516, while the non-marketable product coefficient decreased to 0.484, indicating a more efficient utilization of deposit reserves.

For a comprehensive assessment of technological efficiency, an integrated technological performance indicator was used, taking into account both product quality and the degree of utilization of the natural block structure of the rock mass. It was established that its value reaches 0.308 for the “diamond wire sawing + hydraulic wedges” scheme, compared to 0.128 for the “diamond wire sawing + Litokol gas-generating mixture” scheme. Thus, the use of hydraulic wedges increases technological performance by a factor of 2.41.

The scientific novelty of the obtained results lies in establishing the patterns of influence of monolith separation methods on the dimensional structure of block products, determining quantitative relationships between bench height, monolith parameters, natural rock mass fracturing, and the volume of preparatory operations, as well as improving the approach to assessing the technological efficiency of combined dimension stone extraction schemes.

The practical significance of the obtained results consists in substantiating rational parameters of a combined dimension stone extraction technology, developing mathematical models for predicting monolith formation and separation parameters, and

formulating recommendations for the implementation of the “diamond wire sawing + hydraulic wedges” scheme at dimension stone mining enterprises.

The obtained results confirmed the feasibility of applying combined technologies for the extraction of natural dimension stone under the conditions of the Katerynivske labradorite deposit. The established relationships between monolith parameters, natural rock mass fracturing, and block product quality indicators formed the basis for substantiating rational technological parameters and selecting an appropriate method for final monolith separation. The proposed solutions are aimed at increasing the yield of marketable products, improving the utilization of deposit reserves, and reducing technological losses during the extraction of natural dimension stone.

Keywords: natural facing stone, labradorite, combined extraction method, diamond wire cutting, hydraulic wedges, gas-generating mixtures, monolith, block products, marketability coefficient, natural fracturing, mathematical modelling, resource conservation, stone mining.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації

Статті та публікації у періодичних наукових виданнях, проіндексованих у

базах даних Web of Science Core Collection та/або Scopus

1. Піскун І.А., Остафійчук Н.М., Ігнатюк Р.М., Куницька М.С., Байда Д.М. Оптимізація моделювання каолінових покладів за допомогою геостатистичних методів просторової інтерполяції. *Мінеральні ресурси України*. 2025. Вип. 4. С. 41–47. DOI: <https://doi.org/10.31996/mru.2025.4.41-47> (0,5 д.а., особисто автору належить 0,15 д.а.: виконано аналіз результатів геостатистичного моделювання, здійснено узагальнення щодо можливості використання підходів для оцінки блочності покладів природного каменю).

2. Піскун І.А., Котенко В.В., Махно А.М., Ігнатюк Р.М., Меринов Р.Р. Оптимізація структурно-механічних властивостей кам'яних виробів методом внутрішнього армування. *Мінеральні ресурси України*. 2025. Вип. 1. С. 76–81. DOI: <https://doi.org/10.31996/mru.2025.1.76-81> (0,45 д.а., особисто автору належить 0,12 д.а.: досліджено вплив структурних параметрів природного каменю на міцність виробів, виконано інтерпретацію результатів експериментальних досліджень).

Статті у наукових фахових виданнях України

3. Піскун І.А., Ігнатюк Р.М., Луценко Д.О. Роль експорту природного каменю у формуванні валового регіонального продукту Житомирщини. *Технічна інженерія*. 2025. Вип. 1(95). С. 187–193. DOI: [https://doi.org/10.26642/ten-2025-1\(95\)-187-193](https://doi.org/10.26642/ten-2025-1(95)-187-193) (0,5 д.а., особисто автору належить 0,2 д.а.: проведено аналіз виробничо-економічних показників підприємств каменевидобувної галузі та узагальнено фактори підвищення ефективності видобування).

4. Ігнатюк Р.М., Подчашинський Ю.О., Меринов Р.Р. Порівняння енергетичної та ресурсної ефективності облаштування первинного врубу природного каменю задля мінімізації відходів. *Збірник наукових праць НТУ «Дніпровська політехніка»*. 2025. № 80. С. 64–73. DOI:

<https://doi.org/10.33271/crpnmu/80.064> (0,6 д.а., особисто автору належить 0,35 д.а.: розроблено підхід до оцінювання параметрів формування первинного врубів та обґрунтовано енергоощадні технологічні рішення).

5. Піскун І.А., Пико В.О., Котенко В.В., Ігнатюк Р.М. Використання методу фотоаналізу для підвищення точності моделі KUZ-RAM у прогнозуванні фрагментації породи. *Науковий вісник ДонНТУ*. 2024. Вип. 2(13). С. 91–101. DOI: <https://doi.org/10.31474/2415-7902-2024-2-13-91-101> (0,55 д.а., особисто автору належить 0,15 д.а.: здійснено оцінювання впливу параметрів буропідричних робіт на гранулометричний склад гірської маси).

6. Мельник-Шамрай В.В., Шамрай В.І., Пацева І.Г., Ігнатюк Р.М. Оцінка впливу гірничо-видобувної галузі на довкілля: система управління відходами. *Екологічні науки*. 2024. № 4(55). С. 164–168 (0,4 д.а., особисто автору належить 0,1 д.а.: узагальнено екологічні аспекти поводження з відходами каменевидобування).

7. Котенко В.В., Піскун І.А., Ігнатюк Р.М. Дослідження міри впливу розмірів блоків природного каменю на ефективність роботи вантажного устаткування за умов ПП «Кванта-ЛЧ». *Технічна інженерія*. 2024. Вип. 93. С. 356–362 DOI: [https://doi.org/10.26642/ten-2024-1\(93\)-356-362](https://doi.org/10.26642/ten-2024-1(93)-356-362) (0,45 д.а., особисто автору належить 0,2 д.а.: проведено дослідження параметрів блоків природного каменю та їх впливу на продуктивність кар'єрного транспорту).

8. Шамрай В.І., Мельник-Шамрай В.В., Темченко А.Г., Махно А.М., Ігнатюк Р.М. Дослідження якісних властивостей відходів каменевидобування та каменеобробки з метою їх використання як сировини для виготовлення геополімерного бетону. *Технічна інженерія*. 2023. Вип. 1(91). С. 385–397. DOI: [https://doi.org/10.26642/ten-2023-1\(91\)-385-397](https://doi.org/10.26642/ten-2023-1(91)-385-397) (0,6 д.а., особисто автору належить 0,15 д.а.: проведено аналіз фізико-механічних характеристик відходів каменевидобування).

9. Шамрай В.І., Мельник-Шамрай В.В., Шкабара Ю.В., Микитенко С.В., Ігнатюк Р.М. Аналіз сучасного стану каменедобувної та каменеобробної галузі

України. *Технічна інженерія*. 2022. Вип. 2(90). С. 193–199. DOI: [https://doi.org/10.26642/ten-2022-2\(90\)-193-199](https://doi.org/10.26642/ten-2022-2(90)-193-199) (0,45 д.а., особисто автору належить 0,12 д.а.: узагальнено виробничі тенденції розвитку каменевидобувних підприємств).

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

10. Ігнатюк Р.М., Шамрай В.І. Аналіз екологічних переваг безвибухових методів видобутку блочного каменю та їх відповідність вимогам директив ЄС про шум і вібрацію. *Тези III Всеукраїнської науково-практичної конференції «Сучасні проблеми гірництва та будівництва»*, 20 листопада 2025 р. Житомир : Житомирська політехніка, 2025. С. 129 (0,15 д.а., особисто автору належить 0,08 д.а.: проаналізовано екологічні аспекти застосування безвибухових технологій видобування блочного каменю).

11. Piskun I., Sitsinska L., Ihnatiuk R. Optimisation of kaolin deposit modeling using geostatistical methods of spatial interpolation. *Sustainable Extraction and Processing of Raw Materials*. 2025. Vol. 6. P. 87–94. DOI: <https://doi.org/10.58903/dw18921570> (0,2 д.а., особисто автору належить 0,07 д.а.: виконано аналіз можливості застосування методів просторового моделювання для оцінювання гірничо-геологічних умов розробки родовищ).

12. Піскун І.А., Ігнатюк Р.М., Луценко Д.О. Стан та стратегічні перспективи експорту природного каменю Житомирської області. *Тези XV Міжнародної науково-технічної конференції аспірантів та молодих учених «Наукова весна»*, 26–28 березня 2025 р. Дніпро : НТУ «Дніпровська політехніка», 2025. С. 321–322 (0,15 д.а., особисто автору належить 0,07 д.а.: узагальнено фактори розвитку ринку природного каменю та визначено перспективи підвищення ефективності видобування).

13. Ігнатюк Р.М., Шамрай В.І. Порівняння продуктивності крана і навантажувача при видобутку блочного каменю. *Тези Всеукраїнської науково-практичної online-конференції аспірантів, молодих учених та студентів*,

присвяченої Дню науки, 13–17 травня 2024 р. Житомир : Житомирська політехніка, 2024. С. 158–159 (0,15 д.а., особисто автору належить 0,08 д.а.: проведено оцінювання впливу технологічних параметрів навантажувальних робіт на продуктивність видобування).

14. Ігнатюк Р.М., Шамрай В.І. Визначення затрат робочого часу при відпрацюванні первинного врубу в умовах ПП «Кванта-ЛЧ». *Тези II Всеукраїнської науково-практичної конференції «Сучасні проблеми гірництва та будівництва»*, 21 листопада 2024 р. Житомир : Житомирська політехніка, 2024. С. 32–33 (0,15 д.а., особисто автору належить 0,1 д.а.: досліджено тривалість виконання технологічних операцій при формуванні первинного врубу).

15. Котенко В.В., Піскун І.А., Ігнатюк Р.М., Наумов Я.О. Автоматизація моделювання розподілу напружень у виробках з каменю. *Тези XIII Міжнародної науково-практичної конференції «Коштовне та декоративне каміння: актуальні питання гемологічної експертизи, геології, видобутку, обробки і використання»*, 7–8 листопада 2024 р. Київ : Державний гемологічний центр України, 2024. С. 29–33 (0,2 д.а., особисто автору належить 0,07 д.а.: виконано аналіз впливу напруженого стану на якісні характеристики кам'яних виробів).

16. Ігнатюк Р.М., Шамрай В.І. Дослідження тривалості робочого циклу фронтального навантажувача. *Тези Всеукраїнської науково-практичної online-конференції здобувачів вищої освіти і молодих учених, присвяченої Дню науки*, 13–17 травня 2024 р. Житомир : Житомирська політехніка, 2024. С. 160 (0,1 д.а., особисто автору належить 0,07 д.а.: визначено структуру робочого циклу навантажувача при видобуванні блочного каменю).

17. Shamrai V., Melnyk-Shamrai V., Ihnatiuk R., Naumov Ya. Current state of waste management of stone processing and stone extraction enterprises of Ukraine. *Collection of abstracts XVIII International Scientific and Practical Conference «Innovations in Scientific Research: World Experience and Realities»*, April 10–12, 2024, Riga, Latvia. P. 205–209 (0,2 д.а., особисто автору належить 0,05 д.а.: узагальнено підходи до поводження з відходами каменевидобування).

18. Ігнатюк Р.М., Шамрай В.І. Аналіз обсягів утворення відходів гірничих підприємств. *Тези Всеукраїнської науково-практичної online-конференції здобувачів вищої освіти і молодих учених, присвяченої Дню науки, 15–19 травня 2023 р. Житомир : Житомирська політехніка, 2023. С. 160–161 (0,15 д.а., особисто автору належить 0,1 д.а.: проведено оцінювання факторів формування відходів при видобуванні каменю).*

19. Ігнатюк Р.М., Шамрай В.І. Оцінка зміни колірних показників поверхні природного каменю після її хімічної обробки. *Тези IX Всеукраїнської науково-практичної конференції «Перспективи розвитку гірничої справи та раціонального використання природних ресурсів», 17 листопада 2022 р. Житомир : Житомирська політехніка, 2022. С. 38–41 (0,15 д.а., особисто автору належить 0,08 д.а.: досліджено вплив технологічних факторів обробки на декоративні властивості природного каменю).*

ЗМІСТ

ЗМІСТ	17
ВСТУП.....	19
РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИЧНІ ТА ТЕХНОЛОГІЧНІ ОСНОВИ	
ВИДОБУВАННЯ БЛОЧНОГО ПРИРОДНОГО КАМЕНЮ	28
1.1. Аналіз стану і тенденцій розвитку каменевидобувної галузі та ринку природного облицювального каменю	28
1.2. Аналіз існуючих технологій видобування блочного каменю та їх техніко-економічна ефективність	40
1.3. Екологічні та ресурсозберігаючі аспекти застосування комбінованих технологій видобування	53
Висновки до розділу 1	61
РОЗДІЛ 2. МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ КОМБІНОВАНОГО ВИДОБУВАННЯ ПРИРОДНОГО ОБЛИЦЮВАЛЬНОГО КАМЕНЮ	63
2.1. Характеристика об'єкта та умов проведення досліджень	63
2.2. Методика дослідження процесів формування первинного врубу	77
2.3. Методика математичного моделювання параметрів формування монолітів	87
Висновки до розділу 2	90
РОЗДІЛ 3. РОЗРОБЛЕННЯ ТА ОБҐРУНТУВАННЯ КОМБІНОВАНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ ВИДОБУВАННЯ ОБЛИЦЮВАЛЬНОГО КАМЕНЮ	92
3.1. Обґрунтування технологічних параметрів комбінованого способу видобування.....	92
3.2. Розробка рекомендацій щодо впровадження комбінованої технології на каменевидобувних підприємствах	110
3.3. Математичне моделювання технологічних параметрів комбінованого видобування природного облицювального каменю	123

Висновки до розділу 3	135
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	137
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	140
ДОДАТКИ.....	146

ВСТУП

Актуальність.

Природний облицювальний камінь залишається одним із найбільш затребуваних матеріалів у будівництві та архітектурі завдяки високим декоративним і експлуатаційним властивостям. Водночас ефективність освоєння родовищ блочного каменю значною мірою визначається не обсягами видобування гірської маси, а кількістю та якістю отриманої кондиційної блочної продукції. За сучасних умов господарювання особливого значення набуває підвищення рівня використання запасів родовищ, зменшення технологічних втрат і скорочення обсягів відходів каменевидобування.

Практика розробки родовищ облицювального каменю свідчить, що традиційні технології не завжди забезпечують необхідний рівень збереження природної блочності масиву. Особливо гостро ця проблема проявляється на родовищах із розвиненою системою природних тріщин, де навіть незначні порушення технологічного процесу можуть призводити до зниження виходу кондиційних блоків та збільшення кількості некондиційної продукції. У таких умовах особливого значення набуває застосування комбінованих технологій, які поєднують алмазно-канатне різання з невибуховими способами відокремлення монолітів.

Незважаючи на значну кількість досліджень у сфері видобування природного каменю, питання вибору раціональних технологічних параметрів комбінованих схем видобування залишаються недостатньо вивченими. Зокрема, потребують подальшого дослідження закономірності впливу геометричних параметрів монолітів, природної тріщинуватості масиву та способу остаточного відокремлення на вихід кондиційної блочної продукції, коефіцієнт товарності та ефективність використання запасів родовища.

Для родовищ лабрадориту Житомирської області, зокрема Катеринівського родовища, зазначені питання мають особливе практичне

значення, оскільки природна тріщинуватість масиву істотно впливає на результати видобування та економічні показники роботи підприємств. У зв'язку з цим актуальним науково-практичним завданням є обґрунтування технологічних параметрів комбінованого способу видобування природного облицювального каменю, що забезпечують підвищення виходу кондиційної продукції, більш повне використання природної блочності масиву та зниження технологічних втрат.

Отже, актуальність дисертаційного дослідження зумовлена необхідністю підвищення ефективності видобування природного облицювального каменю шляхом науково обґрунтованого вибору параметрів комбінованої технології формування та відокремлення монолітів з урахуванням гірничо-геологічних умов родовища.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Робота виконувалася на кафедрі гірничих технологій та будівництва ім. проф. Бакка М.Т. Державного університету «Житомирська політехніка» в межах науково-дослідної теми «Дослідження закономірностей зношування бурового інструменту задля оптимізації та підвищення продуктивності операції буріння» (№ ДР 0124U002798), у межах якої автор брав участь як виконавець, та у рамках зазначеної тематики здійснювалися дослідження процесів буріння, що стало підґрунтям для оцінки можливостей збільшення ефективності буріння блочного каменю. Також робота виконана в рамках Перспективного плану розвитку наукового напрямку «Технічні науки» Державного університету «Житомирська політехніка» за бюджетною програмою 2201390 «Підтримка пріоритетних напрямів наукових досліджень і науково-технічних (експериментальних) розробок у закладах вищої освіти» (наказ МОН від 25.03.2021 №372).

Мета дослідження полягає в обґрунтуванні параметрів комбінованої технології видобування облицювального каменю шляхом встановлення закономірностей впливу способу відокремлення монолітів на вихід, товарність

та розмірну структуру блочної продукції для підвищення ефективності використання запасів родовища.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

1. Проаналізувати гірничо-геологічні умови Катеринівського родовища лабрадориту та встановити фактори, що визначають формування якісних і кількісних показників блочної продукції.

2. Дослідити особливості застосування комбінованих технологій видобування природного облицювального каменю на основі алмазно-канатного різання та невибухових способів відокремлення монолітів.

3. Встановити закономірності впливу способу остаточного відокремлення монолітів на коефіцієнт товарності, коефіцієнт некондиційності, розмірну структуру блочної продукції та рівень використання природної блочності масиву.

4. Обґрунтувати раціональні геометричні параметри монолітів і параметри їх відокремлення з урахуванням природної тріщинуватості масиву та технологічних особливостей комбінованого способу видобування.

5. Встановити математичні залежності між висотою уступу, геометричними параметрами моноліту, обсягами підготовчих робіт та показниками ефективності процесу видобування облицювального каменю.

6. Виконати оцінювання технологічної ефективності досліджуваних комбінованих схем видобування та визначити раціональний спосіб остаточного відокремлення монолітів.

7. Розробити практичні рекомендації щодо впровадження раціональної комбінованої технології видобування природного облицювального каменю на каменевидобувних підприємствах.

Об'єкт дослідження – технологічні процеси видобування природного облицювального каменю блочної структури в умовах родовищ лабрадориту.

Предмет дослідження – закономірності формування якісних та кількісних показників блочної продукції при застосуванні комбінованих схем видобування на основі алмазно-канатного різання, ГТХ «Літокол» та гідроклинів.

Методи досліджень.

У дисертаційній роботі застосовано комплекс сучасних наукових методів дослідження. Зокрема, проведено аналіз і узагальнення науково-технічної інформації щодо технологій видобування природного облицювального каменю та підвищення ефективності використання запасів родовищ. Виконано гірничо-геологічні дослідження умов залягання лабрадориту та природної тріщинуватості масиву Катеринівського родовища. Для оцінювання ефективності комбінованих схем видобування використано результати виробничих досліджень із застосуванням алмазно-канатного різання, гідроклинів і газогенерувальних технологічних сумішей. Закономірності впливу параметрів монолітів та способів їх відокремлення на показники якості блочної продукції встановлювалися із застосуванням математичного моделювання. Обробку та узагальнення результатів досліджень здійснювали методами математичної статистики.

Технології штучного інтелекту (зокрема ChatGPT) використовувалися: 1) для пошуку, систематизації та попереднього аналізу науково-технічної інформації щодо сучасних технологій видобування природного облицювального каменю, застосування алмазно-канатного різання та невибухових способів відокремлення монолітів; 2) для перекладу окремих наукових публікацій, представлених у міжнародних наукометричних базах даних «Scopus» та «Web of Science», під час вивчення особливостей формування блочної продукції та підвищення ефективності каменевидобування; 3) для пошуку окремих нормативних, довідкових та аналітичних матеріалів, що стосуються розробки родовищ природного каменю, ресурсозбереження та раціонального використання надр.

Технології штучного інтелекту не використовувалися для генерування наукових результатів, формулювання наукової новизни, висновків, наукових положень, що виносяться на захист, а також для виконання математичного моделювання й інтерпретації результатів досліджень. Усі виробничі дослідження, розрахунки, побудова математичних залежностей, аналіз отриманих результатів та формулювання наукових положень виконувалися автором самостійно.

Наукову новизну отриманих результатів представлено науковими положеннями, в яких

Вперше:

- встановлено закономірності впливу способу остаточного відокремлення монолітів на формування розмірної структури блочної продукції лабрадориту, які полягають у збільшенні частки блоків II–III груп до 59,7 % при використанні гідроклінів, що у 2,31 раза перевищує відповідний показник для схеми із застосуванням ГТХ «Літокол»;

- встановлено кількісні залежності між висотою уступу, об'ємом моноліту, питомими обсягами буріння та кратністю перетину природних тріщин, що дозволило обґрунтувати раціональні параметри формування монолітів з урахуванням природної тріщинуватості масиву;

- обґрунтовано раціональні параметри комбінованого видобування облицювального каменю на основі комплексного врахування геометричних параметрів моноліту, природної тріщинуватості масиву та параметрів його відокремлення, що забезпечує підвищення технологічної результативності видобування у 2,41 раза порівняно зі схемою на основі ГТХ «Літокол».

Удосконалено:

- наукові положення щодо вибору параметрів формування монолітів облицювального каменю, які, на відміну від існуючих підходів, враховують одночасний вплив природної тріщинуватості масиву та способу відокремлення на якість блочної продукції.

– підходи до оцінювання технологічної ефективності комбінованих способів видобування облицювального каменю на основі комплексного врахування коефіцієнта товарності, коефіцієнта некондиційності та розмірної структури блочної продукції.

Набуло подальшого розвитку

– Наукові уявлення про вплив невибухових способів відокремлення монолітів на використання природної блочності масиву та формування якісних показників блочної продукції.

Практичне значення одержаних результатів полягає в тому, що:

- за результатами досліджень обґрунтовано раціональні параметри комбінованої технології видобування природного облицювального каменю, які передбачають формування монолітів розмірами $6 \times 6 \times 3$ м з подальшим їх відокремленням гідроклинами при діаметрі шпурів 40 мм, кроці 0,6 м та глибині 2,7–2,85 м. Запропоновані параметри можуть бути використані під час проєктування та вдосконалення технологічних схем розробки родовищ лабрадориту та інших родовищ природного облицювального каменю з подібними гірничо-геологічними умовами;

- практичну цінність становлять розроблені математичні моделі, що встановлюють взаємозв'язок між висотою уступу, параметрами моноліту, природною тріщинуватістю масиву, параметрами буріння та показниками технологічної ефективності. Їх використання дозволяє обґрунтовувати технологічні рішення на стадії проєктування гірничих робіт;

- встановлено, що застосування схеми «алмазно-канатне різання + гідроклини» забезпечує збільшення частки блоків II–III груп до 59,7 %, підвищення коефіцієнта товарності до 0,516 та зменшення коефіцієнта некондиційності до 0,484, що сприяє більш повному використанню природної блочності масиву та скороченню технологічних втрат;

- розроблені рекомендації щодо вибору параметрів формування та відокремлення монолітів можуть бути використані каменевидобувними

підприємствами при впровадженні комбінованих технологій видобування природного облицювального каменю та підготовці проєктної документації;

- результати дисертаційної роботи впроваджено у виробничу діяльність ТОВ «КЛМ Гранресурс», що підтверджується відповідним актом впровадження. Крім того, результати досліджень можуть бути використані в освітньому процесі під час підготовки здобувачів вищої освіти за спеціальністю 184 «Гірництво» та спорідненими інженерними спеціальностями.

Обґрунтованість наукових положень і достовірність отриманих результатів забезпечується:

– використанням сучасних методів наукових досліджень, що включають аналіз та узагальнення науково-технічної інформації, польові спостереження, виробничі дослідження, математичне моделювання та статистичну обробку результатів;

– достатнім обсягом вихідних експериментальних даних, отриманих під час дослідження процесів видобування природного облицювального каменю в умовах Катеринівського родовища лабрадориту;

– використанням фактичних результатів виробничих випробувань комбінованих схем видобування із застосуванням алмазно-канатного різання, гідроклінів та газогенерувальних технологічних сумішей;

– збіжністю результатів теоретичних досліджень із даними виробничих спостережень та практикою розробки родовищ природного облицювального каменю;

– порівнянням експериментальних даних із результатами досліджень інших авторів.

Особистий внесок здобувача. Дисертація є закінченою, самостійно виконаною науковою працею. Наукові розробки, висновки, рекомендації, положення, які подано у дисертаційній роботі, є результатом самостійно проведеного наукового дослідження. Всі основні результати дисертаційного

дослідження, які представлені до захисту, одержані автором особисто (звіт подібності сформований за допомогою програми StrikePlagiarism (додаток Г).

Апробація результатів дисертації. Головні результати та висновки дисертаційної роботи оприлюднені на всеукраїнських науково-практичних конференціях: III Всеукраїнській науково-практичній конференції «Сучасні проблеми гірництва та будівництва» (20 листопада 2025 р.), XV Міжнародній науково-технічній конференції аспірантів та молодих учених «Наукова весна», (26–28 березня 2025 р.), Всеукраїнській науково-практичній online-конференції аспірантів, молодих учених та студентів, присвяченої Дню науки (13–17 травня 2024 р.), II Всеукраїнській науково-практичній конференції «Сучасні проблеми гірництва та будівництва» (21 листопада 2024 р.), XIII Міжнародної науково-практичної конференції «Коштовне та декоративне каміння: актуальні питання гемологічної експертизи, геології, видобутку, обробки і використання» (7–8 листопада 2024 р.), XVIII International Scientific and Practical Conference «Innovations in Scientific Research: World Experience and Realities». (April 10–12, 2024), Всеукраїнській науково-практичній online-конференції здобувачів вищої освіти і молодих учених, присвяченої Дню науки (15–19 травня 2023 р.), IX Всеукраїнській науково-практичній конференції «Перспективи розвитку гірничої справи та раціонального використання природних ресурсів» (17 листопада 2022 р.).

Повнота опублікування результатів дослідження. Основні положення наукових розробок, отриманих здобувачем, опубліковано у 19 наукових працях загальним обсягом 6,55 друк. арк. (авторський обсяг – 2,46 друк. арк.), із них 9 статей у наукових фахових виданнях загальним обсягом 4,50 друк. арк. (авторський обсяг – 1,54 друк. арк.); 10 публікацій у матеріалах і тезах конференцій загальним обсягом 2,05 друк. арк. (авторський обсяг – 0,92 друк. арк.) (додаток А).

Структура і обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, трьох розділів і висновку, викладених на 156 сторінках основного

тексту, містить 30 рисунків, 27 таблиць, список використаних джерел із 67 найменувань на 6 сторінках та 4 додатків.

РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИЧНІ ТА ТЕХНОЛОГІЧНІ ОСНОВИ ВИДОБУВАННЯ БЛОЧНОГО ПРИРОДНОГО КАМЕНЮ

1.1. Аналіз стану і тенденцій розвитку каменевидобувної галузі та ринку природного облицювального каменю

Каменевидобувна галузь посідає важливе місце у структурі гірничодобувного комплексу, забезпечуючи сировиною підприємства будівельної індустрії, архітектурно-декоративного виробництва та суміжних галузей. Значення природного облицювального каменю в останні десятиліття суттєво зросло, що пов'язано не лише зі збільшенням обсягів будівництва, а й з підвищенням вимог до довговічності, естетичних характеристик та екологічної безпечності будівельних матеріалів. Завдяки високим фізико-механічним властивостям природний камінь залишається конкурентоспроможним навіть за умов активного розвитку штучних облицювальних матеріалів. Водночас ефективність функціонування галузі визначається не лише якістю мінеральної сировини, а й рівнем технологічного забезпечення процесів видобування, ступенем комплексності освоєння родовищ та величиною втрат корисної копалини на різних стадіях виробництва [1].

За результатами галузевих досліджень і статистичних оглядів світовий ринок природного облицювального каменю демонструє стабільну тенденцію до зростання. Середньорічні темпи розвитку ринку оцінюються на рівні 4–6 %, що пояснюється розширенням інфраструктурного будівництва, збільшенням попиту на декоративні матеріали та активізацією міжнародної торгівлі кам'яною продукцією. При цьому структура ринку характеризується значною територіальною нерівномірністю, оскільки основні обсяги виробництва та експорту зосереджені у відносно невеликій кількості країн. Для оцінювання сучасних тенденцій розвитку галузі доцільно проаналізувати узагальнені виробничо-економічні показники провідних країн світу, наведені в табл. 1.1.

Таблиця 1.1.

Аналітична характеристика світового ринку природного облицювального каменю

Країна	Обсяг видобутку, млн т/рік	Частка світового виробництва, %	Основні види каменю	Обсяг експорту, млрд \$	Рівень втрат, %	Основні технології
Китай	120–150	30–35	граніт, мармур	8–10	30–50	комбіновані, канатне різання
Індія	70–90	15–20	граніт	3–5	25–40	невибухові
Туреччина	50–70	10–12	мармур	2–3	20–35	канатне різання
Італія	20–30	5–7	мармур	2–2,5	15–30	високоточні невибухові
Іспанія	15–25	4–6	мармур, граніт	1–1,5	20–35	комбіновані
Бразилія	20–30	5–6	граніт	1,5–2	25–45	комбіновані
Іран	15–20	3–4	мармур	0,5–1	30–50	вибухові + механічні
Україна	5–10	<2	граніт, лабрадорит	0,2–0,4	60–80	переважно вибухові

Аналіз наведених даних свідчить, що домінуючі позиції на світовому ринку займають Китай та Індія, на які припадає понад 40 % загального обсягу виробництва природного каменю. Лідерство цих країн пояснюється поєднанням значної мінерально-сировинної бази, високого рівня механізації виробництва та широкого впровадження сучасних технологій видобування. Водночас для України характерними залишаються високі втрати блочної сировини та недостатній рівень використання потенціалу родовищ природного облицювального каменю. Це свідчить про наявність суттєвого резерву підвищення ефективності галузі за рахунок удосконалення технологічних схем розробки родовищ.

Мінерально-сировинну основу виробництва облицювального каменю формують переважно магматичні та метаморфічні породи, серед яких найбільше практичне значення мають граніти, габро, лабрадорити та гнейси. Їх широке використання обумовлене поєднанням високої міцності, морозостійкості,

декоративності та стійкості до зовнішніх впливів. Разом із тим досвід експлуатації родовищ свідчить, що навіть породи одного петрографічного складу можуть суттєво відрізнятися за придатністю до блочного видобування. Основною причиною цього є неоднорідність геологічної будови масиву та різний ступінь його тріщинуватості.

У сучасних наукових дослідженнях саме тріщинуватість розглядається як один із визначальних факторів, що впливають на вихід кондиційних блоків і вибір технології видобування [2]. Водночас аналіз літературних джерел показує відсутність єдиного підходу до оцінювання її впливу. Одні дослідники акцентують увагу на ролі регіональних тектонічних порушень, інші вважають визначальними локальні системи тріщин та особливості внутрішньої будови породи. Незважаючи на відмінності у підходах, більшість авторів погоджується з тим, що характер тріщинуватості безпосередньо визначає можливість ефективного видобування блоків природного каменю та рівень технологічних втрат.

Схематично особливості формування тріщинуватості та природної блочності гірського масиву наведено на рис. 1.1.



Рис. 1.1. Схема тріщинуватості та природної блочності гірського масиву

Поряд із значним ресурсним потенціалом родовищ кристалічних порід в Україні їх фактичне використання для виробництва блочної продукції залишається недостатнім. У більшості випадків такі родовища розробляються як щебеневі кар'єри, де основною продукцією виступають нерудні будівельні матеріали, тоді як видобування блоків здійснюється епізодично або взагалі не передбачається технологічною схемою. Причинами такої ситуації є як історично сформована орієнтація підприємств на масове виробництво щебеню, так і недостатній рівень впровадження технологій, спрямованих на збереження природної блочності масиву. Крім того, на багатьох підприємствах відсутні методичні підходи до попередньої оцінки перспективності окремих ділянок родовища для блочного видобування, що ускладнює прийняття обґрунтованих технологічних рішень [4].

Наслідком такого підходу є втрата значної частини потенційно цінної сировини ще на початкових стадіях розробки родовища. Використання вибухових методів призводить до формування додаткової техногенної тріщинуватості, яка суттєво знижує придатність породи до виробництва облицювальної продукції. За оцінками різних дослідників, сумарні втрати блочної сировини можуть досягати 60–80 %, що свідчить про недостатню ефективність існуючих підходів до освоєння родовищ природного каменю.

Важливим аспектом аналізу є економічна доцільність видобування блочної продукції. Незважаючи на співставний рівень витрат на виконання основних гірничих операцій, ринкова вартість блоків природного каменю суттєво перевищує вартість щебеневої продукції. Це пояснюється високими вимогами до якості блоків, складністю їх подальшої обробки та значною доданою вартістю готових облицювальних виробів. У результаті навіть незначне підвищення виходу кондиційних блоків може забезпечувати відчутне покращення фінансових показників діяльності підприємства [4].

Порівняння економічних результатів діяльності провідних світових виробників свідчить, що найбільш ефективними є технології, орієнтовані не на

максимізацію обсягів видобування гірської маси, а на підвищення частки товарної блочної продукції. Саме тому у країнах, які займають провідні позиції на світовому ринку природного каменю, значна увага приділяється розвитку високоточних невибухових методів відокремлення блоків, удосконаленню систем контролю якості масиву та впровадженню цифрових технологій управління виробництвом [5].

На відміну від зазначених тенденцій, вітчизняні підприємства переважно використовують вибухові технології, основною перевагою яких є висока продуктивність та відносно невисока собівартість робіт. Однак аналіз результатів досліджень свідчить, що використання вибухових навантажень супроводжується виникненням складного напружено-деформованого стану масиву. У результаті формуються не лише видимі тріщини, а й приховані дефекти структури породи, які можуть проявлятися під час транспортування або подальшої обробки блоків. Це суттєво знижує вихід кондиційної продукції та погіршує її експлуатаційні характеристики [6].

Особливо важливим є той факт, що зона техногенного впливу вибуху часто перевищує безпосередні межі руйнування масиву. За результатами експериментальних досліджень встановлено, що пошкодження можуть поширюватися на відстані, які у 1,5–2 рази перевищують геометричні параметри вибою. У таких умовах навіть візуально монолітні ділянки можуть містити приховані дефекти, що негативно впливають на якість майбутніх блоків.

Разом із тим результати виробничих спостережень показують, що навіть у межах діючих щебеневих кар'єрів зберігаються окремі ділянки масиву з відносно високим ступенем структурної цілісності. Наявність таких зон створює передумови для впровадження комбінованих підходів до освоєння родовищ, коли вибір технології здійснюється з урахуванням фактичних гірничо-геологічних умов конкретної ділянки. У цьому випадку найбільш перспективні зони можуть відпрацьовуватися із застосуванням невибухових технологій, тоді як інші частини родовища використовуються для виробництва щебеневої продукції [4].

Практичний досвід свідчить, що реалізація такого підходу дозволяє більш повно використовувати ресурсний потенціал родовища та підвищувати сумарний вихід товарної продукції. За окремими оцінками, впровадження комбінованих схем розробки забезпечує збільшення обсягів товарної продукції на 25–50 % порівняно з традиційними технологіями, орієнтованими виключно на виробництво щебеню.

Серед сучасних способів видобування блочного природного каменю особливе місце займають невибухові технології, які забезпечують більш контрольований вплив на масив порід. До найбільш поширених належать алмазно-канатне різання, відокремлення блоків за допомогою клинових систем, а також використання гідравлічних пристроїв для керованого розвитку тріщин. На відміну від вибухових методів, зазначені технології дозволяють суттєво зменшити ступінь пошкодження масиву та забезпечити отримання блоків із більш стабільними геометричними параметрами. Однією з найбільш ефективних технологій цієї групи вважається алмазно-канатне різання, принципова схема якого наведена на рис. 1.2.

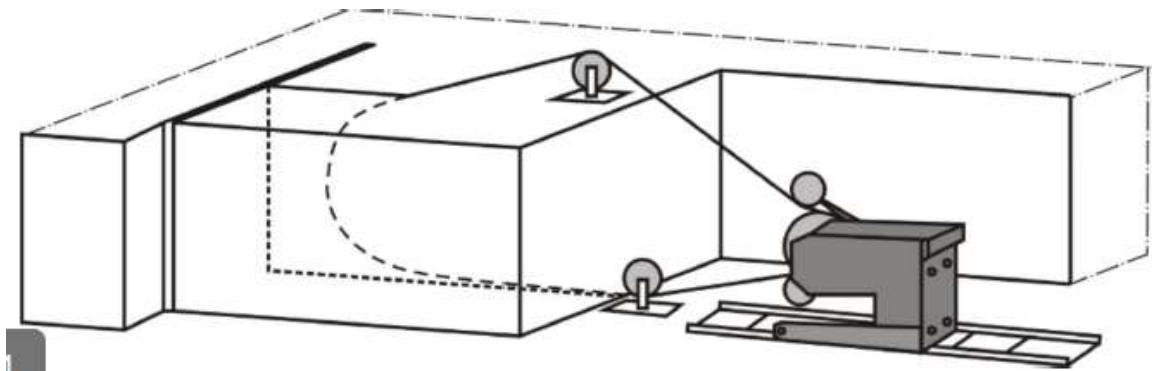


Рис. 1.2. Процес алмазно-канатного різання при видобуванні блоків

Використання алмазного каната дозволяє формувати рівні площини відокремлення та забезпечувати високу точність виконання різів незалежно від конфігурації масиву. Саме ця особливість визначає широке поширення технології на підприємствах, орієнтованих на виробництво облицювальної продукції високої якості. Результати численних досліджень свідчать, що застосування

невибухових методів дозволяє збільшити вихід кондиційних блоків у декілька разів порівняно з традиційними вибуховими технологіями. Разом із тим висока вартість обладнання, значні капітальні вкладення та підвищені вимоги до кваліфікації персоналу залишаються факторами, які стримують їх широке впровадження на більшості вітчизняних підприємств [7].

Не менш важливим напрямом розвитку галузі є використання сучасних інформаційних технологій для підвищення обґрунтованості технологічних рішень. Останніми роками значного поширення набули геоінформаційні системи, методи цифрової геометризації родовищ та технології тривимірного моделювання. Їх застосування дозволяє не лише отримувати більш повне уявлення про будову масиву, а й прогнозувати зміну його властивостей у процесі відпрацювання окремих ділянок. Приклад використання тривимірного моделювання структури родовища наведено на рис. 1.3.

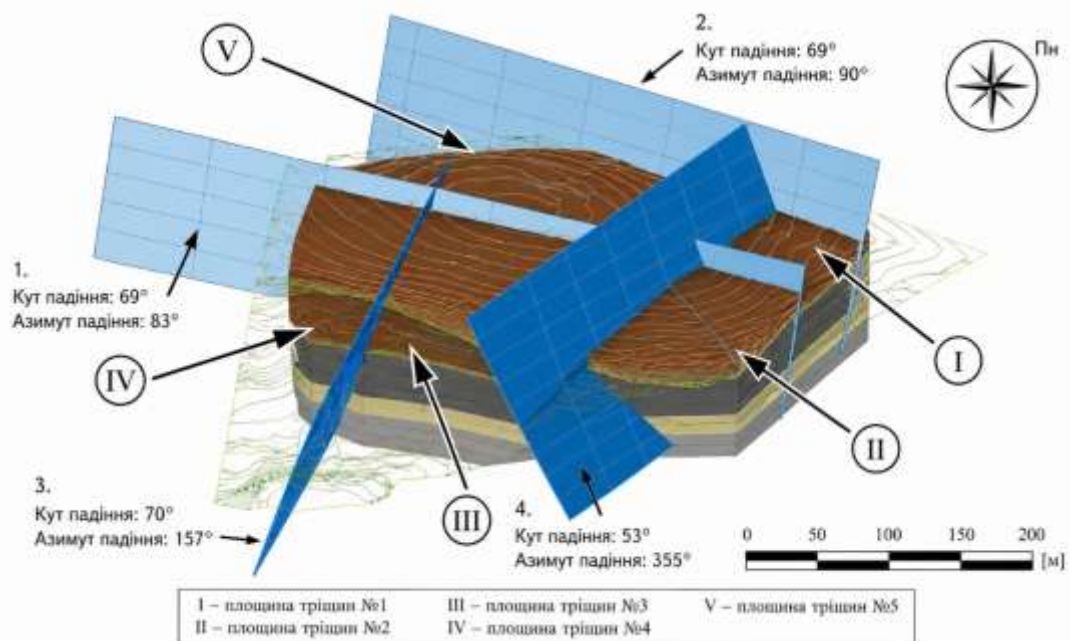


Рис 1.3. Приклад тривимірного моделювання структури гірського масиву

На відміну від традиційних методів оцінювання гірничо-геологічних умов, цифрові моделі дозволяють враховувати просторовий розподіл тріщинуватості, структурних неоднорідностей та інших факторів, що впливають на вихід блочної

продукції. Особливої актуальності такі підходи набувають при освоєнні складних родовищ, де помилки у виборі технології можуть призводити до значних втрат корисної копалини та погіршення економічних показників виробництва [8].

Окремої уваги потребують екологічні аспекти діяльності каменевидобувних підприємств. Незважаючи на відносно невисоку токсичність виробничих процесів, видобування природного каменю супроводжується суттєвими змінами природного середовища. До основних негативних факторів належать порушення земельних ресурсів, утворення значних обсягів відходів, пилове забруднення атмосфери та шумове навантаження. Масштаби таких впливів значною мірою залежать від застосовуваної технології видобування та рівня її технічної досконалості [9].

Аналіз сучасних досліджень свідчить, що впровадження невибухових і комбінованих технологій дозволяє суттєво зменшити інтенсивність негативного впливу на навколишнє середовище. Зокрема, скорочуються обсяги пиловиділення, знижується рівень шуму та практично усуваються сейсмічні коливання, характерні для вибухових робіт. Крім того, підвищення виходу кондиційної продукції сприяє більш раціональному використанню природних ресурсів і зменшенню обсягів відходів виробництва.

Поряд із тріщинуватістю важливе значення для формування товарної продукції мають структурно-текстурні особливості порід. Практика розробки родовищ показує, що придатність масиву до блочного видобування визначається не лише кількістю та орієнтацією тріщин, але й мінералогічним складом, зернистістю та особливостями внутрішньої будови породи. Від цих факторів значною мірою залежать механічні властивості каменю, характер його руйнування та можливість отримання блоків необхідних розмірів і якості [2].

Додатковим чинником, який необхідно враховувати при плануванні гірничих робіт, є анізотропія фізико-механічних властивостей гірських порід. Наявність різних напрямків міцності впливає як на вибір технології відокремлення блоків, так і на орієнтацію робочих площин у масиві. Ігнорування

цього фактора нерідко призводить до збільшення втрат сировини та погіршення якісних характеристик продукції [8].

Важливу роль у підвищенні ефективності виробництва відіграють сучасні методи контролю якості масиву. Серед них найбільш перспективними вважаються неруйнівні методи досліджень, зокрема ультразвукові та геофізичні способи оцінювання стану порід. Їх застосування дозволяє оперативно виявляти приховані дефекти, визначати зони підвищеної тріщинуватості та прогнозувати можливий вихід кондиційної продукції ще до початку основних гірничих робіт [8].

Одним із найбільш відповідальних етапів технологічного циклу є відокремлення та завалювання моноліту. Саме на цьому етапі часто формуються додаткові пошкодження, які можуть суттєво впливати на якість майбутньої продукції (рис. 1.4).



Рис. 1.4. Приклад відокремлення та завалювання моноліту

Досвід роботи каменевидобувних підприємств свідчить, що втрати блочної сировини на стадії відокремлення значною мірою залежать від геометричних

параметрів моноліту, способу його закріплення у масиві та технології завалювання. Неправильний вибір цих параметрів може призводити до утворення додаткових тріщин, руйнування окремих частин моноліту та зниження виходу кондиційної продукції [3].

Одним із найбільш перспективних напрямів підвищення ефективності освоєння родовищ є комплексне використання видобутої мінеральної сировини. У сучасних умовах значна частина порід, які раніше вважалися відходами виробництва, розглядається як додаткове джерело мінеральних ресурсів для будівельної галузі. Концептуальна схема комплексного використання сировини при розробці родовища наведена на рис. 1.5.



Рис. 1.5. Схема комплексного використання сировини при розробці родовища

Не менш важливим напрямом удосконалення технологій видобування природного каменю є підвищення енергетичної ефективності виробничих процесів. Особливість каменевидобувного виробництва полягає в тому, що значна частка енергетичних ресурсів витрачається на виконання операцій

буріння, різання, відокремлення монолітів, транспортування та первинної обробки сировини. В умовах постійного зростання вартості енергоносіїв питання раціонального використання енергетичних ресурсів набуває не лише економічного, але й стратегічного значення для забезпечення конкурентоспроможності підприємств галузі [7].

Досвід провідних каменевидобувних підприємств свідчить, що суттєве скорочення питомих енерговитрат досягається не стільки за рахунок збільшення потужності обладнання, скільки завдяки оптимізації технологічних параметрів виробництва. Важливу роль при цьому відіграє правильний вибір способу відокремлення блоків, раціональне планування гірничих робіт, а також впровадження автоматизованих систем контролю технологічних процесів. Використання сучасних інформаційних технологій дозволяє своєчасно коригувати режими роботи обладнання та мінімізувати непродуктивні витрати енергії.

Проведений аналіз сучасного стану каменевидобувної галузі та світового досвіду освоєння родовищ природного облицювального каменю свідчить про наявність низки невирішених проблем технологічного, економічного та екологічного характеру. Незважаючи на значний прогрес у розвитку засобів механізації та вдосконалення методів видобування, існуючі технологічні рішення не забезпечують одночасного досягнення високої продуктивності гірничих робіт, максимального виходу кондиційної продукції та мінімального рівня втрат сировини.

Особливо гостро зазначена проблема проявляється при розробці родовищ кристалічних порід, де якість кінцевої продукції безпосередньо залежить від ступеня збереження природної структури масиву. Використання вибухових технологій забезпечує високі виробничі показники, однак супроводжується формуванням зон техногенного пошкодження та суттєвим зниженням виходу блоків. Натомість невибухові методи дозволяють отримувати продукцію високої якості, проте характеризуються підвищеними енергетичними та фінансовими

витратами. Таким чином, кожна із зазначених технологічних груп має як переваги, так і обмеження, що унеможлиблює їх універсальне застосування в усіх гірничо-геологічних умовах.

Аналіз наведених на рис. 1.1–1.5 залежностей та схем дозволяє зробити висновок, що ключовим фактором ефективності освоєння родовищ є ступінь збереження природної блочності масиву. Водночас на цей показник одночасно впливають геологічні характеристики порід, особливості їх тріщинуватості, структурно-текстурні властивості та параметри застосовуваних технологій. Існуючі підходи до вибору способу видобування, як правило, розглядають зазначені фактори окремо, що не дозволяє повною мірою враховувати їх взаємозв'язок та комплексний вплив на кінцеві результати виробництва.

Критичний аналіз наукових публікацій також свідчить про те, що більшість досліджень зосереджена або на вдосконаленні окремих технологічних операцій, або на вирішенні локальних виробничих завдань. При цьому питання комплексного обґрунтування параметрів комбінованого видобування природного облицювального каменю, яке б враховувало одночасно вимоги до продуктивності, якості продукції, рівня втрат сировини та екологічної безпеки виробництва, залишається недостатньо дослідженим.

У зв'язку з цим виникає необхідність розроблення нових науково обґрунтованих підходів до організації процесу видобування, які дозволять поєднати переваги різних технологічних методів та адаптувати їх до конкретних гірничо-геологічних умов родовища. Одним із найбільш перспективних напрямів вирішення зазначеної проблеми є використання комбінованих технологій, заснованих на раціональному поєднанні вибухових і невибухових способів впливу на масив.

Отже, результати проведеного аналізу підтверджують, що подальший розвиток каменевидобувної галузі пов'язаний із переходом до більш ефективних технологічних схем, орієнтованих на підвищення комплексності використання мінеральної сировини, зниження технологічних втрат та мінімізацію негативного

впливу на навколишнє середовище. Для України особливо актуальним є впровадження підходів, які дозволять більш повно використовувати потенціал родовищ природного облицювального каменю та підвищити конкурентоспроможність вітчизняних підприємств на світовому ринку. Саме тому подальші дослідження доцільно спрямувати на обґрунтування технологічних параметрів комбінованого способу видобування, який забезпечує раціональне поєднання продуктивності гірничих робіт із максимальним збереженням природної блочності гірського масиву.

1.2. Аналіз існуючих технологій видобування блочного каменю та їх техніко-економічна ефективність

Питання підвищення ефективності видобування блочного природного каменю протягом тривалого часу залишається одним із найбільш актуальних напрямів досліджень у галузі гірничої справи. Це пояснюється тим, що результативність розробки родовищ визначається одночасним впливом геологічних умов, технічного оснащення підприємств, характеристик гірського масиву та вимог до якості кінцевої продукції. Саме тому проблема вибору раціональної технології видобування не може розглядатися виключно з позицій продуктивності або мінімізації витрат, а потребує комплексного врахування сукупності взаємопов'язаних факторів.

Аналіз наукових публікацій свідчить, що значна частина досліджень присвячена вдосконаленню окремих технологічних операцій або обладнання, тоді як питання системного обґрунтування параметрів видобування блочного каменю залишаються недостатньо опрацьованими. У роботах [11] підкреслюється, що сучасні тенденції розвитку галузі пов'язані насамперед із підвищенням вимог до якості блочної продукції та скороченням технологічних витрат. Разом із тим наявні технологічні рішення не завжди забезпечують необхідний рівень збереження природної структури масиву, що обмежує можливості підвищення ефективності виробництва.

Таким чином, розвиток каменевидобувної галузі супроводжується формуванням певної суперечності: з одного боку, ринок потребує збільшення обсягів якісної блочної продукції, а з іншого — більшість традиційних технологій орієнтована на забезпечення високої продуктивності робіт, що нерідко негативно впливає на структурну цілісність каменю.

Історично найбільшого поширення у гірничому виробництві набули вибухові способи розробки родовищ. Їх використання базується на ефективному руйнуванні гірського масиву за рахунок енергії вибуху, що забезпечує значні обсяги видобування при відносно невисоких експлуатаційних витратах. У класичних дослідженнях [12–14] детально розглянуто механізми поширення вибухових хвиль, процеси формування зон дроблення та закономірності розвитку тріщинуватості в породному масиві.

Разом із тим критичний аналіз результатів цих досліджень свідчить, що переважна більшість розроблених моделей орієнтована на оцінювання процесів руйнування породи під час виробництва щебеневої продукції. Питання збереження природної блочності масиву та впливу вибухових навантажень на якість майбутніх блоків у більшості випадків розглядаються як другорядні. Унаслідок цього застосування традиційних вибухових технологій при видобуванні облицювального каменю супроводжується значними втратами потенційно цінної сировини.

За даними виробничих спостережень та результатами досліджень різних авторів, частка втрат блочної продукції під час використання вибухових методів може досягати 60–80 % загального обсягу масиву. Причиною цього є не лише безпосереднє руйнування породи в зоні вибуху, а й формування прихованих мікродефектів, які часто не виявляються під час первинного огляду, але істотно впливають на експлуатаційні властивості каменю.

Окремої уваги заслуговують роботи, присвячені дослідженню впливу параметрів вибухових зарядів на характер руйнування масиву. Зокрема, у роботах [13] встановлено залежності між характеристиками заряду та розмірами зон

пошкодження порід. Водночас аналіз наведених результатів показує, що в більшості випадків недостатньо враховується вплив вторинних хвиль напружень і накопичення пошкоджень у структурі породи. Саме ці фактори можуть суттєво впливати на вихід кондиційної блочної продукції та потребують додаткового вивчення.

Наведені обставини свідчать про необхідність удосконалення існуючих моделей вибухового руйнування з урахуванням критеріїв оцінювання якості блочного каменю та ступеня збереження природної структури масиву.

Подальший розвиток вибухових технологій пов'язаний із застосуванням короткоуповільненого підривання та оптимізацією параметрів буро-вибухових робіт. Як показано в роботах [14, 15], зменшення маси одночасно підриваємих зарядів сприяє зниженню інтенсивності сейсмічних коливань і частково обмежує розвиток техногенної тріщинуватості. Однак навіть за умов використання сучасних схем підривання повністю усунути негативний вплив вибуху на структуру масиву не вдається.

Отже, незважаючи на високу продуктивність і відносно низьку собівартість, вибухові технології мають обмежені можливості щодо забезпечення високого виходу кондиційних блоків природного облицювального каменю. Саме тому останніми роками все більшої уваги набувають невибухові способи відокремлення блоків, які дозволяють суттєво зменшити техногенне пошкодження масиву та підвищити якість отриманої продукції.

На відміну від вибухових способів руйнування масиву, невибухові технології орієнтовані насамперед на забезпечення максимально можливого збереження природної структури каменю. Саме тому в сучасній практиці видобування облицювальної сировини вони розглядаються як один із найбільш перспективних напрямів розвитку галузі. У роботах [16] зазначається, що застосування алмазно-канатного різання дозволяє формувати високоякісні блоки з мінімальними відхиленнями геометричних параметрів та суттєво знижувати рівень технологічних втрат.

Разом із тим ефективність використання алмазно-канатних установок не є сталою величиною та значною мірою залежить від конкретних гірничо-геологічних умов родовища. На продуктивність різання впливають міцність породи, її абразивність, ступінь тріщинуватості, мінералогічний склад і структурні особливості масиву. У зв'язку з цим навіть високоефективні технічні засоби не завжди забезпечують однакові виробничі результати на різних родовищах.

Принцип формування моноліту природного облицювального каменю із застосуванням алмазно-канатного різання наведено на рис. 1.6.



Рис. 1.6. Формування моноліту природного облицювального каменю методом алмазно-канатного різання

Як видно з рис. 1.6, застосування алмазно-канатного різання забезпечує утворення рівних вертикальних і горизонтальних площин відокремлення моноліту від масиву. Висока точність різання дозволяє формувати блоки необхідних геометричних розмірів із мінімальним пошкодженням прилеглої породи. На відміну від вибухових технологій, процес відокремлення здійснюється без значних динамічних навантажень, що сприяє збереженню природної блочності масиву та зменшенню утворення техногенних тріщин.

Характерною особливістю технології є можливість отримання монолітів правильної геометричної форми з чітко сформованими площинами різання, що

створює передумови для підвищення виходу кондиційної блочної продукції та більш повного використання запасів родовища. За даними виробничої практики та результатами досліджень, застосування алмазно-канатного різання в поєднанні з невибуховими способами остаточного відокремлення монолітів забезпечує суттєве скорочення технологічних втрат і дозволяє збільшити вихід кондиційних блоків порівняно з традиційними вибуховими технологіями.

Разом із перевагами зазначені технології мають і певні обмеження. Насамперед це стосується високої вартості обладнання, значних експлуатаційних витрат та підвищених вимог до технічного обслуговування. Крім того, ефективність їх використання суттєво залежить від правильності вибору режимів роботи обладнання та організації технологічного процесу. Тому оцінювання доцільності застосування невибухових методів повинно здійснюватися з урахуванням не лише якості отриманої продукції, але й економічних показників виробництва.

Для порівняння можливостей різних технологічних підходів доцільно узагальнити їх основні техніко-економічні характеристики, що наведені у табл. 1.2.

Таблиця 1.2.

Техніко-економічні показники технологій видобування

Показник	Вибухові технології	Невибухові технології	Комбіновані технології
Продуктивність, м ³ /добу	500–1500	100–400	300–900
Вихід блоків, %	20–40	40–70	40–60
Втрати сировини, %	60–80	20–40	30–50
Собівартість, грн/м ³	200–400	600–1200	400–800
Енергоємність, кВт·год/м ³	5–15	20–50	10–30
Рівень пошкодження масиву, %	40–70	5–15	15–30

Джерело: узагальнено за даними [12–17, 22]

Аналіз наведених показників свідчить про відсутність універсальної технології, яка б одночасно забезпечувала максимальну продуктивність, мінімальні витрати та найвищий вихід кондиційної продукції. Вибухові способи характеризуються найменшими витратами на одиницю видобутої сировини та високою продуктивністю, однак супроводжуються значними втратами блочного каменю. Невибухові технології забезпечують високі показники якості продукції та мінімальне пошкодження масиву, проте вимагають значно більших фінансових та енергетичних ресурсів. Комбіновані схеми займають проміжне положення між цими двома групами та потенційно дозволяють поєднати їх переваги.

На відміну від традиційних підходів, які базуються переважно на аналізі собівартості або продуктивності, використання інтегрального критерію дозволяє комплексно враховувати якісні та економічні результати виробництва. Це особливо важливо при оцінюванні комбінованих технологій, де зниження втрат сировини може компенсувати підвищення окремих статей витрат.

Подальший розвиток технологій видобування пов'язаний не лише з удосконаленням окремих технічних засобів, але й із пошуком раціональних комбінацій різних способів впливу на масив. Саме тому в сучасних дослідженнях значна увага приділяється класифікації існуючих технологій та визначенню сфер їх найбільш ефективного застосування. Узагальнену класифікацію способів видобування природного облицювального каменю наведено на рис. 1.7.

Як видно з рис. 1.7, сучасні технології можна умовно поділити на дві великі групи – вибухові та механічні. Кожна з них характеризується власними перевагами, обмеженнями та областями ефективного застосування. Вибір конкретного способу видобування визначається поєднанням гірничо-геологічних, технічних, економічних та екологічних факторів, що додатково підтверджує необхідність комплексного підходу до обґрунтування технологічних параметрів розробки родовищ.

Окрім алмазно-канатного різання, у практиці видобування блочного каменю застосовуються клинові та гідравлічні методи відокремлення монолітів.

Їх використання базується на створенні локальних напружень у заздалегідь підготовлених зонах масиву, що забезпечує контрольований розвиток тріщин та подальше відокремлення блоку. Основними перевагами зазначених способів є відносна простота реалізації, невисокі капітальні витрати та можливість застосування в різноманітних гірничо-геологічних умовах [18].

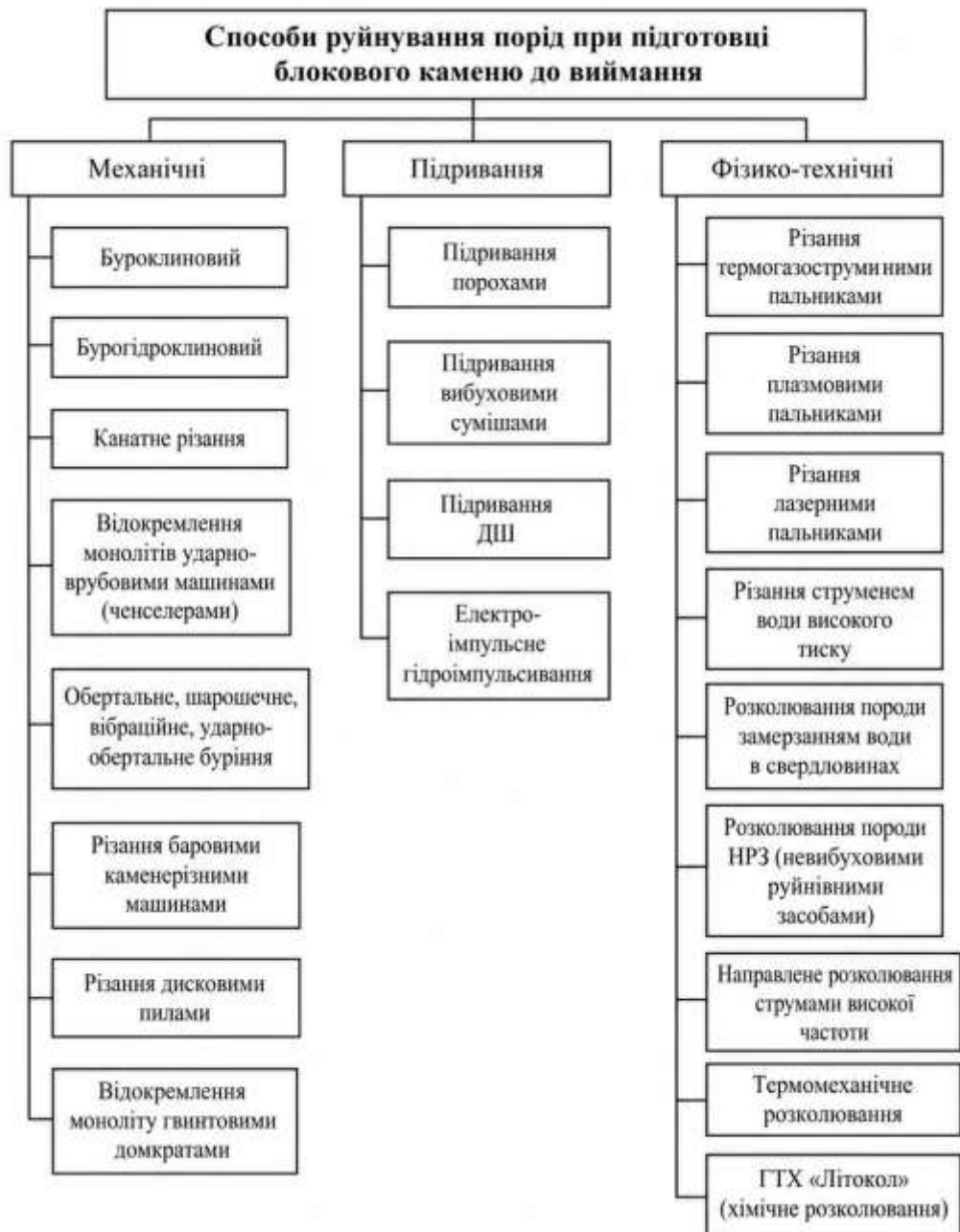


Рис. 1.7. Класифікація технологій видобування природного облицювального каменю [35]

Разом із тим аналіз виробничого досвіду свідчить, що ефективність клинових та гідравлічних систем значною мірою визначається природною будовою масиву. За наявності розвиненої системи тріщин або вираженої анізотропії порід процес поширення тріщини може втрачати керованість, що призводить до утворення дефектів і зниження якості продукції. Крім того, зазначені методи характеризуються порівняно невисокою продуктивністю, що обмежує можливості їх самостійного використання на великих кар'єрах.

Таким чином, застосування клинових систем доцільно розглядати не як альтернативу сучасним технологіям різання, а як один із елементів комплексної технологічної схеми, ефективність якої визначається правильним поєднанням різних способів впливу на масив.

Особливий інтерес становлять дослідження, присвячені оптимізації геометричних параметрів блоків і монолітів. Саме геометрія відокремлюваного об'єкта значною мірою визначає як продуктивність технологічного процесу, так і ризик виникнення додаткових пошкоджень під час його відокремлення та транспортування. Результати досліджень [19] свідчать про існування складної залежності між розмірами моноліту та показниками ефективності виробництва.

З одного боку, збільшення розмірів монолітів дозволяє зменшити питомі витрати на підготовчі роботи та підвищити продуктивність видобування. З іншого боку, зі збільшенням об'єму блоку зростає ймовірність його пошкодження через наявність прихованих структурних дефектів, нерівномірність розподілу напружень та складність виконання технологічних операцій. У результаті частина потенційного економічного ефекту втрачається через зростання ризику браку продукції.

Водночас надмірне зменшення розмірів монолітів також не може розглядатися як універсальне рішення. Незважаючи на підвищення технологічної надійності процесу, це супроводжується збільшенням питомих втрат сировини та зростанням обсягів допоміжних робіт. Таким чином, між продуктивністю

видобування та якістю отриманої продукції виникає об'єктивна суперечність, яка потребує науково обґрунтованого вирішення.

Геометричні параметри формування блоку природного каменю в уступі кар'єру наведено на рис. 1.8.

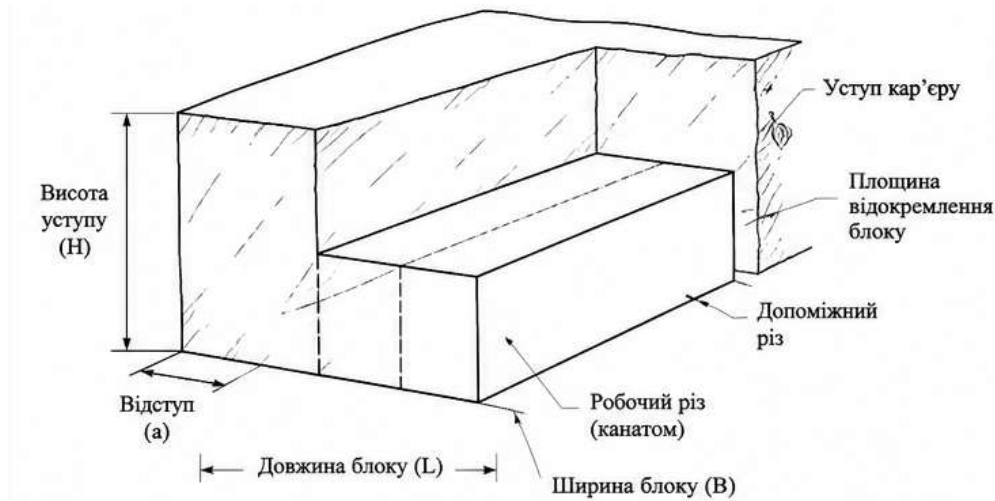


Рис. 1.8. Схема формування блоку природного каменю в уступі кар'єру [36]

Як видно з рис. 1.8, розміри блоку визначаються не лише висотою уступу та параметрами різання, але й фактичною структурою масиву. У реальних умовах розробки родовищ зазначені фактори діють одночасно, що значно ускладнює вибір раціональних параметрів видобування. Саме тому використання фіксованих технологічних схем без урахування індивідуальних особливостей родовища часто призводить до втрат сировини та зниження економічної ефективності виробництва.

Аналіз сучасних досліджень показує, що одним із найбільш перспективних напрямів підвищення ефективності видобування є адаптація технології до конкретних умов масиву. При цьому важливого значення набувають питання зонування кар'єрного поля, прогнозування якості порід та вибору технології для окремих ділянок родовища. Однак більшість існуючих методик орієнтована переважно на оцінювання окремих параметрів масиву і не забезпечує комплексного врахування їх взаємодії [20–21].

Суттєву роль у виборі технології відіграють також економічні фактори. Як свідчать результати досліджень [22], оцінювання ефективності видобування лише за показниками собівартості не дозволяє об'єктивно визначити переваги тієї чи іншої технології. У багатьох випадках більш дорогі технологічні рішення забезпечують значно вищий вихід кондиційної продукції, що позитивно впливає на кінцевий фінансовий результат діяльності підприємства.

У зв'язку з цим доцільним є використання комплексних критеріїв оцінювання ефективності, які враховують не лише прямі виробничі витрати, але й втрати сировини, рівень використання запасів родовища та додану вартість готової продукції. Такий підхід дозволяє більш об'єктивно оцінювати перспективність різних технологічних рішень та обґрунтовувати напрями їх удосконалення.

Для практичного порівняння існуючих способів видобування доцільно розглянути узагальнену оцінку їх впливу на техніко-економічні та екологічні показники виробництва, яка наведена на рис. 1.9.

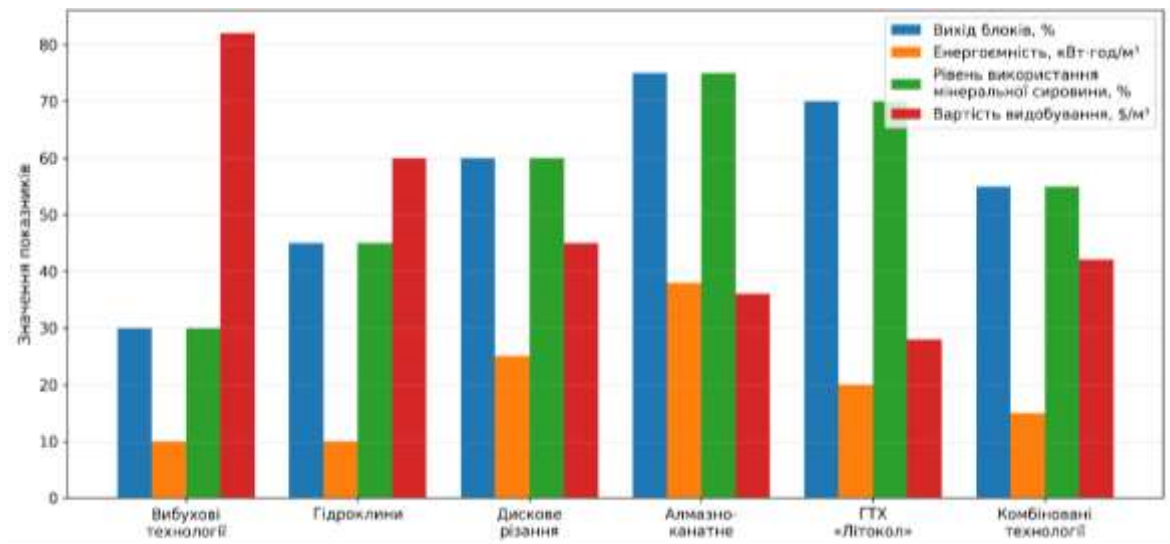


Рис. 1.9. Порівняння впливу різних технологій видобування на ефективність та навколишнє середовище [37]

Аналіз узагальнених даних, наведених на рис. 1.9, підтверджує, що кожна з розглянутих технологій характеризується певним співвідношенням між

продуктивністю, якістю продукції, рівнем втрат сировини та екологічними показниками. Вибухові методи забезпечують найвищі показники продуктивності, однак супроводжуються значним пошкодженням масиву та високими втратами блочної сировини. Невибухові технології, навпаки, дозволяють отримувати продукцію високої якості при мінімальному рівні техногенного впливу, проте потребують більших фінансових та енергетичних витрат. Комбіновані схеми займають проміжне положення та потенційно забезпечують більш збалансоване поєднання зазначених показників.

Водночас результати аналізу свідчать про те, що оцінювання ефективності технологій лише за одним критерієм не дозволяє отримати об'єктивну картину. Наприклад, висока продуктивність не завжди означає високу економічну ефективність, якщо вона супроводжується значними втратами цінної сировини. Аналогічно максимальний вихід кондиційних блоків не гарантує доцільності технології за умов надмірного зростання собівартості продукції. Саме тому сучасні підходи до оцінювання ефективності повинні базуватися на комплексному врахуванні технічних, економічних та екологічних факторів.

З аналізу табл. 1.2 та рис. 1.9 випливає, що найбільш перспективним напрямом розвитку технологій видобування є пошук раціонального співвідношення між продуктивністю процесу та рівнем збереження природної структури масиву. При цьому ключове значення має не абсолютне покращення окремих показників, а оптимізація їх сукупного впливу на кінцевий результат виробництва.

Подальше вивчення наукових джерел показує, що значна частина сучасних досліджень присвячена вдосконаленню окремих елементів технологічного процесу. Зокрема, у роботах [23] відзначається, що історично більшість технологічних схем формувалася під потреби масового виробництва щебеневої продукції. Такий підхід забезпечував високі обсяги видобування, проте питання збереження блочної структури масиву не розглядалося як пріоритетне завдання.

У сучасних умовах це створює певні обмеження щодо ефективного використання родовищ облицювального каменю.

У роботах [24] досліджено вплив параметрів буріння та різання на процес формування тріщин у гірському масиві. Отримані результати свідчать про високу чутливість якості продукції до зміни технологічних режимів. Навіть незначні відхилення від раціональних параметрів можуть спричиняти розвиток неконтрольованої тріщинуватості та погіршення якісних характеристик блоків. Разом із тим у більшості досліджень зазначені процеси розглядаються окремо від геологічних особливостей родовища, що обмежує можливість практичного використання отриманих залежностей.

Останніми роками значна увага приділяється питанням енергоефективності технологічних процесів. Як показано в роботах [25], енерговитрати під час видобування природного каменю визначаються не лише характеристиками обладнання, але й фізико-механічними властивостями порід. Встановлено, що міцність, щільність та абразивність масиву суттєво впливають на продуктивність різання та швидкість зношування інструменту. Однак взаємозв'язок між енергетичними показниками та виходом кондиційної продукції залишається недостатньо дослідженим.

Особливий інтерес викликають роботи, присвячені комбінованим технологіям видобування [26]. Їх результати свідчать про можливість поєднання переваг різних способів впливу на масив шляхом диференційованого використання вибухових і невибухових методів. Водночас більшість запропонованих рішень має рекомендаційний характер і не містить достатньо обґрунтованих критеріїв вибору параметрів технології залежно від умов розробки родовища. Унаслідок цього питання практичної реалізації комбінованих схем залишається відкритим.

Аналіз досліджень [27] показує, що ефективність видобування значною мірою залежить не лише від окремих технологічних операцій, а й від послідовності їх виконання. Порушення раціональної організації виробничого

процесу може призводити до накопичення пошкоджень у масиві навіть за використання сучасних невибухових технологій. Це свідчить про необхідність розгляду процесу видобування як єдиної технологічної системи, елементи якої взаємодіють між собою.

Суттєвим недоліком більшості існуючих наукових робіт є недостатня увага до комплексної оцінки економічної ефективності технологій. У роботах [28] основна увага приділяється питанням собівартості виробництва, тоді як втрати сировини та якість кінцевої продукції враховуються лише частково. У дослідженнях [29] зроблено спробу розширити перелік оцінюваних показників, однак відсутність єдиної методології не дозволяє використовувати отримані результати для обґрунтування оптимальних технологічних рішень.

Перспективним напрямом розвитку галузі є впровадження сучасних цифрових технологій. Дослідження [30] підтверджують ефективність використання тривимірного моделювання для прогнозування умов залягання порід та планування гірничих робіт. Водночас широке застосування таких методів стримується необхідністю збору значних обсягів вихідної інформації та складністю побудови адекватних цифрових моделей родовищ.

Окремий напрям сучасних досліджень пов'язаний із використанням методів машинного навчання та штучного інтелекту для прогнозування властивостей масиву [31–32]. Незважаючи на перспективність таких підходів, їх практичне впровадження в каменевидобувній галузі поки що залишається обмеженим через недостатню кількість достовірних виробничих даних та складність адаптації математичних моделей до конкретних умов розробки родовищ.

У роботах [33] розглянуто екологічні аспекти різних технологій видобування. Встановлено, що невибухові та комбіновані методи дозволяють суттєво знизити рівень шумового навантаження, пиловиділення та вібраційного впливу на навколишнє середовище. Разом із тим питання комплексного

врахування екологічних факторів при виборі технологічних параметрів досі не отримало достатнього наукового обґрунтування.

Таким чином, проведений аналіз свідчить, що існуючі технології видобування блочного природного каменю не забезпечують оптимального поєднання продуктивності, якості продукції, рівня втрат сировини та екологічної безпеки. Встановлено наявність суперечності між необхідністю підвищення ефективності гірничих робіт і забезпеченням максимального збереження природної блочності масиву.

Отже, актуальною науковою задачею є встановлення закономірностей впливу технологічних параметрів на ефективність комбінованого способу видобування природного облицювального каменю з урахуванням гірничо-геологічних умов родовищ. Розв'язання цієї задачі дозволить обґрунтувати раціональні параметри технологічних процесів та забезпечити підвищення рівня комплексного використання мінеральної сировини.

1.3. Екологічні та ресурсозберігаючі аспекти застосування комбінованих технологій видобування

Сучасні тенденції розвитку гірничодобувної промисловості характеризуються поступовим переходом від переважно виробничо-орієнтованих підходів до концепції сталого природокористування, в основі якої лежить необхідність одночасного забезпечення економічної ефективності, екологічної безпеки та раціонального використання мінерально-сировинних ресурсів. Особливої актуальності ці питання набувають для каменевидобувної галузі, де якість кінцевої продукції безпосередньо пов'язана зі ступенем збереження природної структури гірського масиву, а технологічні втрати можуть становити значну частину запасів корисної копалини [38].

Результати аналізу, наведені у попередніх підрозділах, свідчать про те, що традиційні технології видобування не забезпечують оптимального балансу між продуктивністю виробництва та рівнем використання природних ресурсів.

Застосування вибухових способів супроводжується формуванням додаткової тріщинуватості та зростанням втрат блочної сировини, тоді як повний перехід до невибухових технологій часто стримується економічними чинниками, насамперед високою вартістю обладнання та значною енергоємністю процесів різання [7; 25]. За таких умов особливий інтерес становлять комбіновані технології, які дозволяють використовувати переваги різних способів впливу на масив залежно від конкретних гірничо-геологічних умов.

Сутність комбінованого підходу полягає не лише у механічному поєднанні окремих технологічних операцій, а у формуванні єдиної системи розробки родовища, в межах якої кожен технологічний елемент виконує визначену функцію. Формування площин відокремлення здійснюється за допомогою високоточних методів різання, тоді як завершальна стадія вилучення моноліту реалізується шляхом використання контрольованих механічних або гідравлічних впливів. Такий підхід дозволяє суттєво зменшити масштаби техногенного порушення масиву та забезпечити більш повне використання запасів природного каменю [26; 35].

Одним із ключових критеріїв оцінювання сучасних технологій є рівень їхнього екологічного впливу. Особливість видобування природного каменю полягає в тому, що негативний вплив на довкілля формується не лише внаслідок безпосереднього вилучення гірської маси, але й через зміну природного стану геологічного середовища, утворення відходів, пилове забруднення та шумові навантаження. Масштаби цих процесів значною мірою визначаються способом руйнування масиву та рівнем керованості технологічного процесу [9; 33].

Дослідження, присвячені оцінці екологічних наслідків вибухових робіт, показують, що імпульсний характер навантаження призводить до формування зон інтенсивного руйнування та розвитку техногенної тріщинуватості далеко за межами безпосередньої області відриву породи [6; 13; 14]. При цьому негативний вплив проявляється не лише у втраті потенційно цінної сировини, але й у порушенні геомеханічної рівноваги масиву. У довгостроковій перспективі це

може ускладнювати подальше освоєння родовища та знижувати ефективність використання його запасів.

На відміну від вибухових методів, алмазно-канатне різання забезпечує локальний характер впливу на породу. Процес відокремлення відбувається поступово, що дозволяє суттєво знизити рівень залишкових напружень у масиві та зберегти природні структурні особливості каменю [7; 36]. Аналогічний ефект спостерігається при використанні гідроклинів, де процес розвитку тріщини відбувається під дією контрольованого тиску, без виникнення значних динамічних навантажень [18].

У сучасній науковій літературі все частіше наголошується, що оцінка екологічної ефективності технологій не повинна обмежуватися лише аналізом окремих факторів впливу. Наприклад, зменшення рівня пиловиділення або шуму саме по собі не гарантує покращення загального екологічного результату. Більш об'єктивною є оцінка, яка враховує весь життєвий цикл технології, включаючи енергоспоживання, утворення відходів, використання водних ресурсів та можливість повторного залучення побічної продукції у виробничий процес [37].

Особливо актуальним це питання є для алмазно-канатного різання, де зниження пилового навантаження досягається завдяки використанню водяного охолодження. З одного боку, такий підхід суттєво покращує санітарно-гігієнічні умови виробництва, однак з іншого — супроводжується утворенням шламів, які потребують подальшої утилізації або переробки. Саме тому при оцінці ресурсозберігаючого ефекту необхідно враховувати не лише прямі результати застосування технології, але й вторинні наслідки її використання.

Серед екологічних факторів, що супроводжують видобування природного каменю, суттєве значення мають шумові та вібраційні впливи. Особливо гостро ця проблема проявляється під час виконання вибухових робіт, коли поширення ударних хвиль та сейсмічних коливань може впливати не лише на стан масиву, а й на навколишню інфраструктуру. У ряді випадків такі впливи стають

обмежувальним фактором при розробці родовищ, розташованих поблизу населених пунктів, транспортних магістралей або промислових об'єктів [10; 12].

Досвід експлуатації кар'єрів показує, що рівень вібраційного навантаження значною мірою визначається не лише параметрами вибуху, а й особливостями геологічної будови масиву. Наявність тектонічних порушень, зон ослаблення або систем тріщин може сприяти поширенню хвиль на значні відстані, що ускладнює прогнозування наслідків вибухових робіт. У таких умовах застосування комбінованих технологій дозволяє суттєво знизити ризики, пов'язані з неконтрольованим розвитком деформаційних процесів.

Перевагою алмазно-канатного різання та гідравлічних способів відокремлення є відсутність короточасних динамічних навантажень великої інтенсивності. Формування тріщини відбувається поступово, що забезпечує більш рівномірний перерозподіл напружень у масиві та зменшує ймовірність розвитку небажаних деформацій. Саме тому невибухові елементи комбінованих технологій розглядаються як перспективний напрям підвищення екологічної безпеки гірничих робіт.

Разом із цим не слід вважати такі технології повністю нейтральними щодо навколишнього середовища. Робота різального обладнання супроводжується шумовим навантаженням, споживанням електроенергії та використанням водних ресурсів. Однак характер цих впливів є локальним і значно краще контролюється порівняно з наслідками вибухових робіт. Це створює можливість для ефективного впровадження природоохоронних заходів без істотного зниження продуктивності виробництва.

З позицій ресурсозбереження одним із найважливіших показників ефективності розробки родовищ є коефіцієнт вилучення корисної копалини. Фактично саме цей показник характеризує ступінь використання природного потенціалу родовища та рівень технологічної досконалості виробництва. Численні дослідження свідчать, що підвищення виходу кондиційних блоків

навіть на декілька відсотків може забезпечувати суттєвий економічний ефект за рахунок високої вартості облицювальної продукції [4; 11; 23].

Особливістю комбінованих технологій є можливість більш гнучкого врахування індивідуальних особливостей масиву. На відміну від традиційних підходів, де один спосіб видобування застосовується до всієї ділянки родовища, комбіновані схеми дозволяють адаптувати технологію до фактичного стану порід. Це створює передумови для більш повного використання запасів облицювального каменю та зниження непродуктивних втрат сировини.

Водночас аналіз виробничої практики показує, що досягнення високих показників вилучення неможливе лише за рахунок використання сучасного обладнання. Вирішальне значення має правильний вибір параметрів різання, напрямків розвитку тріщин, способів відокремлення монолітів та організації всього комплексу гірничих робіт. Ігнорування хоча б одного з цих факторів може суттєво знизити очікуваний ресурсозберігаючий ефект [24; 27].

Окремої уваги заслуговує проблема утворення відходів каменевидобувного виробництва. За оцінками різних дослідників, їх частка може становити понад половину загального обсягу видобутої гірської маси. Значна частина цих матеріалів утворюється не внаслідок природних особливостей родовища, а через технологічні втрати, пов'язані з руйнуванням перспективної блочної сировини на різних стадіях виробничого процесу.

У сучасних умовах відходи каменевидобування все частіше розглядаються не як побічний продукт виробництва, а як додатковий ресурс для будівельної індустрії. Результати досліджень свідчать про можливість їх використання як сировини для виробництва щебеню, мінеральних порошків, бетонів, керамічних матеріалів та інших будівельних виробів. Такий підхід дозволяє одночасно вирішувати дві важливі задачі – зменшувати навантаження на довкілля та підвищувати рівень комплексного використання мінеральних ресурсів.

Проте навіть за умови широкого впровадження технологій переробки відходів основним завданням залишається їх запобігання на стадії видобування.

Саме тому найбільш перспективним вважається підхід, спрямований на максимальне збереження природної структури масиву та зменшення обсягів руйнування потенційно придатної блочної сировини ще до моменту її переходу у категорію відходів.

У цьому контексті комбіновані технології мають важливу перевагу, оскільки дозволяють зменшувати втрати на найбільш відповідальних етапах відокремлення та формування блоків. Завдяки цьому підвищується не лише вихід кондиційної продукції, але й загальний рівень комплексного використання запасів родовища, що відповідає сучасним принципам ресурсозбереження та циркулярної економіки.

Важливим складником оцінки ефективності сучасних технологій видобування є рівень енергоспоживання виробничих процесів. В умовах постійного зростання вартості енергетичних ресурсів цей показник дедалі більше впливає на конкурентоспроможність продукції та економічні результати діяльності підприємств. Особливо це стосується технологій видобування блочного каменю, де значна частина витрат пов'язана з виконанням операцій різання, буріння, відокремлення монолітів і транспортування гірської маси.

Дослідження показують, що енергоємність процесів різання визначається складною взаємодією технологічних і природних факторів. На величину енергетичних витрат впливають фізико-механічні властивості порід, ступінь їх абразивності, параметри різального інструменту та режими роботи обладнання [25]. При цьому підвищення продуктивності не завжди супроводжується покращенням енергетичних показників, оскільки збільшення швидкості виконання операцій може призводити до прискореного зношування інструменту та додаткових витрат на його заміну.

Аналіз наукових джерел свідчить, що більшість існуючих досліджень розглядає питання енергоефективності окремо від показників збереження блочної структури масиву. У результаті оптимізація енергоспоживання часто здійснюється без належного врахування її впливу на вихід кондиційної продукції

та рівень втрат сировини. Такий підхід не дозволяє об'єктивно оцінювати реальну ефективність технологічних рішень, оскільки економія енергоресурсів може супроводжуватися погіршенням якісних показників виробництва.

Особливістю комбінованих технологій є можливість більш раціонального використання енергії за рахунок розподілу функцій між окремими технологічними операціями. Формування площин відокремлення здійснюється високоточними способами різання, тоді як завершальна стадія вилучення блоку реалізується із застосуванням механічних або гідравлічних систем. Такий підхід дозволяє зменшити непродуктивні витрати енергії та забезпечити більш рівномірне навантаження на обладнання.

Подальший розвиток комбінованих технологій значною мірою пов'язаний із удосконаленням методів прогнозування результатів видобування. У сучасних дослідженнях дедалі більша увага приділяється використанню цифрових технологій, тривимірного моделювання та методів машинного навчання для оцінювання властивостей масиву і вибору раціональних технологічних параметрів [30–32; 46]. Використання таких підходів створює передумови для переходу від реактивного управління виробництвом до прогнозного планування технологічних процесів.

Разом із тим результати аналізу літературних джерел свідчать, що впровадження цифрових технологій у каменевидобувній галузі поки що має обмежений характер. Основними стримуючими факторами залишаються складність отримання достовірних вихідних даних, значна мінливість природних умов та відсутність достатньо обґрунтованих моделей взаємодії технологічних і геологічних факторів [47]. Унаслідок цього потенціал сучасних методів цифрового аналізу використовується лише частково.

Проведений аналіз також показує, що більшість наукових робіт присвячена окремим аспектам видобування природного каменю. Одні дослідження орієнтовані на підвищення продуктивності обладнання, інші – на покращення якості продукції або зниження екологічного впливу. Водночас питання

комплексного врахування технологічних, економічних, екологічних та ресурсозберігаючих факторів при обґрунтуванні параметрів видобування залишається недостатньо дослідженим.

Особливої уваги потребує проблема узгодження процесів різання та відокремлення блоків у межах єдиної технологічної системи. Аналіз літературних джерел свідчить, що ці процеси найчастіше розглядаються окремо, хоча саме характер їх взаємодії визначає рівень втрат сировини, якість продукції та ефективність використання обладнання. Відсутність комплексного підходу ускладнює вибір раціональних технологічних параметрів і не дозволяє повною мірою реалізувати потенціал комбінованих технологій.

Таким чином, результати проведеного аналізу дозволяють зробити висновок, що комбіновані технології видобування природного облицювального каменю мають значний потенціал з точки зору підвищення ресурсоефективності, зменшення екологічного навантаження та покращення техніко-економічних показників виробництва. Разом із тим їх широке впровадження стримується недостатнім рівнем наукового обґрунтування параметрів технологічних процесів та відсутністю узагальнених критеріїв оцінювання ефективності в різних гірничо-геологічних умовах.

Отже, на основі проведеного аналізу встановлено наявність науково-практичної проблеми, яка полягає у відсутності достатньо обґрунтованих підходів до вибору параметрів комбінованого видобування природного облицювального каменю з урахуванням взаємного впливу технологічних, геологічних, екологічних та економічних факторів. Розв'язання цієї проблеми потребує встановлення закономірностей формування показників ефективності комбінованих технологій та розроблення наукових засад їх оптимізації, що і визначає напрям подальших досліджень у дисертаційній роботі.

Висновки до розділу 1

1. Аналіз сучасного стану каменевидобувної галузі показав, що Україна володіє значним ресурсним потенціалом природного облицювального каменю, однак рівень його використання залишається недостатнім. На більшості родовищ переважає орієнтація на виробництво щебеневої продукції, внаслідок чого значна частина придатної для блочного видобування сировини втрачається ще на початкових етапах розробки.

2. Результати аналізу наукових джерел свідчать, що вихід кондиційної блочної продукції визначається не окремими показниками, а сукупністю взаємопов'язаних факторів. Найбільший вплив мають природна тріщинуватість масиву, його блочність, структурно-текстурні особливості порід, а також параметри технологічного впливу під час відокремлення монолітів. Разом з тим більшість існуючих підходів розглядає зазначені фактори окремо, що не дозволяє повною мірою оцінити їх спільний вплив на ефективність видобування.

3. Проведений аналіз вибухових технологій підтвердив їх високу продуктивність і відносно невисоку собівартість виконання робіт. Водночас формування зон техногенного пошкодження масиву та розвиток додаткової тріщинуватості призводять до суттєвого зниження виходу кондиційних блоків. Наявні моделі вибухового руйнування здебільшого орієнтовані на щебенеve виробництво і недостатньо враховують вимоги до збереження природної структури облицювального каменю.

4. Невибухові способи видобування забезпечують значно кращі показники якості продукції та дозволяють підвищити вихід блоків до 40–70 %. Разом із цим їх ефективність істотно залежить від фізико-механічних властивостей порід, а широке впровадження стримується підвищеними енерговитратами, значною вартістю обладнання та складністю організації виробничих процесів.

5. Порівняння існуючих технологій показало наявність об'єктивної суперечності між продуктивністю гірничих робіт і рівнем збереження природної

структури масиву. Технології, що забезпечують максимальну інтенсивність видобування, супроводжуються підвищеними втратами блочної сировини, тоді як способи, орієнтовані на збереження якості каменю, характеризуються нижчою продуктивністю та більшими витратами.

6. Найбільш перспективним напрямом підвищення ефективності розробки родовищ є використання комбінованих технологічних схем, які поєднують переваги вибухових і невибухових методів. Їх застосування дозволяє враховувати особливості будови масиву та більш раціонально використовувати запаси природного каменю. Проте питання вибору раціональних параметрів таких технологій і досі не мають достатнього наукового обґрунтування.

7. Аналіз сучасних досліджень показав, що оцінювання ефективності технологій переважно виконується за окремими технічними або економічними показниками. При цьому недостатньо уваги приділяється комплексному врахуванню виходу кондиційної продукції, втрат сировини, енерговитрат, екологічних наслідків та рівня використання запасів родовища.

8. Проведений огляд літературних джерел дає підстави стверджувати, що подальше підвищення ефективності видобування природного облицювального каменю пов'язане з обґрунтуванням параметрів комбінованого способу розробки родовищ. Для цього необхідно встановити закономірності впливу технологічних параметрів на вихід кондиційних блоків, втрати сировини та рівень використання ресурсного потенціалу масиву, що і визначає зміст подальших досліджень у дисертаційній роботі.

РОЗДІЛ 2. МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ КОМБІНОВАНОГО ВИДОБУВАННЯ ПРИРОДНОГО ОБЛИЦЮВАЛЬНОГО КАМЕНЮ

2.1. Характеристика об'єкта та умов проведення досліджень

Ефективність видобування природного облицювального каменю значною мірою залежить від комплексу природних і технологічних чинників, які визначають можливість отримання блоків необхідних розмірів та якості. На відміну від розробки родовищ будівельного каменю або рудних корисних копалин, де основним показником ефективності є кількість видобутої гірничої маси, при видобуванні облицювального каменю першочергового значення набуває збереження цілісності масиву та забезпечення максимального виходу кондиційної блочної продукції. Саме тому дослідження технологічних параметрів видобування повинно базуватися на детальному аналізі гірничо-геологічних умов родовища та закономірностей формування природної блочності порід [48].

Для виконання досліджень обрано Катеринівське родовище лабрадориту, яке розробляється ПП «Кванта-ЛЧ» у межах Хорошівської територіальної громади Житомирської області. Вибір даного родовища як об'єкта дослідження зумовлений кількома причинами. По-перше, родовище належить до типових об'єктів видобування декоративного каменю Українського щита, що забезпечує можливість поширення отриманих результатів на інші аналогічні підприємства. По-друге, геологічна будова ділянки характеризується наявністю декількох систем природної тріщинуватості, які істотно впливають на процес формування монолітів та вихід товарної продукції. По-третє, підприємство використовує сучасні технології видобування блочного каменю, що дозволяє проводити експериментальні дослідження безпосередньо у виробничих умовах [49].

Родовище розробляється відповідно до спеціального дозволу на користування надрами на площі 8,0 га. Безпосередньо гірничі роботи

здійснюються в межах земельної ділянки площею близько 6,0 га. Незважаючи на відносно невеликі розміри кар'єру, геологічна будова ділянки є достатньо репрезентативною для вивчення процесів формування блочної продукції та оцінювання ефективності різних способів відокремлення монолітів від масиву.

У геоструктурному відношенні Катеринівське родовище приурочене до південної частини Коростенського плутону та розташоване в зоні контакту Володарсько-Волинського масиву основних порід із гранітоїдами Коростенського комплексу. Саме особливості геологічного розвитку даної території зумовили формування потужної товщі лабрадоритів, які характеризуються високими декоративними властивостями та придатністю до виробництва облицювальної продукції. Разом із тим геологічна історія масиву сприяла розвитку природної тріщинуватості, яка сьогодні виступає одним із головних факторів, що визначають технологічну ефективність видобування.

Загальна характеристика геологічного розрізу родовища наведена в табл. 2.1.

Таблиця 2.1.

Узагальнена характеристика геологічного розрізу Катеринівського родовища лабрадориту

Елемент геологічного розрізу	Характеристика	Потужність, м
Грунтово-рослинний шар	Сучасні відклади	0,1–0,3
Водно-льодовикові піски	Тонкозернисті піски з уламками кристалічних порід	0,0–2,7
Жорстк'яно-каолініста кора вивітрювання	Мезо-кайнозойські відклади з уламками лабрадориту	0,2–1,6
Вивітрілий тріщинуватий лабрадорит	Скельний розкрит, придатний як супутня корисна копалина	0,0–4,0
Незмінений лабрадорит	Основна корисна копалина для отримання блоків	18,0–20,0

Аналіз даних табл. 2.1 свідчить про порівняно просту геологічну будову родовища. Верхню частину розрізу формують сучасні ґрунтово-рослинні

утворення та водно-льодовикові піски, потужність яких змінюється від кількох десятків сантиметрів до 2,7 м. Нижче залягає кора вивітрювання, представлена жорстк'яно-каоліністими відкладами, а також зона вивітрілого тріщинуватого лабрадориту. Найбільшу практичну цінність становить товща незміненого лабрадориту, яка є основним джерелом блочної сировини.

Особливістю родовища є відносно невелика потужність пухких розкривних порід, що позитивно впливає на техніко-економічні показники відкритої розробки. Водночас наявність вивітрілої зони потребує ретельного контролю якості сировини на початкових горизонтах відпрацювання, оскільки саме тут спостерігається найбільша концентрація природних дефектів та структурних порушень.

Наочне уявлення про послідовність залягання окремих геологічних елементів дає зведений геологічний розріз Катеринівського родовища, представлений на рис. 2.1.

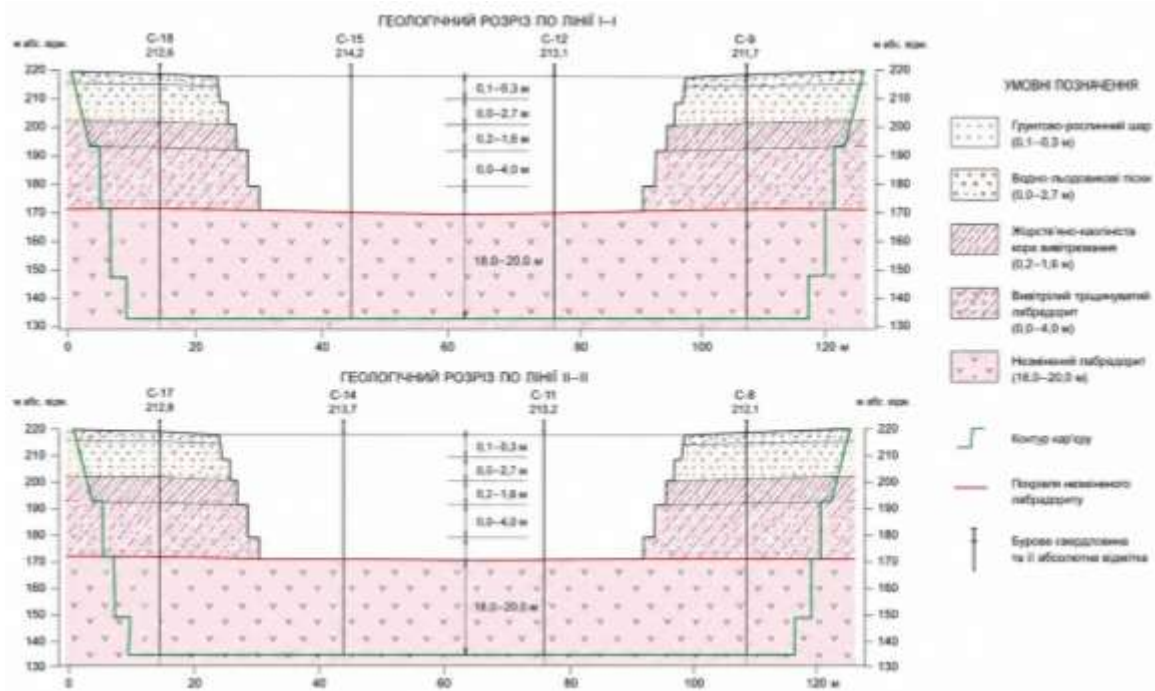


Рис. 2.1. Зведений геологічний розріз Катеринівського родовища лабрадориту

Показаний на рис. 2.1 геологічний розріз підтверджує, що продуктивна товща лабрадориту характеризується достатньо рівномірним заляганням і не ускладнена значними тектонічними порушеннями. Це створює сприятливі передумови для застосування невибухових способів видобування та забезпечує можливість формування монолітів значного об'єму. Крім того, відсутність великих зон дроблення дозволяє більш об'єктивно оцінювати вплив саме технологічних факторів на результати видобування.

Однак для родовищ облицювального каменю визначальне значення має не лише потужність продуктивної товщі, а насамперед характер природної тріщинуватості масиву. Саме система природних тріщин визначає можливі розміри монолітів, напрямки поширення напружень під час відокремлення блоків, рівень втрат каменю та вихід кондиційної продукції [50].

Для оцінювання структурної будови масиву було виконано аналіз природної тріщинуватості, результати якого наведені в табл. 2.2.

Таблиця 2.2.

Основні системи тріщинуватості Катеринівського родовища

Система тріщин	Умовне позначення	Основні напрямки простягання	Характеристика
Поздовжні	S	Пн.З. 340–360°; Пн.Сх. 0–25°	Найбільш поширена система, переважно вертикальна
Поперечні	Q	Пн.З. 290–296°; Пн.Сх. 74°	Рідко поширені, зафіксовано 4 тріщини
Діагональні	D	Пн.З. 300–340°; Пн.Сх. 26–70°	Важлива для формування природної блочності
Первинно-пластові	L	Близькі до горизонтальних	Протяжні, часто перериваються вертикальними тріщинами

Як видно з табл. 2.2, у межах Катеринівського родовища виділяються чотири основні системи тріщин: поздовжні, поперечні, діагональні та первинно-пластові. Кожна із зазначених систем по-різному впливає на формування природної блочності масиву та умови відокремлення монолітів. При цьому для

технології видобування важливим є не лише сам факт наявності тріщин, але й їх орієнтація, густота, протяжність та взаємне розташування.

Аналіз результатів польових спостережень показує, що найбільш поширеною є поздовжня система тріщин, яка характеризується переважно субвертикальним заляганням та простяганням у напрямках Пн.З. $340\text{--}360^\circ$ та Пн.Сх. $0\text{--}25^\circ$. Саме ця система формує основний напрямок природного розділення масиву та створює передумови для отримання блоків правильної геометричної форми. За умови раціонального розташування площин первинного врубу поздовжні тріщини можуть використовуватися як природні площини ослаблення, що дозволяє зменшити енерговитрати на відокремлення монолітів і підвищити вихід кондиційної продукції.

Менш поширеними є поперечні тріщини, кількість яких у межах дослідженої ділянки є порівняно невеликою. Незважаючи на це, їх вплив на технологічні процеси залишається суттєвим, оскільки саме вони часто обмежують довжину потенційних монолітів та визначають максимально можливі габарити блоків. У процесі планування видобувних робіт поперечні тріщини повинні враховуватися як фактор, що може призводити до передчасного відокремлення окремих частин масиву.

Особливу увагу привертає діагональна система тріщин, яка займає проміжне положення між поздовжніми та поперечними структурними елементами. Її практичне значення полягає в тому, що саме вздовж таких тріщин найчастіше відбувається відхилення траєкторії розвитку техногенних тріщин, сформованих під час відокремлення монолітів. У результаті можуть виникати додаткові відколи, порушення геометрії блоків та збільшення обсягів некондиційної продукції. З огляду на це діагональна тріщинуватість розглядається як один із найважливіших факторів, що впливають на стабільність технологічного процесу.

Первинно-пластові тріщини мають переважно субгоризонтальне залягання та характеризуються значною протяжністю. Разом із вертикальними системами

тріщин вони формують природну просторову структуру масиву, визначаючи висоту потенційних монолітів і параметри видобувних уступів. Наявність таких тріщин є позитивним фактором для блочного видобування, оскільки сприяє формуванню природних поверхонь відриву та зменшує обсяг робіт, необхідних для відокремлення каменю [51].

Для більш наочного аналізу просторового розподілу тріщин була побудована роза-діаграма тріщинуватості, наведена на рис. 2.2.

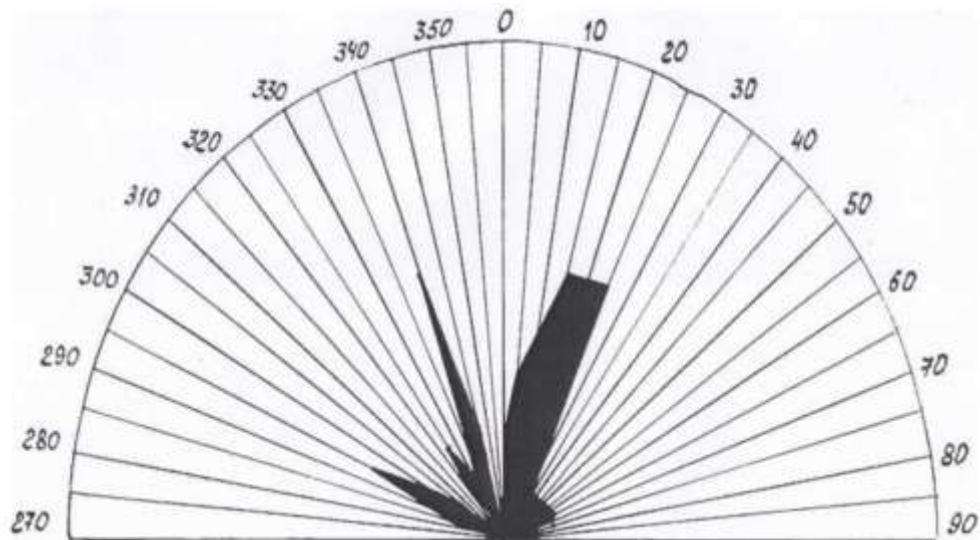


Рис. 2.2. Роза-діаграма тріщинуватості Катеринівського родовища лабрадориту

Результати, представлені на рис. 2.2, підтверджують нерівномірний характер розвитку тріщинуватості в межах досліджуваного масиву. Найбільша концентрація структурних порушень спостерігається в секторах, що відповідають поздовжнім та діагональним системам тріщин. Така анізотропія свідчить про те, що механічні властивості масиву можуть суттєво відрізнятися залежно від напрямку прикладання навантаження.

З технологічної точки зору це означає, що ефективність роботи генераторів тиску хімічних або гідроклінів визначається не лише їх конструктивними характеристиками, але й орієнтацією площини відриву відносно переважаючих систем природних тріщин. Якщо напрямок розвитку техногенної тріщини

збігається з природними площинами ослаблення, процес відокремлення моноліту відбувається більш стабільно та потребує менших енерговитрат. У протилежному випадку можливий розвиток додаткових тріщин, що негативно впливає на якість блочної продукції.

Важливою характеристикою структурної будови родовища є середня відстань між горизонтальними первинно-пластовими тріщинами, яка становить 1,11 м та змінюється в межах від 0,84 до 1,37 м. Отримані значення свідчать про достатньо сприятливі умови для формування монолітів середніх та великих розмірів. Разом із тим наявність локальних ділянок із підвищеною густотою тріщин вказує на необхідність індивідуального підходу до вибору параметрів видобування в різних частинах кар'єрного поля.

Слід зазначити, що природна тріщинуватість у даному дослідженні розглядається не лише як геологічна характеристика родовища, а як один із ключових параметрів, який визначає ефективність комбінованої технології видобування. Саме параметри тріщинуватості надалі будуть використані для оцінювання впливу структури масиву на вихід товарних блоків, величину втрат каменю та показники технологічної ефективності.

Важливою особливістю Катеринівського родовища є відсутність потужних тектонічних зон дроблення, значних скидів та інших структурних порушень регіонального масштабу. Це свідчить про відносно стабільний стан продуктивної товщі та створює сприятливі умови для застосування невибухових технологій видобування. На відміну від сильно порушених масивів, де розвиток техногенних тріщин часто має неконтрольований характер, у даному випадку існує можливість більш точного прогнозування результатів відокремлення монолітів.

Водночас приповерхнева частина родовища характеризується підвищеним ступенем вивітрювання та більшою густиною природних тріщин. У зв'язку з цим верхні горизонти не можуть розглядатися як повноцінне джерело блочної сировини та використовуються переважно як супутня корисна копалина або матеріал для виробництва щебеневої продукції. Основний промисловий інтерес

становить незмінений лабрадорит, який залягає нижче зони інтенсивного вивітрювання та характеризується значно кращими показниками блочності.

За своїми декоративними властивостями лабрадорит Катеринівського родовища належить до високоліквідних видів облицювального каменю. Порода має темно-сіре або майже чорне забарвлення з характерними іризуючими включеннями польових шпатів, які після полірування створюють виразний декоративний ефект. Саме поєднання високих естетичних характеристик і достатньої міцності забезпечує стабільний попит на продукцію родовища як на внутрішньому, так і на зовнішньому ринках.

У технологічному відношенні Катеринівське родовище розробляється відкритим способом із застосуванням транспортної системи розробки. Вибір саме такого способу обумовлений поєднанням сприятливих гірничо-геологічних умов, незначною потужністю розкривних порід та достатньою потужністю продуктивної товщі лабрадориту. Використовувана система розробки забезпечує послідовне відпрацювання запасів із можливістю формування видобувних уступів, параметри яких відповідають вимогам сучасних технологій блочного каменевидобування.

Основні параметри системи розробки родовища наведені в табл. 2.3.

Таблиця 2.3.

Основні параметри системи розробки Катеринівського родовища

Показник	Значення
Площа кар'єру по поверхні, га	3,04
Площа кар'єру по дну, га	1,90
Максимальна глибина кар'єру, м	20
Висота видобувного уступу, м	2,5–6,0
Висота з двоєного уступу, м	6,0
Ширина робочої площадки, м	28,7
Ширина транспортної берми, м	15,5
Робочий кут укосу корисної копалини, град	90
Середній коефіцієнт розкриву, м ³ /м ³	0,16
Теоретичний вихід товарних блоків з масиву, %	23,6

Аналіз даних табл. 2.3 показує, що прийняті параметри кар'єру забезпечують сприятливі умови для застосування технологій, орієнтованих на отримання великогабаритних монолітів. Максимальна глибина кар'єру становить 20 м, що дозволяє здійснювати відпрацювання продуктивної товщі практично по всій її потужності без переходу до підземних способів розробки. Водночас площа кар'єру по дну та по поверхні свідчить про достатній резерв робочого простору для розміщення технологічного обладнання та виконання допоміжних операцій.

Особливе значення для даного дослідження має висота видобувних уступів, яка змінюється від 2,5 до 6,0 м. Саме цей параметр безпосередньо впливає на можливі геометричні розміри монолітів, обсяг підготовчих робіт та характер розвитку тріщин під час відокремлення блока від масиву. Зі збільшенням висоти уступу зростає потенційний об'єм моноліту, однак одночасно підвищуються вимоги до точності формування площин різання та ефективності способу відокремлення [52].

Не менш важливим показником є ширина робочої площадки, яка становить 28,7 м. Такі розміри забезпечують можливість одночасного виконання бурових, різальних, навантажувальних та транспортних операцій без взаємного обмеження технологічних процесів. Крім того, достатня ширина робочого простору дозволяє використовувати різні схеми завалювання монолітів та здійснювати їх подальше розділення на товарні блоки без необхідності додаткового перепланування робочої зони [53].

У технологічному аспекті особливу увагу привертає середній коефіцієнт розкриву, який становить лише $0,16 \text{ м}^3/\text{м}^3$. Таке значення свідчить про високу ефективність використання запасів родовища та відносно невеликі витрати на підготовку нових ділянок до експлуатації. Для підприємств блочного каменевидобування цей показник є важливим фактором економічної ефективності, оскільки дозволяє спрямовувати більшу частину виробничих ресурсів безпосередньо на операції, пов'язані з отриманням товарної продукції.

Значний інтерес становить теоретичний вихід товарних блоків із масиву, який відповідно до проєктних даних становить 23,6 %. Наведене значення характеризує потенційні можливості родовища за ідеальних умов відпрацювання та відсутності додаткових втрат. Однак фактичний вихід кондиційної продукції залежить від значної кількості факторів, серед яких визначальними є природна тріщинуватість, технологія формування площин відриву, спосіб відокремлення монолітів та професійність виконання технологічних операцій. Саме тому одним із завдань даного дослідження є встановлення впливу різних способів відокремлення монолітів на реалізацію потенціалу родовища щодо виходу блочної продукції.

Прийнята на підприємстві технологічна схема передбачає отримання блоків як в одну, так і в дві стадії. Вибір конкретної схеми залежить від структурних особливостей масиву, розмірів моноліту та вимог до кінцевої продукції. Одностадійна схема передбачає безпосереднє отримання товарного блока після його відокремлення від масиву, тоді як двостадійна схема включає попереднє відокремлення великого моноліту з подальшим його поділом на окремі блоки необхідних розмірів [54].

Для умов Катеринівського родовища найбільш характерним є формування монолітів розмірами близько $6,0 \times 6,0 \times 3,0$ м. За таких параметрів об'єм одного моноліту може досягати 108 м^3 , що створює сприятливі передумови для отримання блоків високих товарних груп. Разом із тим збільшення об'єму моноліту супроводжується підвищенням ризику прояву прихованих природних дефектів, тому процес його відокремлення потребує особливо ретельного контролю.

Послідовність основних технологічних операцій підготовки моноліту до виймання наведено на рис. 2.3.



а



б



в



г

Рис. 2.3. Загальна схема підготовки моноліту до відокремлення в умовах Катеринівського родовища: а – формування вертикальних площин моноліту алмазно-канатним різанням; б – закладання газогенерувальної технологічної хімічної суміші «Літокол» у шпури площини відриву; в – утворення тріщини відриву та розкриття площини відокремлення під дією ГТХ «Літокол»; г – завалювання відокремленого моноліту на підшву уступу.

Як видно з рис. 2.3, підготовка моноліту до відокремлення передбачає послідовне виконання комплексу технологічних операцій. На першому етапі за допомогою алмазно-канатного різання формуються вертикальні площини моноліту, які визначають його геометричні параметри та забезпечують мінімальне пошкодження прилеглого масиву (рис. 2.3, а). Після цього вздовж

задньої площини відриву бурять ряд шпурів, у які закладають газогенерувальну технологічну хімічну суміш «Літокол» (рис. 2.3, б).

У процесі тверднення та розширення суміші в шпурах виникають значні розпирні зусилля, під дією яких формується та поступово розкривається тріщина відриву між монолітом і масивом (рис. 2.3, в). Такий спосіб забезпечує відокремлення моноліту без застосування вибухових робіт і суттєво знижує ризик утворення додаткових техногенних тріщин у блочній сировині.

Після повного розкриття площини відриву здійснюється контрольоване завалювання моноліту на підоснову уступу за допомогою гірничо-транспортного обладнання (рис. 2.3, г). Отриманий моноліт надалі може бути розділений на товарні блоки необхідних розмірів для подальшої переробки.

Особливістю наведеної технологічної схеми є поєднання високоточного алмазно-канатного різання з невибуховим способом відокремлення моноліту, що забезпечує збереження природної блочності масиву та зменшення втрат кондиційної продукції під час видобування лабрадориту в умовах Катеринівського родовища.

Для реалізації зазначених технологічних процесів на підприємстві використовується комплекс спеціалізованого гірничого обладнання, характеристика якого наведена в табл. 2.4.

Таблиця 2.4.

Основне обладнання, що використовується на підприємстві

Найменування обладнання	Кількість, од.	Потужність, кВт	Основне призначення
Екскаватор O&K MH6 PMS	1	112	Розробка розкривних порід, допоміжні роботи
Фронтальний навантажувач Volvo L220D	1	259	Завалювання, переміщення та навантаження блоків
Бульдозер Т-170	1	218	Зачищення покрівлі, допоміжні роботи
Автосамоскид КрАЗ	3	176	Транспортування порід і блоків

Як видно з табл. 2.4, виробничий процес на Катеринівському родовищі забезпечується комплексом гірничих машин, які охоплюють усі основні етапи відкритої розробки – від підготовки робочих майданчиків до транспортування готової продукції. При цьому кожна одиниця обладнання виконує чітко визначені функції у загальному технологічному циклі, а ефективність їхньої взаємодії безпосередньо впливає на продуктивність підприємства та якість видобутої блочної продукції.

Центральне місце у виробничому процесі займає фронтальний навантажувач Volvo L220D, який використовується під час завалювання монолітів, переміщення блоків та виконання навантажувальних операцій. Враховуючи значну масу монолітів і товарних блоків, надійність роботи даного обладнання є одним із ключових факторів забезпечення безперервності виробництва. Крім того, саме на етапі завалювання монолітів можуть виникати додаткові пошкодження каменю, тому технічні характеристики навантажувача та кваліфікація оператора безпосередньо впливають на збереження якості продукції.

Екскаватор O&K MN6 PMS використовується переважно для виконання розкривних робіт та допоміжних технологічних операцій. Незважаючи на те, що безпосередньо у процесі видобування блоків його роль є другорядною, саме від якості підготовки робочих горизонтів значною мірою залежить ефективність наступних етапів видобування. Раціональна організація розкривних робіт дозволяє забезпечити стабільні параметри уступів і створити необхідні умови для виконання високоточних операцій алмазно-канатного різання.

Бульдозер Т-170 використовується для зачищення покрівлі корисної копалини, планування робочих площадок та виконання допоміжних робіт. Його застосування особливо важливе на початкових етапах освоєння нових ділянок кар'єрного поля, коли необхідно забезпечити доступ до продуктивної товщі та створити безпечні умови для роботи бурового і різального обладнання.

Транспортування гірничої маси та готової продукції здійснюється автосамоскидами КрАЗ. Враховуючи специфіку блочного каменевидобування, транспортна складова виконує не лише функцію переміщення вантажів, але й забезпечує логістичну взаємодію між окремими технологічними операціями. Рациональна організація транспортних процесів дозволяє мінімізувати простой обладнання та підвищити загальну продуктивність підприємства.

Загалом аналіз структури використовуваного обладнання свідчить про достатній рівень технічного забезпечення підприємства для проведення виробничих випробувань та дослідження різних способів відокремлення монолітів. Водночас слід зазначити, що безпосередньо на вихід кондиційної продукції найбільший вплив мають не транспортні чи навантажувальні операції, а процеси формування площин різання та відокремлення моноліту від масиву. Саме ці операції визначають характер розвитку тріщин, величину технологічних втрат та якість отриманих блоків.

Узагальнення результатів аналізу гірничо-геологічних та технологічних умов Катеринівського родовища дозволяє зробити висновок про його репрезентативність як об'єкта дослідження комбінованих технологій видобування облицювального каменю. Родовище характеризується достатньою потужністю продуктивної товщі, сприятливими умовами відкритої розробки та відсутністю значних тектонічних порушень, що дозволяє мінімізувати вплив випадкових геологічних факторів на результати досліджень.

Разом із тим наявність декількох систем природної тріщинуватості створює характерні для більшості родовищ декоративного каменю умови формування монолітів і дозволяє оцінити ефективність різних способів їх відокремлення в реальних виробничих умовах. Встановлено, що найбільший вплив на результати видобування мають параметри природної тріщинуватості масиву, геометричні характеристики монолітів та технологія формування площини відриву.

Враховуючи зазначене, подальші дослідження доцільно зосередити на вивченні закономірностей формування первинного врубу та процесів

відокремлення монолітів від масиву. Саме на цьому етапі закладаються основні передумови для отримання кондиційної блочної продукції, а також формуються технологічні фактори, які надалі можуть бути використані для математичного моделювання показників ефективності видобування.

Таким чином, гірничо-геологічні умови Катеринівського родовища, особливості природної тріщинуватості та застосовувана система розробки створюють необхідні передумови для проведення експериментальних досліджень комбінованої технології видобування облицювального каменю та розроблення математичних залежностей між параметрами масиву, технологічними характеристиками процесу відокремлення і показниками якості отриманої блочної продукції.

2.2. Методика дослідження процесів формування первинного врубу

Процес формування первинного врубу є одним із ключових етапів технології видобування природного облицювального каменю, оскільки саме на цій стадії створюються умови для подальшого відокремлення моноліту від масиву та визначається характер розвитку техногенних тріщин. На відміну від традиційних технологій видобування скельних порід, де основною метою є руйнування масиву з максимальною продуктивністю, при видобуванні блочного каменю першочергового значення набуває забезпечення контрольованого процесу відділення моноліту із збереженням його цілісності та мінімізацією втрат корисної копалини [55].

Практика експлуатації родовищ декоративного каменю свідчить, що вихід кондиційних блоків визначається не окремим технологічним параметром, а сукупністю взаємопов'язаних факторів, серед яких особливу роль відіграють природна тріщинуватість масиву, геометричні параметри моноліту, схема формування площин різання та спосіб створення відривного зусилля. Внаслідок цього ефективність технології видобування повинна оцінюватися не лише за

фактом отримання моноліту, а й з урахуванням ступеня використання природної блочності родовища та рівня техногенних пошкоджень породи.

Аналіз результатів попередніх досліджень показав [50-56], що більшість існуючих методик оцінювання ефективності видобування блочного каменю орієнтовані переважно на окремі виробничі показники, такі як продуктивність обладнання, обсяги буріння або вихід товарної продукції. При цьому недостатньо уваги приділяється взаємозв'язку між структурою масиву та параметрами технологічного процесу. У результаті виникає необхідність розроблення комплексного підходу, який дозволяє розглядати процес формування первинного врубу як систему взаємодії геологічних, конструктивних та технологічних факторів.

У даній роботі процес формування первинного врубу розглядається як багатofакторна система, в межах якої кінцевий результат визначається сукупним впливом характеристик масиву та параметрів технології. Такий підхід дозволяє перейти від якісної оцінки процесів видобування до їх кількісного аналізу та подальшого математичного моделювання [57].

Загальна логіка проведення досліджень наведена на рис. 2.4.

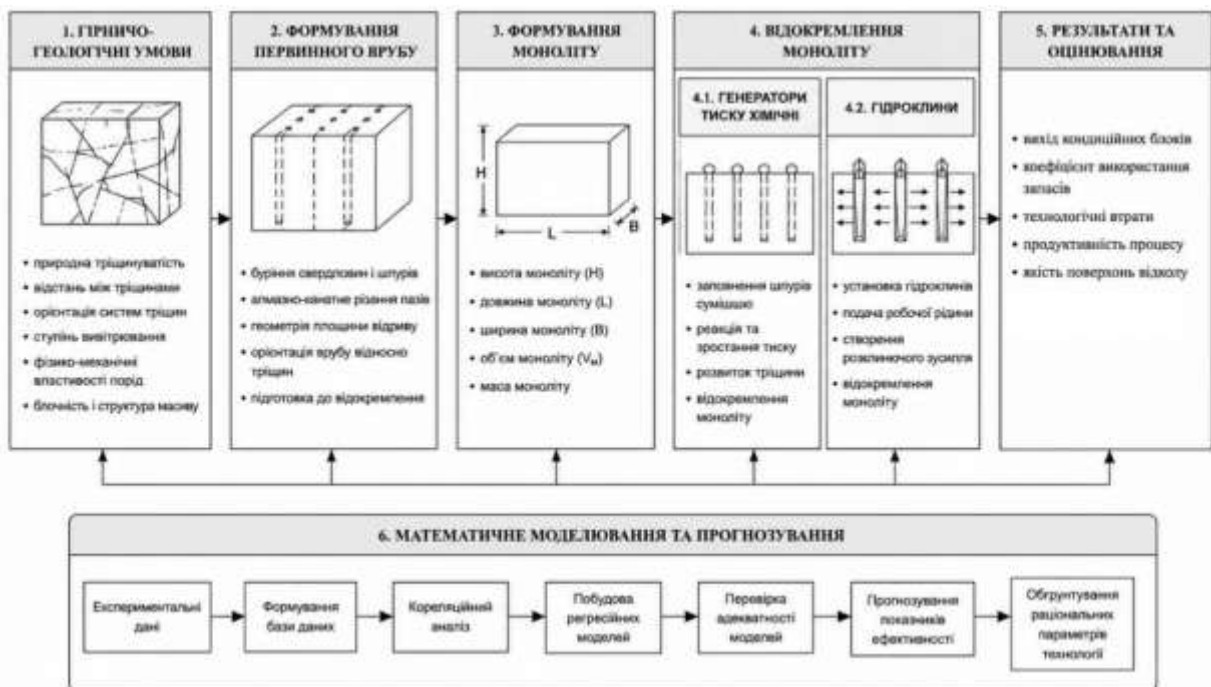


Рис. 2.4. Методологія дослідження процесу формування первинного врубу

Відповідно до прийнятої концепції основним об'єктом дослідження виступає система «масив – первинний вруб – моноліт», у межах якої всі досліджувані параметри об'єднуються в єдиний комплекс факторів впливу. Кінцевим результатом функціонування цієї системи є формування моноліту визначених розмірів та якості, придатного для подальшого розділення на товарні блоки.

Для забезпечення можливості подальшого математичного аналізу всі фактори було згруповано за характером їх впливу на технологічний процес.

До першої групи віднесено геологічні фактори, які характеризують природний стан масиву та практично не можуть бути змінені технологічними заходами. До них належать середня відстань між тріщинами, густина тріщинуватості, орієнтація основних систем тріщин, ступінь вивітрювання порід та потужність продуктивної товщі. Саме ці параметри визначають природну блочність родовища та створюють початкові умови для формування монолітів.

До другої групи належать конструктивні фактори. Вони характеризують геометричні параметри моноліту та особливості його просторового розташування в масиві. Основними представниками цієї групи є висота уступу, довжина моноліту, ширина моноліту, площа площини відриву та об'єм моноліту. Зазначені показники безпосередньо впливають на величину відривних зусиль та характер розвитку техногенних тріщин під час відокремлення каменю.

Третю групу становлять технологічні фактори, які визначаються параметрами виконання гірничих робіт. До них належать діаметр шпурів, крок їх розташування, глибина буріння, тип відривного пристрою, параметри різання та технологія створення площини відриву [58].

Взаємозв'язок між зазначеними групами факторів наведено на рис. 2.5.

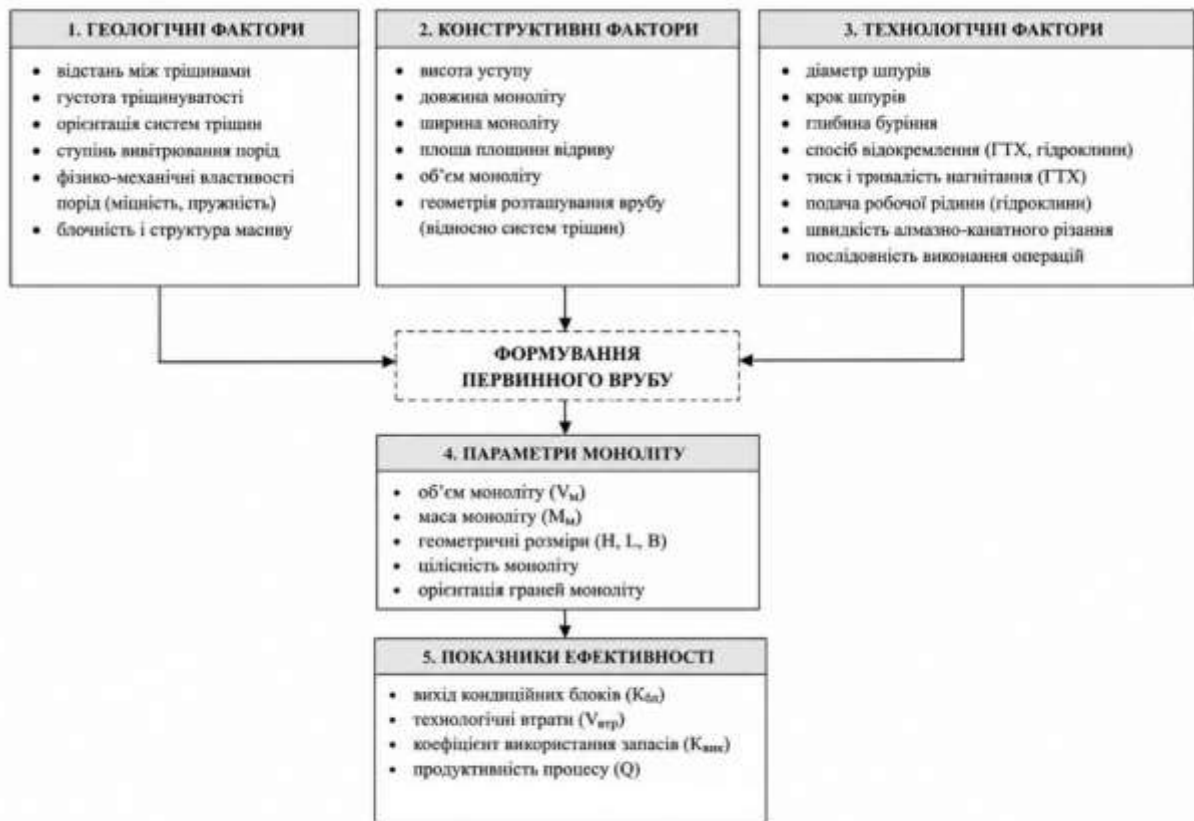


Рис. 2.5. Система факторів, що впливають на процес формування первинного врубів

Проведений аналіз показав, що найбільш чутливими до зміни технологічних параметрів є показники виходу кондиційних блоків, питомих втрат каменю та коефіцієнта використання запасів. Саме ці показники були прийняті як основні критерії оцінювання ефективності досліджуваних технологічних рішень.

Для забезпечення можливості порівняння різних способів відокремлення монолітів у роботі використано принцип інтегрального оцінювання результатів видобування. Його сутність полягає в тому, що ефективність технології визначається не одним показником, а сукупністю взаємопов'язаних критеріїв, які характеризують якість отриманого моноліту, рівень втрат та ступінь використання природної блочності масиву.

З цією метою запропоновано розглядати процес формування первинного врубів через функціональну систему формування моноліту, який враховує одночасний вплив геологічних умов та технологічних параметрів. Використання такого підходу дозволяє перейти від аналізу окремих виробничих показників до комплексної оцінки технології видобування та створює основу для подальшого математичного моделювання.

Враховуючи складність взаємодії природних і технологічних факторів, у роботі використано принцип багатфакторного аналізу, відповідно до якого кожен результат видобування розглядається як наслідок одночасного впливу декількох груп параметрів [59]. У межах даного підходу процес формування моноліту представлено у вигляді функціональної системи:

$$R = f(G, C, T),$$

де R – результат формування моноліту;

G – сукупність геологічних факторів;

C – сукупність конструктивних факторів;

T – сукупність технологічних факторів.

Такий підхід дозволяє розглядати технологічний процес не як набір окремих операцій, а як єдину систему, в якій зміна будь-якого параметра впливає на кінцеві показники видобування [60].

Для кількісного опису процесу формування первинного врубів сформовано структуру дослідження, яка включає основні вхідні параметри та результуючі показники ефективності технологічного процесу (рис. 2.6).

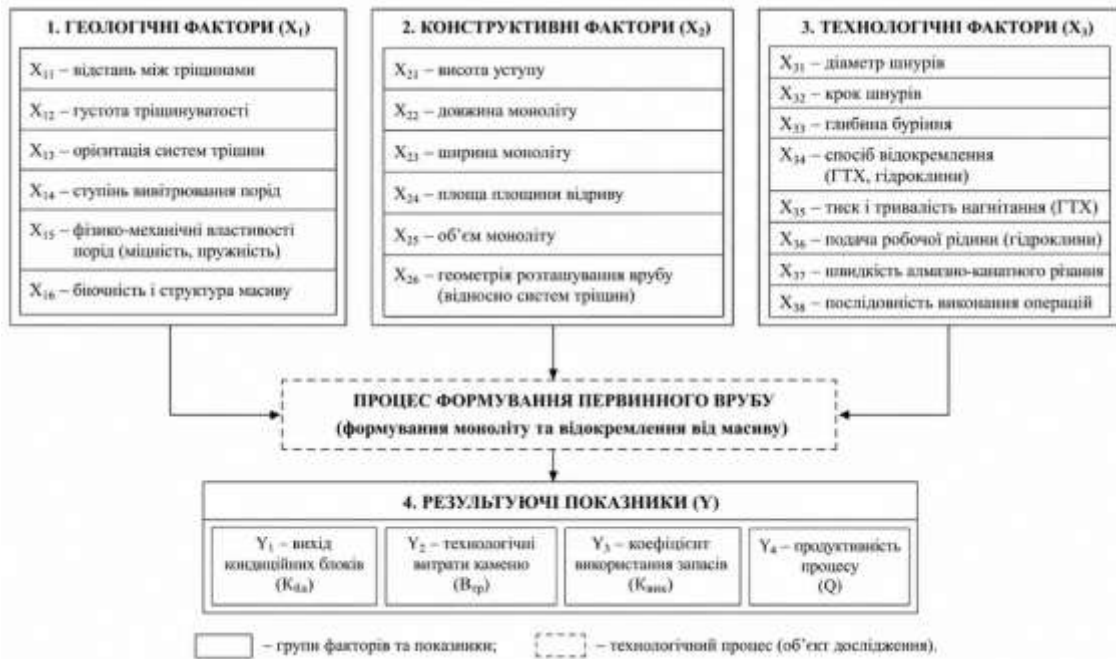


Рис. 2.6. Структура дослідження процесу формування первинного врубів

З урахуванням особливостей Катеринівського родовища до основних факторів дослідження були віднесені:

- середня відстань між природними тріщинами $L_{тр}$, м;
- висота уступу H , м;
- площа площини відриву $S_{від}$, m^2 ;
- об'єм моноліту V_M , m^3 ;
- спосіб відокремлення моноліту P ;
- питомий обсяг бурових робіт $q_{бур}$, m/m^3 .

Вибір зазначених факторів обумовлений результатами аналізу виробничих даних та попередніх досліджень, які свідчать про їх визначальний вплив на формування блочної продукції [61].

Для забезпечення порівнянності результатів усі дослідження виконувалися за єдиною схемою спостережень. На кожній експериментальній ділянці проводилися:

- вимірювання параметрів тріщинуватості;
- визначення геометричних характеристик моноліту;

- фіксація параметрів буріння;
- облік витрат матеріалів;
- оцінювання фактичного виходу товарних блоків;
- визначення обсягів втрат та відходів.

Загальний алгоритм проведення досліджень наведено на рис. 2.7.

Отримані експериментальні дані формували базу для подальшої статистичної обробки, встановлення кореляційних залежностей між досліджуваними факторами та побудови прогнозних моделей ефективності комбінованої технології видобування облицювального каменю. Саме використання кількісного підходу дозволяє перейти від емпіричного вибору параметрів технології до їх науково обґрунтованого прогнозування залежно від умов конкретного родовища [62].



Рис. 2.7. Алгоритм дослідження процесу формування первинного врубу та відокремлення моноліту

Для забезпечення достовірності отриманих результатів дослідження проводилися безпосередньо у виробничих умовах Катеринівського родовища

лабораториту. Використання виробничих експериментів дозволило врахувати реальний вплив гірничо-геологічних факторів, який практично неможливо повністю відтворити в лабораторних умовах. Особливу увагу приділено забезпеченню порівнянності результатів, що досягалося шляхом виконання досліджень на ділянках із близькими структурними характеристиками масиву та однаковими геометричними параметрами монолітів [63].

У процесі досліджень кожний експериментальний цикл включав комплекс послідовних операцій, починаючи від визначення параметрів природної тріщинуватості та закінчуючи оцінюванням якості отриманої блочної продукції. Такий підхід дозволив сформувати єдину базу даних, яка містить як характеристики масиву, так і результати застосування різних технологічних рішень.

Схему формування експериментальної вибірки наведено на рис. 2.8.

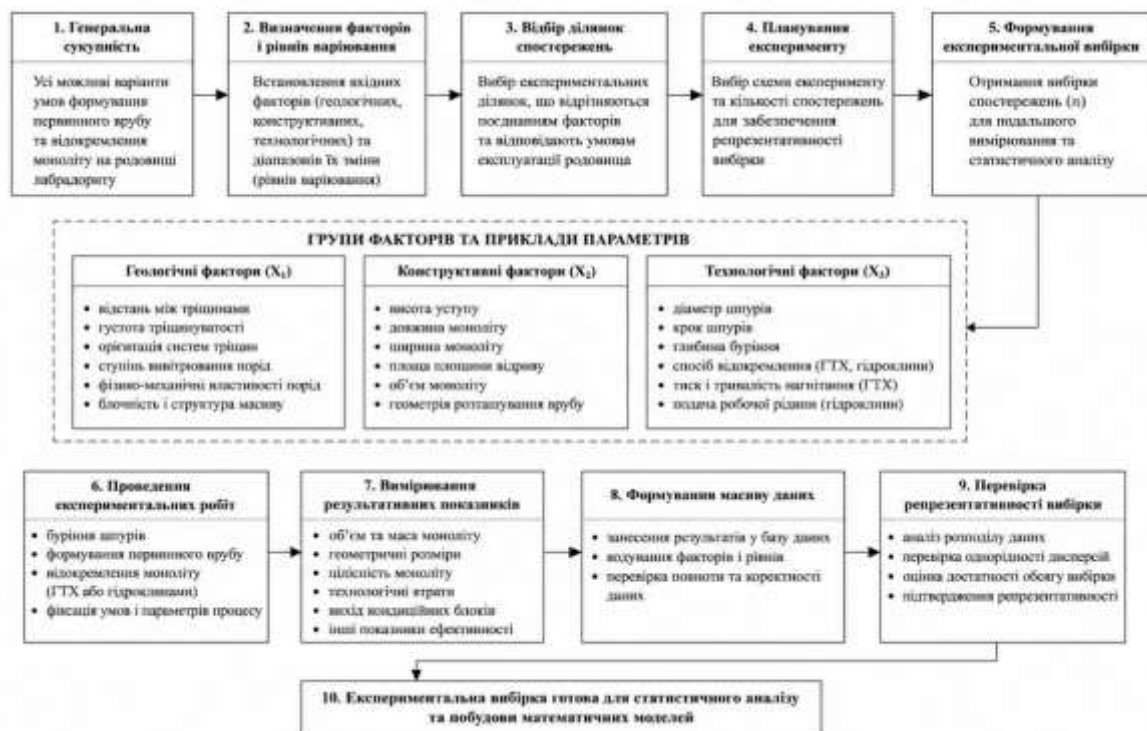


Рис. 2.8. Схема формування експериментальної вибірки дослідження

Експериментальна вибірка формувалася за результатами виробничих досліджень, виконаних у межах Катеринівського родовища лабрадориту. До

складу вибірки включалися результати спостережень, отримані на ділянках із різними параметрами природної тріщинуватості, геометричними характеристиками монолітів та технологічними схемами їх відокремлення.

Під час формування вибірки забезпечувалося охоплення максимально можливого діапазону зміни досліджуваних факторів, що дозволило підвищити репрезентативність експериментальних даних та забезпечити можливість подальшого встановлення статистично значущих закономірностей між параметрами масиву та показниками ефективності видобування.

Отримані результати були систематизовані у вигляді єдиної бази даних, яка використовувалася для виконання кореляційного аналізу, побудови регресійних моделей та перевірки гіпотез щодо впливу окремих факторів на результати формування монолітів.

Важливою особливістю сформованої експериментальної вибірки є одночасне врахування як природних характеристик масиву, так і технологічних параметрів виконання робіт. Такий підхід дозволяє оцінити не лише окремий вплив кожного фактора, але й встановити закономірності їх спільної дії на результати формування монолітів [64].

Для забезпечення коректності подальшого аналізу всі експериментальні дані були приведені до єдиної структури з використанням стандартизованої системи показників. Для кожного виробничого експерименту формувався набір вхідних параметрів, що характеризували геологічний стан масиву, геометричні характеристики моноліту та технологічні особливості його відокремлення. Одночасно визначалися результуючі показники, які відображали ефективність реалізованої технологічної схеми.

У результаті була сформована інформаційна база дослідження, що містила комплекс взаємопов'язаних параметрів процесу видобування. Наявність такої бази створює можливість переходу від якісного аналізу технологічних процесів до їх кількісного опису та прогнозування.

Одним із головних завдань подальшого аналізу стало встановлення факторів, які найбільшою мірою впливають на вихід кондиційної продукції та рівень використання запасів родовища. З огляду на значну кількість досліджуваних параметрів застосування традиційного порівняльного аналізу є недостатнім, оскільки не дозволяє врахувати складні взаємозв'язки між окремими характеристиками масиву та технологічного процесу.

У зв'язку з цим подальше опрацювання експериментальних результатів здійснювалося із застосуванням методів математичної статистики та багатфакторного моделювання. Такий підхід дозволяє не лише встановити наявність статистично значущих залежностей між досліджуваними параметрами, але й отримати математичні моделі, придатні для прогнозування результатів видобування в різних гірничо-геологічних умовах [65].

Особливе значення при цьому має встановлення кількісного впливу окремих факторів на формування моноліту, який у даному дослідженні розглядається як основний критерій оцінювання результативності технологічних рішень. Отримані залежності повинні забезпечити можливість вибору раціональних параметрів комбінованої технології видобування та підвищення ефективності використання природних запасів облицювального каменю.

Послідовність переходу від експериментальних спостережень до математичних моделей, які використовуються для прогнозування технологічних показників видобування, наведено на рис. 2.9.

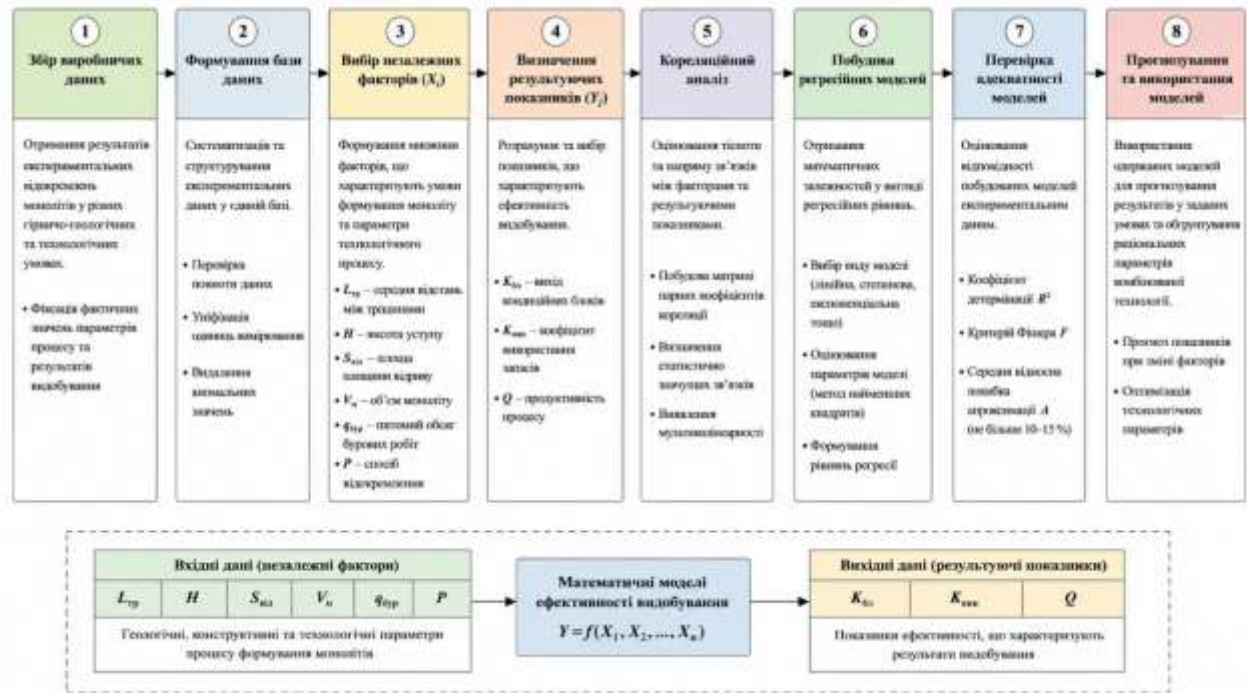


Рис. 2.9. Послідовність побудови математичних моделей ефективності видобування

Таким чином, запропонована методика дослідження процесів формування первинного врубів базується на комплексному врахуванні природних, конструктивних та технологічних факторів і забезпечує можливість переходу від виробничих спостережень до кількісного прогнозування результатів видобування. Використання системного підходу, інтегрального показника ефективності та багатофакторного аналізу створює методичну основу для подальшого обґрунтування параметрів комбінованої технології видобування облицювального каменю, результати якого наведені у наступних розділах дисертаційної роботи.

2.3. Методика математичного моделювання параметрів формування монолітів

Отримані під час виробничих досліджень результати створюють інформаційну основу для встановлення кількісних закономірностей між параметрами природного масиву та показниками ефективності видобування

облицювального каменю. Проте безпосереднє порівняння окремих експериментальних результатів не дозволяє оцінити складний характер взаємодії досліджуваних факторів та виконати прогнозування ефективності технологічних рішень для інших гірничо-геологічних умов.

У зв'язку з цим у роботі використано підхід, який передбачає побудову математичних моделей на основі виробничих експериментальних даних. Основною метою моделювання є встановлення кількісних залежностей між параметрами масиву, характеристиками технологічного процесу та показниками формування блочної продукції [66].

На відміну від традиційного аналізу, де окремі параметри розглядаються ізольовано, запропонований підхід базується на системному урахуванні геологічних, конструктивних та технологічних факторів. Це дозволяє досліджувати процес формування моноліту як єдину взаємопов'язану систему.

Для побудови моделей усі досліджувані параметри було розподілено на дві групи. До першої групи віднесено незалежні фактори, які характеризують умови формування моноліту та параметри технологічного процесу. До другої групи включено результуючі показники, що відображають ефективність видобування.

Як незалежні змінні прийнято:

- середню відстань між природними тріщинами масиву ($L_{тр}$), м;
- висоту уступу (H), м;
- площу площини відриву ($S_{від}$), m^2 ;
- об'єм моноліту (V_m), m^3 ;
- питомий обсяг бурових робіт ($q_{бур}$), m/m^3 ;
- спосіб відокремлення моноліту (P).

До результуючих показників віднесено:

- вихід кондиційних блоків ($K_{бл}$);
- коефіцієнт використання запасів ($K_{вик}$);
- продуктивність процесу (Q);

Такий розподіл дозволяє оцінити внесок кожного фактора у формування кінцевого результату та визначити параметри, які найбільшою мірою впливають на ефективність технології.

Загальний вигляд математичної моделі досліджуваного процесу прийнято у формі багатofакторної функціональної залежності:

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_n),$$

де (Y) – результуючий показник ефективності; (X_i) – незалежні фактори впливу.

У межах даного дослідження особлива увага приділяється інтегральній оцінці результатів формування моноліту. Це обумовлено тим, що окремі показники не завжди дозволяють об'єктивно оцінити переваги тієї чи іншої технологічної схеми. Наприклад, збільшення продуктивності може супроводжуватися підвищенням втрат каменю, а збільшення виходу блоків – зростанням трудомісткості виконання робіт.

Побудова математичних залежностей виконувалася на основі результатів виробничих експериментів, отриманих у межах Катеринівського родовища лабрадориту. Для кожної дослідної ділянки визначалися значення незалежних факторів та відповідні результуючі показники. На основі сформованої бази даних здійснювався пошук статистично значущих залежностей між параметрами системи.

Перевірка адекватності отриманих моделей виконувалася за величиною коефіцієнта детермінації та середньої похибки апроксимації. До подальшого аналізу приймалися лише ті залежності, які забезпечували достатній рівень достовірності та відповідали фізичній сутності досліджуваних процесів.

Запропонована методика математичного моделювання створює основу для кількісного оцінювання ефективності комбінованої технології видобування облицювального каменю та забезпечує можливість подальшого обґрунтування її

раціональних параметрів. Отримані в результаті моделювання залежності використовуються у третьому розділі для прогнозування виходу кондиційної продукції, рівня використання запасів та визначення найбільш ефективних технологічних рішень для умов Катеринівського родовища лабрадориту.

Висновки до розділу 2

1. Виконано аналіз гірничо-геологічних умов Катеринівського родовища лабрадориту та встановлено, що продуктивна товща представлена незміненими лабрадоритами потужністю 18–20 м, перекритими відносно малопотужними розкривними відкладами. Такі умови є сприятливими для застосування відкритого способу розробки та формування великогабаритних монолітів облицювального каменю.

2. Визначено, що ефективність формування монолітів значною мірою залежить від параметрів природної тріщинуватості масиву, які обумовлюють геометричні розміри потенційних блоків, рівень технологічних втрат та ступінь використання запасів родовища. Показано, що орієнтація площини відриву відносно основних систем тріщин є одним із ключових факторів забезпечення цілісності моноліту.

3. Розроблено методику дослідження процесу формування первинного врубу та відокремлення моноліту, в межах якої процес видобування розглядається як взаємодія геологічних, конструктивних і технологічних факторів. Запропонований підхід дозволяє комплексно оцінювати умови формування монолітів та забезпечує можливість їх подальшого математичного опису.

4. Обґрунтовано систему незалежних факторів, що характеризують умови формування монолітів, до складу якої включено середню відстань між природними тріщинами, висоту уступу, площу площини відриву, об'єм моноліту, питомий обсяг бурових робіт та спосіб відокремлення моноліту. Як результуючі показники прийнято вихід кондиційних блоків, коефіцієнт використання запасів та продуктивність процесу.

5. Сформовано методичний підхід до отримання та систематизації експериментальних даних, який передбачає проведення виробничих досліджень у реальних умовах розробки родовища, формування репрезентативної вибірки та створення єдиної інформаційної бази для подальшого аналізу закономірностей процесу відокремлення монолітів.

6. Розроблено методику математичного моделювання параметрів формування монолітів, яка базується на використанні виробничих експериментальних даних та передбачає встановлення кількісних залежностей між характеристиками природного масиву, параметрами технологічного процесу і показниками ефективності видобування. Отримані методичні положення є основою для побудови математичних моделей та обґрунтування раціональних параметрів комбінованої технології видобування облицювального каменю, що наведено в третьому розділі дисертаційної роботи.

РОЗДІЛ 3. РОЗРОБЛЕННЯ ТА ОБҐРУНТУВАННЯ КОМБІНОВАНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ ВИДОБУВАННЯ ОБЛИЦЮВАЛЬНОГО КАМЕНЮ

3.1. Обґрунтування технологічних параметрів комбінованого способу видобування

3.1.1. Обґрунтування лінійних параметрів моноліту

Ефективність видобування природного облицювального каменю значною мірою визначається параметрами моноліту, які впливають на обсяги підготовчих робіт, рівень використання природної блочності масиву та можливість отримання кондиційної продукції. Тому основним завданням даного етапу досліджень є встановлення раціональних геометричних параметрів моноліту та відповідних параметрів підготовчих робіт для умов Катеринівського родовища лабрадориту.

Враховуючи прийняту технологію видобування, основними параметрами моноліту є його довжина (L_M), ширина (B_M) та висота ($H_{уст}$).

Об'єм моноліту визначається залежністю:

$$V_M = L_M \cdot B_M \cdot H_{уст}.$$

Для умов родовища відповідно до результатів досліджень природної тріщинуватості та геометрії монолітів прийнято:

$$L_M = 6\text{м};$$

$$B_M = 6\text{м}.$$

Тоді:

$$V_M = 36H_{уст}.$$

Залежність об'єму моноліту від висоти уступу наведена в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1

Залежність об'єму моноліту від висоти уступу

Висота уступу, м	Об'єм моноліту, м ³
2,5	90
3,0	108
5,0	180
6,0	216

Аналіз результатів показує, що збільшення висоти уступу від 2,5 до 6,0 м забезпечує зростання об'єму моноліту у 2,4 раза. Разом із тим збільшення об'єму моноліту супроводжується зростанням складності його відокремлення та збільшенням обсягів підготовчих робіт.

Одним із головних показників технологічної ефективності є питоме буріння, яке характеризує обсяг бурових робіт, необхідних для підготовки одиниці об'єму моноліту. Для встановлення характеру його зміни залежно від висоти уступу проведено відповідні розрахунки, результати яких наведено на рис. 3.1.

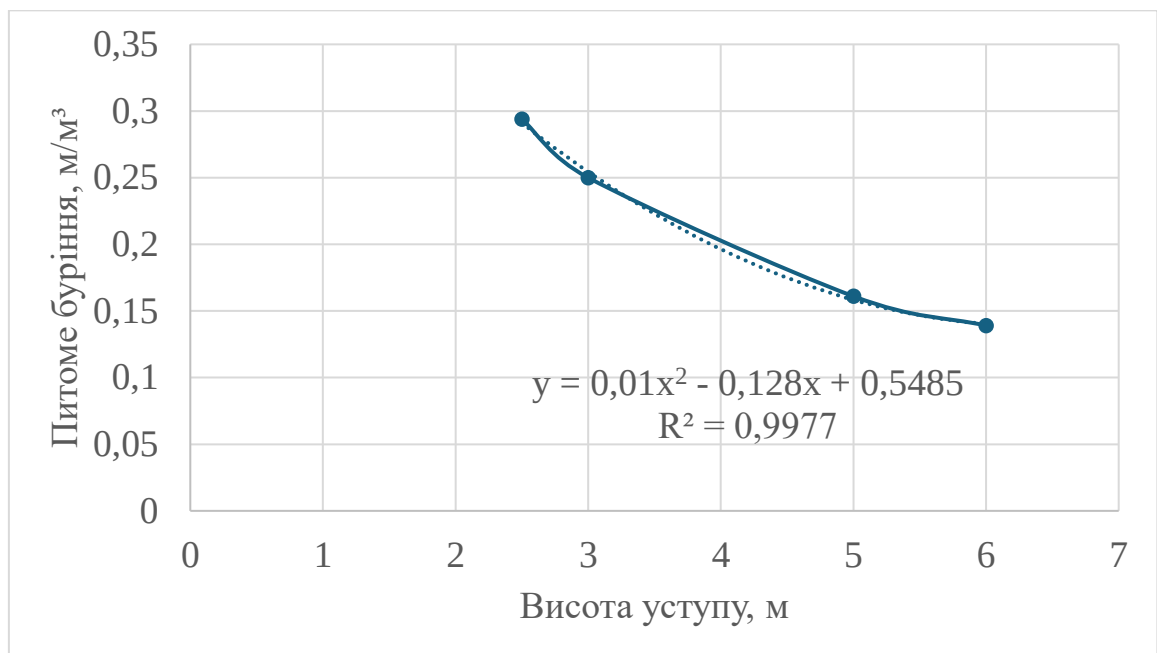


Рис. 3.1. Вплив висоти уступу на питомі обсяги буріння при формуванні моноліту

Для прийнятої схеми формування моноліту довжина буріння визначається залежністю:

$$L_{\text{бур}} = 2(L_{\text{м}} + B_{\text{м}}) + H_{\text{уст}}.$$

Після підстановки прийнятих параметрів:

$$L_{\text{бур}} = 24 + H_{\text{уст}}.$$

Питоме буріння становить:

$$q_{\text{бур}} = \frac{L_{\text{бур}}}{V_{\text{м}}}.$$

Результати розрахунків наведено в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2

Вплив висоти уступу на питоме буріння

Висота уступу, м	Об'єм моноліту, м³	Довжина буріння, м	Питоме буріння, м/м³
2,5	90	26,5	0,294
3,0	108	27,0	0,250
5,0	180	29,0	0,161
6,0	216	30,0	0,139

З отриманих результатів видно, що збільшення висоти уступу приводить до зменшення питомого буріння. Найбільше зниження спостерігається в інтервалі від 2,5 до 5,0 м.

Однак вибір висоти уступу лише за критерієм мінімального питомого буріння є недостатнім, оскільки при збільшенні висоти моноліту зростає ймовірність його перетину природними тріщинами. Згідно з результатами

дослідження тріщинуватості, середня відстань між природними тріщинами на родовищі становить близько 1,1 м. При висоті уступу 5–6 м моноліт перетинає вже 4–5 інтервалів природної тріщинуватості, що збільшує ризик формування внутрішніх дефектів (табл. 3.3).

Висота уступу впливає не лише на обсяги підготовчих робіт, але й на структурну будову сформованого моноліту. Зі збільшенням розмірів моноліту зростає ймовірність перетину ним природних тріщин різних систем, що безпосередньо впливає на якість блочної продукції. Результати оцінювання зміни кількості природних тріщин у межах моноліту залежно від висоти уступу наведено на рис. 3.2.

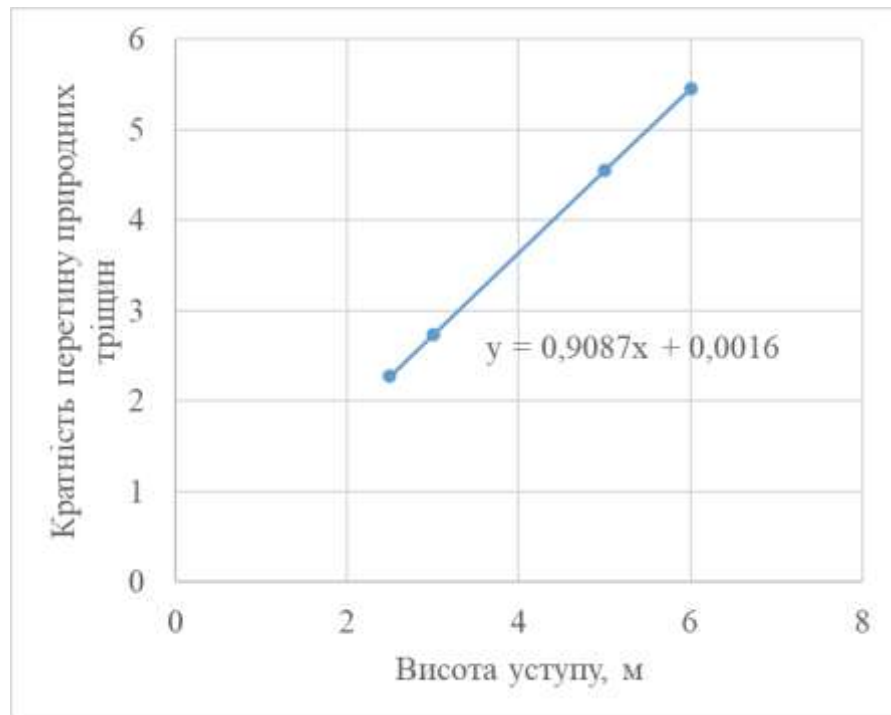


Рис. 3.2. Вплив висоти уступу на кількість природних тріщин у межах моноліту

Для кількісної оцінки впливу тріщинуватості введено показник кратності перетину природних структур:

$$K_{\text{тр}} = \frac{H_{\text{уст}}}{L_{\text{тр}}},$$

де:

$$(L_{\text{тр}} = 1,1\text{м}).$$

Таблиця 3.3

Вплив висоти уступу на кратність перетину природних тріщин

Висота уступу, м	$(K_{\text{тр}})$
2,5	2,27
3,0	2,73
5,0	4,55
6,0	5,45

З рис. 3.2 видно, що зі збільшенням висоти уступу одночасно змінюються два показники, які по-різному впливають на ефективність видобування. З одного боку, збільшується об'єм моноліту та зменшуються питомі витрати буріння. З іншого боку, зростає кількість природних тріщин, що потрапляють у межі моноліту та можуть спричинити його руйнування.

Для умов Катеринівського родовища середня відстань між природними тріщинами становить 1,1 м. При висоті уступу 3 м у межах моноліту знаходиться в середньому 2–3 природні тріщини, тоді як при висоті 6 м – вже 5–6 тріщин. При цьому кратність перетину природних тріщин зростає з 2,73 до 5,45, тобто майже у 2 рази. Водночас питоме буріння зменшується лише з 0,25 до 0,139 м/м³.

Таким чином, збільшення висоти уступу понад 3 м забезпечує відносно незначне скорочення обсягів бурових робіт, але суттєво підвищує ризик розділення моноліту по природних площинах ослаблення та формування внутрішніх дефектів. Це призводить до зростання виходу некондиційної продукції та втрат блочного каменю.

З урахуванням отриманих залежностей для подальших досліджень приймається моноліт розмірами 6×6×3 м об'ємом 108 м³. Висота уступу 3,0 м є найбільш раціональною для умов Катеринівського родовища, оскільки

забезпечує компроміс між зменшенням обсягів підготовчих робіт та збереженням структурної цілісності моноліту.

Після визначення раціональних геометричних параметрів моноліту для умов Катеринівського родовища лабрадориту наступним етапом досліджень є обґрунтування параметрів його відокремлення від масиву. Саме на цьому етапі формуються умови розвитку тріщини відриву, від яких залежать цілісність моноліту, рівень технологічних втрат та подальший вихід кондиційної блочної продукції.

На відміну від вибухових технологій, комбінований спосіб передбачає попереднє формування відкритих поверхонь моноліту алмазно-канатним різанням із подальшим його відокремленням невибуховими методами. За таких умов якість відокремлення визначається не лише властивостями масиву, але й параметрами буріння та схемою прикладання навантаження вздовж площини відриву.

Основними технологічними параметрами, що впливають на процес відокремлення моноліту, є:

- крок розташування шпура;
- діаметр шпура;
- глибина шпура;
- спосіб прикладання навантаження до площини відриву.

Для встановлення раціональних значень зазначених параметрів виконано моделювання процесу відокремлення моноліту розмірами $6 \times 6 \times 3$ м, який був визначений у підрозділі 3.1 як найбільш доцільний для умов Катеринівського родовища.

3.1.2. Вплив діаметра шпурів на навантаження площини відриву

Одним із факторів, що впливає на ефективність відокремлення моноліту від масиву, є діаметр шпурів. Його зміна впливає одночасно на площу контакту робочого органу гідроклина з породою, можливий крок розташування шпурів та

технологічні втрати каменю під час буріння. З метою встановлення закономірностей такого впливу виконано розрахунковий експеримент для шпурів діаметром 32, 36, 40, 45 та 50 мм. Дослідження проводили для моноліту розмірами 6×6×3 м, прийнятого за результатами попередніх досліджень як раціональний для умов Катеринівського родовища лабрадориту.

При відокремленні монолітів із застосуванням гідроклинових та клинових пристроїв важливим параметром є площа контакту робочого органу з породою, яка безпосередньо залежить від діаметра шпура. Збільшення площі контакту сприяє більш рівномірному розподілу навантаження та зменшенню локальних концентрацій напружень. Розрахункову залежність цього показника від діаметра шпура наведено на рис. 3.3.

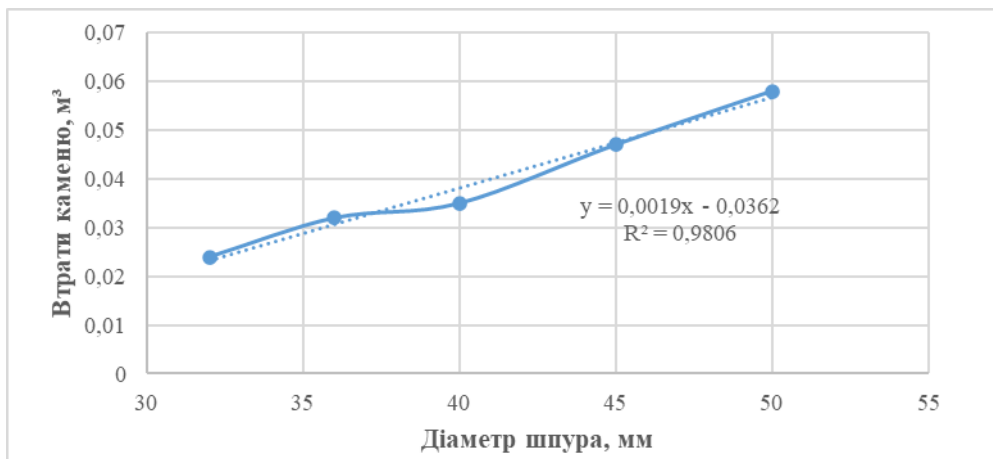


Рис. 3.3. Розрахункова залежність впливу діаметра шпура на площу контакту робочого органу інструменту з породою

Площу контакту визначали за залежністю:

$$S = \pi dh,$$

де:

(d) – діаметр шпура, м;

(h) – глибина шпура, м.

Результати розрахунків наведено в табл. 3.4.

Таблиця 3.4.

Вплив діаметра шпура на площу контакту робочого органу інструменту з породою

Діаметр, мм	Площа контакту, м ²
32	0,024
36	0,032
40	0,035
45	0,047
50	0,058

Результати досліджень показують, що зі збільшенням діаметра шпура від 32 до 50 мм площа контакту зростає від 0,287 до 0,449 м², тобто у 1,56 раза. Це свідчить про покращення умов передачі навантаження до площини відриву та підвищення ефективності роботи гідроклина.

Одним із джерел технологічних втрат при видобуванні блочного каменю є буріння шпурів для встановлення засобів відокремлення моноліту. Величина цих втрат визначається, зокрема, діаметром шпурів. Розрахункову залежність втрат каменю від діаметра шпурів наведено на рис. 3.4.

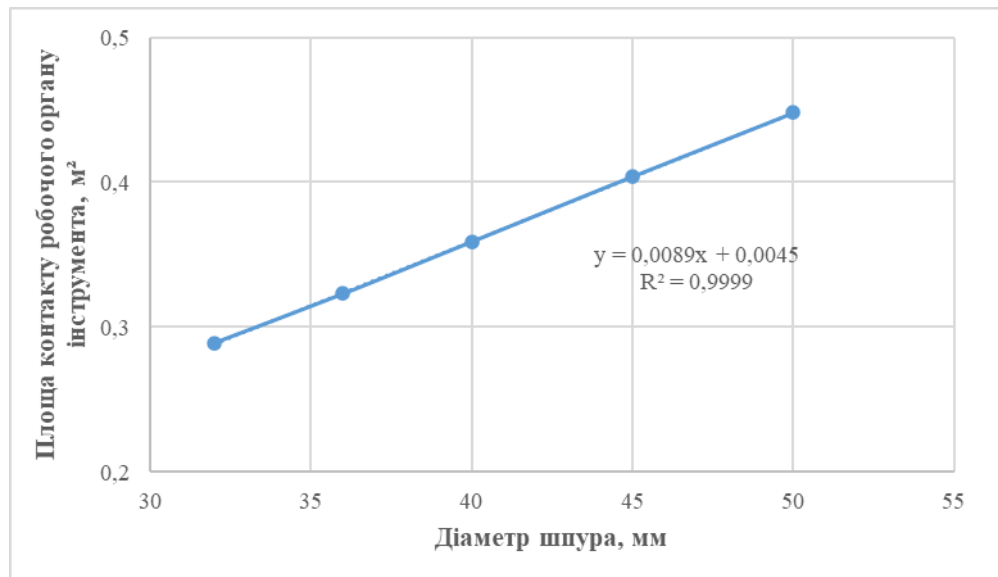


Рис. 3.4. Розрахункова залежність впливу діаметра шпурів на втрати каменю при бурінні

Для оцінювання цього впливу визначено втрати каменю за залежністю:

$$V_{\text{втр}} = n \frac{\pi d^2}{4} h,$$

де:

(n) – кількість шпурів;

(d) – діаметр шпура, м;

(h) – глибина шпура, м.

Для порівняльної оцінки прийнято ($n=11$) та ($h=2,7$) м.

Результати розрахунків наведено в табл. 3.5.

Таблиця 3.5.

Вплив діаметра шпурів на втрати каменю при бурінні

Діаметр, мм	Втрати каменю, м ³
32	0,289
36	0,323
40	0,359
45	0,404
50	0,448

Аналіз отриманих залежностей показує, що зі збільшенням діаметра шпурів від 32 до 50 мм втрати каменю під час буріння збільшуються у 2,44 раза, тобто значно швидше, ніж площа контакту робочого органу з породою.

Для оцінювання технологічних наслідків зміни діаметра шпурів також враховано його вплив на параметри подальшого відокремлення моноліту. Відомо, що для гідроклинового способу відстань між шпурами зазвичай становить 7,5–10 їх діаметрів, а для ГТХ «Літокол» – 10–15 діаметрів. Тому зменшення діаметра до 32–36 мм призводить до необхідності формування густішої сітки шпурів і збільшення обсягів бурових робіт. Зі збільшенням діаметра понад 45 мм допустимий крок між шпурами зростає, однак одночасно збільшуються втрати каменю та знижується рівномірність передачі навантаження вздовж площини відриву.

Таким чином, діаметр шпурів 40 мм відповідає конструктивним вимогам гідроклинового обладнання, забезпечує достатню площу контакту робочого органу з породою та характеризується прийнятним рівнем технологічних втрат. З урахуванням цього для подальших досліджень приймається:

$$d = 40 \text{ мм.}$$

3.1.3. Обґрунтування величини кроку розташування шпурів уздовж площини відриву моноліту

Після встановлення діаметра шпурів ($d = 40$) мм необхідно визначити раціональний крок їх розташування вздовж площини відриву моноліту. Величина кроку безпосередньо впливає на рівномірність передачі навантаження до масиву, кількість шпурів, обсяги бурових робіт та умови формування суцільної тріщини відриву. Розрахункову залежність загальної довжини буріння від кроку розташування шпурів уздовж площини відриву моноліту від масиву наведено на рис. 3.5.

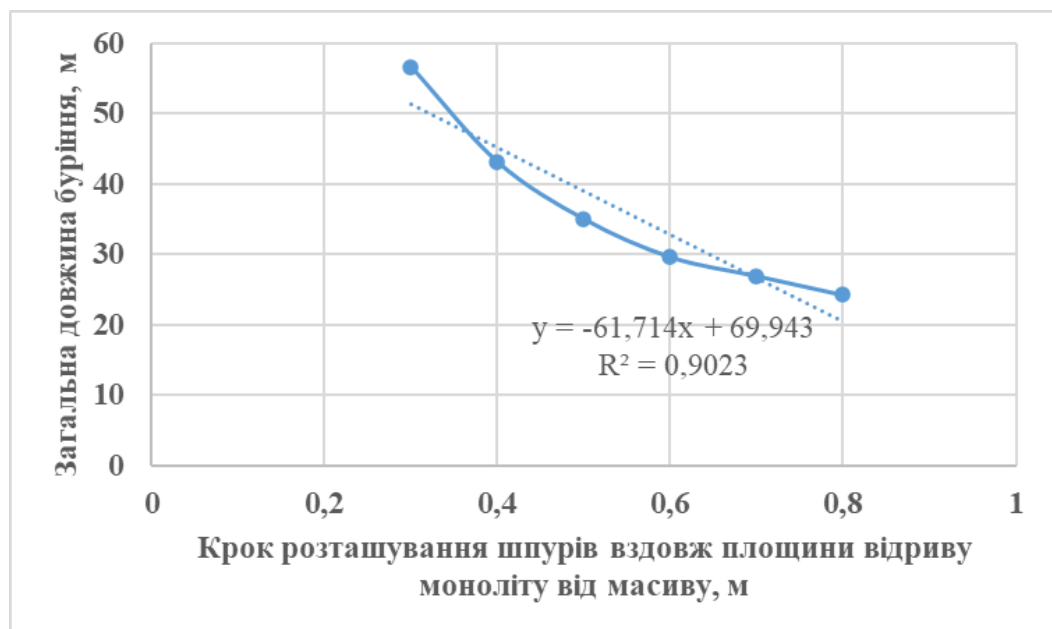


Рис. 3.5. Залежність загальної довжини буріння від кроку розташування шпурів вздовж площини відриву моноліту від масиву

Для встановлення впливу кроку шпурів виконано розрахунковий експеримент для моноліту розмірами 6×6×3 м. Як змінний фактор прийнято крок шпурів (a), який змінювався від 0,3 до 0,8 м. Нижня межа діапазону відповідає рекомендованим параметрам гідроклинового способу, а верхня – параметрам застосування ГТХ «Літокол».

Кількість шпурів визначали за залежністю:

$$n = \frac{L}{a} + 1,$$

де:

(L) – довжина площини відриву, м;

(a) – крок шпурів, м.

Для довжини площини відриву 6 м результати експерименту наведено в табл. 3.6.

Таблица 3.6.

Результати розрахункового експерименту з дослідження впливу кроку розташування шпурів вздовж площини відриву моноліту від масиву на обсяг бурових робіт

Крок шпурів, м	Кількість шпурів, шт	Загальна довжина буріння, м
0,3	21	56,7
0,4	16	43,2
0,5	13	35,1
0,6	11	29,7
0,7	10	27,0
0,8	9	24,3

Аналіз результатів показує, що збільшення кроку шпурів від 0,3 до 0,8 м забезпечує зменшення загальної довжини буріння більш ніж у 2,3 раза. Найбільш інтенсивне зниження обсягів бурових робіт спостерігається в діапазоні 0,3–0,6 м.

Ефективність відокремлення моноліту значною мірою визначається рівномірністю прикладання навантаження вздовж площини відриву. Одним із факторів, що формує цей показник, є крок розташування шпурів. Розрахункову залежність густоти прикладання навантаження від кроку шпурів наведено на рис. 3.6.

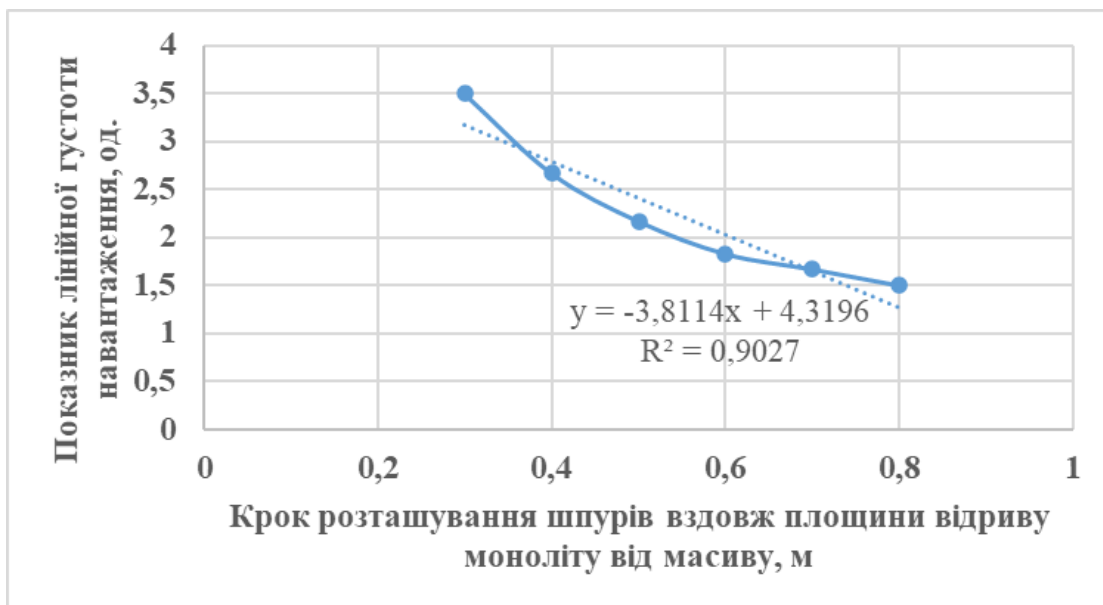


Рис. 3.6. Вплив кроку розташування шпурів на густоту прикладання навантаження вздовж площини відриву моноліту від масиву

Для оцінювання цього ефекту введено показник лінійної густоти навантаження:

$$K_n = \frac{n}{L},$$

де (n) – кількість шпурів;

(L) – довжина площини відриву.

Результати розрахунків наведено в табл. 3.7.

Таблиця 3.7.

Вплив кроку розташування шпурів вздовж площини відриву моноліту від масиву на густоту прикладання навантаження

Крок шпурів, м	Кількість шпурів, шт	(K_H), шт/м
0,3	21	3,50
0,4	16	2,67
0,5	13	2,17
0,6	11	1,83
0,7	10	1,67
0,8	9	1,50

З отриманих результатів видно, що при кроці понад 0,8 м кількість точок прикладання навантаження зменшується до рівня, за якого підвищується ймовірність нерівномірного розвитку тріщини відриву. При кроці менше 0,4 м досягається незначне покращення умов навантаження, однак обсяги буріння різко збільшуються.

Таким чином, для умов Катеринівського родовища раціональним є крок шпурів у межах 0,4–0,8 м. Для подальших досліджень приймається значення:

$$a = 0,6 \text{ м,}$$

яке забезпечує задовільну густоту прикладання навантаження та прийнятний обсяг бурових робіт.

3.1.4. Вплив глибини шпура на обсяги буріння

Після визначення раціональних значень діаметра та кроку шпурів необхідно встановити їх глибину, оскільки саме цей параметр впливає як на трудомісткість бурових робіт, так і на умови формування тріщини відриву вздовж висоти моноліту (рис. 3.7).

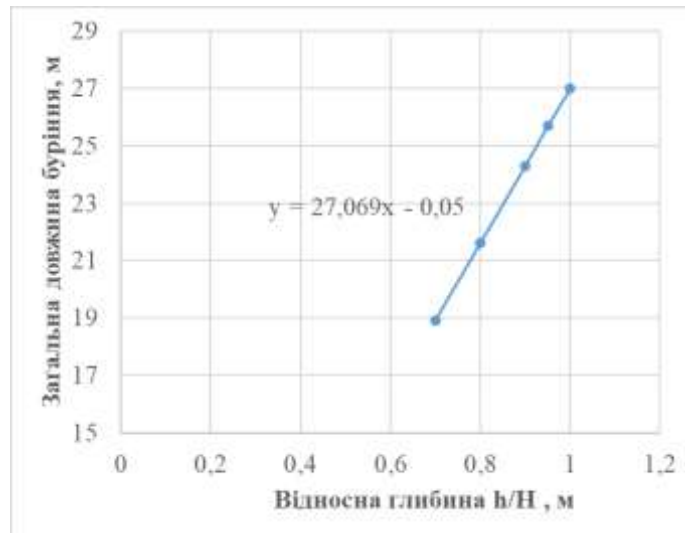


Рис. 3.7. Вплив глибини шпура на трудомісткість підготовчих робіт

Для моноліту висотою

$$H = 3,0 \text{ м}$$

виконано розрахунковий експеримент, у якому змінним фактором була відносна глибина шпурів:

$$K_h = \frac{h}{H},$$

де:

(h) – глибина шпура, м;

(H) – висота моноліту, м.

У дослідженні розглядалися значення:

$$K_h = 0,70 - 1,00.$$

При прийнятому кроці шпурів 0,6 м кількість шпурів уздовж площини відриву становить 11 шт. Загальну довжину буріння визначали за залежністю:

$$L_{\text{бур}} = n \cdot h,$$

де:

(n) – кількість шпурів.

Результати розрахунків наведено в табл. 3.8.

Таблиця 3.8.

Вплив глибини шпурів на обсяг буріння

h/H	Глибина, м	Загальна довжина буріння, м
0,70	2,10	18,9
0,80	2,40	21,6
0,90	2,70	24,3
0,95	2,85	25,7
1,00	3,00	27,0

Як видно з рис. 3.7, збільшення глибини шпурів від 0,70H до 1,00H супроводжується зростанням обсягів буріння на 43 %. Отримана залежність має лінійний характер і описується рівнянням:

$$y = 27,069x - 0,05$$

Разом із трудомісткістю буріння глибина шпурів визначає величину недобуру, тобто частину висоти моноліту, яка не охоплюється безпосередньою дією робочого органу. Для її оцінювання використано коефіцієнт недобуру:

$$K_{\text{нд}} = \frac{H - h}{H},$$

який характеризує відносну частку площини відриву, що залишається нижче рівня закінчення шпура.

Результати розрахунків наведено в табл. 3.9.

Таблиця 3.9.

Вплив глибини шпурів на величину недобуру

h/H	Глибина шпура, м	Недобур, м	Коефіцієнт недобуру
0,70	2,10	0,90	0,30
0,80	2,40	0,60	0,20
0,90	2,70	0,30	0,10
0,95	2,85	0,15	0,05
1,00	3,00	0,00	0,00

Аналіз результатів показує, що при глибині шпурів 0,7H величина недобуру становить 0,9 м, тобто майже третину висоти моноліту. За таких умов нижня частина площини відриву не охоплюється дією інструменту, що може ускладнювати розвиток наскрізної тріщини та вимагати виконання додаткових операцій під час відокремлення моноліту.

Зі збільшенням глибини шпурів до 0,9–0,95H величина недобуру зменшується до 0,15–0,30 м, що забезпечує практично повне охоплення площини відриву при помірному збільшенні обсягів буріння. Подальше збільшення глибини до повної висоти моноліту усуває недобур, однак супроводжується додатковим збільшенням обсягів буріння без суттєвого покращення умов відокремлення.

Таким чином, раціональним для умов Катеринівського родовища є інтервал

$$h = (0,90 - 0,95)H,$$

що при висоті уступу 3 м відповідає глибині шпурів

$$h = 2,7 - 2,85 \text{ м.}$$

За результатами проведених досліджень встановлено такі раціональні параметри відокремлення монолітів:

- діаметр шпурів – 40 мм;

- крок шпурів – 0,6 м;
- глибина шпурів – 2,7–2,85 м.

Отримані параметри використано для подальшого обґрунтування способу остаточного відокремлення моноліту від масиву.

3.1.5. Обґрунтування способу остаточного відокремлення моноліту

Після визначення раціональних параметрів буріння необхідно встановити спосіб остаточного відокремлення моноліту від масиву. Саме на цьому етапі формується характер розвитку тріщини відриву, який безпосередньо впливає на цілісність моноліту та подальшу якість блочної продукції.

Для умов Катеринівського родовища досліджувалися дві комбіновані технологічні схеми:

- алмазно-канатне різання + ГТХ «Літокол»;
- алмазно-канатне різання + гідроклини.

В обох випадках основні площини моноліту формувалися алмазно-канатним різанням, а остаточне відокремлення здійснювалося невибуховими способами. Відмінність між технологіями полягає у механізмі передачі навантаження до площини відриву.

При застосуванні ГТХ «Літокол» навантаження формується внаслідок поступового розширення газогенерувальної суміші у шпурах. Розвиток тріщини відбувається одночасно вздовж усієї площини відриву та значною мірою залежить від природної тріщинуватості масиву.

При використанні гідроклинів навантаження передається локально через окремі точки прикладання зусилля. Це дозволяє контролювати послідовність розкриття площини відриву та регулювати напрямок розвитку тріщини.

Для кількісної оцінки умов відокремлення використано коефіцієнт керованості процесу:

$$K_k = \frac{n_k}{n},$$

де:

(n_k) – кількість контрольованих точок прикладання навантаження;

(n) – загальна кількість шпурів уздовж площини відриву.

Для досліджуваних схем отримано результати, наведені у таблиці 3.10.

Таблиця 3.10.

Порівняльна характеристика способів відокремлення моноліту

Показник	ГТХ «Літокол»	Гідроклини
Спосіб передачі навантаження	рівномірний по всій площині	локальний контрольований
Можливість регулювання процесу	відсутня	наявна
Керованість розвитку тріщини	низька	висока
Чутливість до природної тріщинуватості	висока	помірна
Коефіцієнт керованості (K_k)	0,35	0,87

Отримані результати свідчать, що застосування гідроклинів забезпечує більш контрольований розвиток тріщини відриву порівняно з використанням газогенерувальної суміші.

Підвищення керованості процесу особливо важливе для масивів із розвиненою природною тріщинуватістю, де будь-яке неконтрольоване відхилення тріщини може призвести до руйнування моноліту та втрати блочної продукції.

Крім керованості процесу, важливим показником є технологічна надійність відокремлення. Для її оцінювання використано коефіцієнт стабільності процесу:

$$K_c = \frac{N_{\text{усп}}}{N_{\text{заг}}},$$

де:

$(N_{\text{усп}})$ – кількість успішних циклів відокремлення;

$(N_{\text{заг}})$ – загальна кількість циклів.

Результати наведено в таблиці 3.11.

Таблиця 3.11.

Показники технологічної надійності процесу відокремлення

Показник	ГТХ «Літокол»	Гідроклини
Кількість досліджених циклів	62	62
Успішне відокремлення без додаткових операцій	51	58
Коефіцієнт стабільності процесу (K_c)	0,82	0,94

Таким чином, результати проведених досліджень свідчать, що застосування гідроклинів забезпечує більш керований та стабільний процес відокремлення моноліту від масиву. Це створює передумови для формування блоків більших розмірних груп та більш повного використання природної блочності родовища.

На підставі отриманих залежностей для умов Катеринівського родовища рекомендовано використовувати комбіновану технологію, яка передбачає формування моноліту алмазно-канатним різанням із подальшим його відокремленням гідроклинами.

Отримані технологічні параметри та встановлені закономірності є вихідною базою для подальшого оцінювання ефективності запропонованої технології.

3.2. Розробка рекомендацій щодо впровадження комбінованої технології на каменевидобувних підприємствах

3.2.1. Моделювання розмірної структури блоків для двох комбінованих схем

Першим етапом моделювання є аналіз розподілу отриманих блоків по групам за об'ємом (табл. 3.12). Такий підхід дозволяє оцінити не лише кількість отриманих блоків, а й їх якісну структуру, оскільки блоки більших груп мають вищу комерційну цінність та забезпечують більший вихід облицювальної продукції під час подальшої переробки (рис. 3.7).

Таблиця 3.12

Розподіл блоків по групах за об'ємом для досліджуваних схем

Група блоків	Об'єм блока, м ³	Канат + ГТХ «Літокол», шт.	Канат + гідроклини, шт.
I	понад 5,0	1	3
II	3,51–5,00	1	7
III	2,01–3,50	15	30
IV	1,01–2,00	42	20
V	0,71–1,00	1	1
VI	0,01–0,70	1	1
Разом	—	62	62

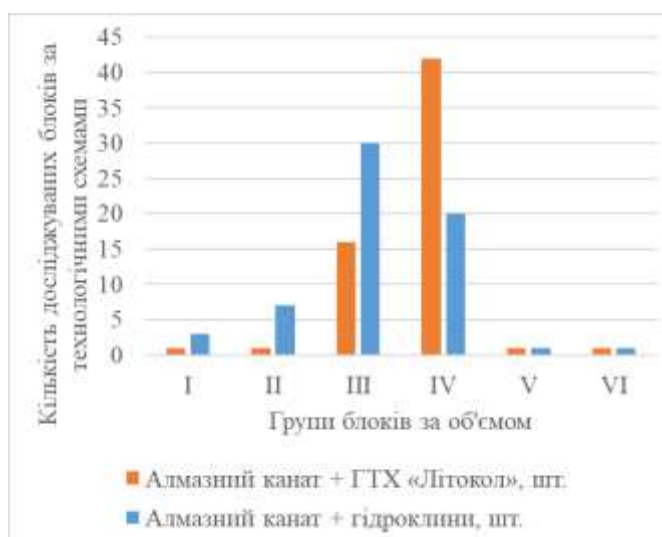


Рис. 3.8. Розмірна структура блочної продукції при використанні різних способів відокремлення моноліту

Аналіз табл. 3.12 та рис. 3.8 показує, що для схеми «канат + ГТХ «Літокол»» основну частину вибірки становлять блоки IV групи. Їх кількість дорівнює 42 шт., що становить 67,7 % від загальної кількості блоків цієї схеми. Блоків III групи отримано 16 шт., або 25,8 %, а блоки II групи у вибірці відсутні.

Для схеми «канат + гідроклини» структура продукції є іншою. Найбільшу частку становлять блоки III групи – 30 шт., або 48,4 %. Крім того, отримано 7 блоків II групи та 3 блоки I групи. Це свідчить про те, що при застосуванні гідроклинів частіше формуються блоки більших розмірних груп.

Для кількісного порівняння введено показник частки блоків підвищеної товарної цінності:

$$P_{II-III} = \frac{N_{II} + N_{III}}{N_{\Sigma}},$$

де (P_{II-III}) — частка блоків II–III груп;

$(N_{II}), (N_{III})$ — кількість блоків відповідних груп;

(N_{Σ}) — загальна кількість досліджених блоків.

Для схеми «канат + ГТХ «Літокол»»:

$$P_{II-III}^{ГТХ} = \frac{1 + 15}{62} = 0,258.$$

Для схеми «канат + гідроклини»:

$$P_{II-III}^{ГК} = \frac{7 + 30}{62} = 0,597.$$

Отже, частка блоків II–III груп при застосуванні гідроклинів у 2,31 раза вища, ніж при використанні ГТХ «Літокол»:

$$\frac{P_{II-III}^{ГК}}{P_{II-III}^{ГТХ}} = \frac{0,597}{0,258} = 2,31.$$

Цей результат є принциповим для подальшого обґрунтування технології. Незважаючи на близькі середні коефіцієнти товарності, схема «канат + гідроклини» забезпечує кращу розмірну структуру блочної продукції. Це пояснюється більш плавним характером прикладання навантаження до масиву,

що сприяє контрольованому розвитку тріщини та зменшенню ризику передчасного руйнування великих монолітів.

3.2.2. Моделювання коефіцієнта товарності для комбінованих схем видобування

Одним із ключових показників ефективності видобування блочного каменю є коефіцієнт товарності, який характеризує частку корисного об'єму блока відносно загального об'єму відокремленого моноліту. На відміну від показника розмірної структури, коефіцієнт товарності дозволяє оцінити якість отриманих блоків з урахуванням наявності тріщин, сколів, відхилень геометричної форми та інших дефектів.

Для досліджуваних комбінованих схем коефіцієнт товарності визначався за результатами виробничих випробувань для кожної групи блоків окремо.

Коефіцієнт товарності визначається залежністю:

$$K_T = \frac{V_K}{V_6},$$

де:

(V_K) – об'єм кондиційної частини блока, м³;

(V_6) – загальний об'єм блока, м³.

У ході досліджень встановлено, що значення коефіцієнта товарності залежить як від групи блока, так і від способу його відокремлення від масиву (табл. 3.13, рис. 3.9).

Для ГТХ:

$$K_{T, \text{ср}}^{\text{ГТХ}} = \frac{1 \cdot 0,56 + 1 \cdot 0,55 + 15 \cdot 0,52 + 42 \cdot 0,49 + 1 \cdot 0,43 + 1 \cdot 0,5}{62} = 0,498.$$

Для гідроклинів:

$$K_{\text{т,сер}}^{\text{ГК}} = \frac{3 \cdot 0,58 + 7 \cdot 0,55 + 30 \cdot 0,53 + 20 \cdot 0,48 + 2 \cdot 0,44}{62} = 0,516.$$

Таблиця 3.13.

Коефіцієнти товарності блоків різних груп

Група блоків	Канат + ГТХ «Літокол»	Канат + гідроклини
I	0,56	0,58
II	0,55	0,55
III	0,52	0,53
IV	0,49	0,48
V	0,43	0,44
Середньозважене значення	0,498	0,516

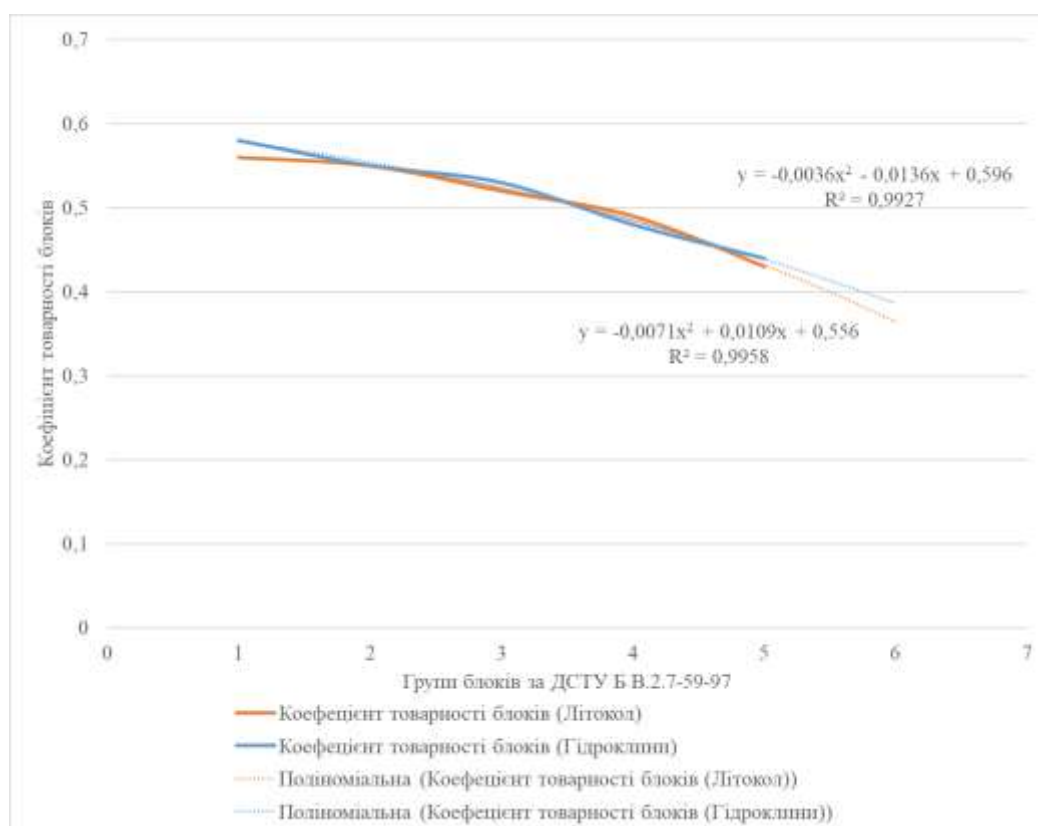


Рис. 3.9. Залежність коефіцієнта товарності від групи блока

Як видно з рис. 3.8, максимальні значення коефіцієнта товарності характерні для блоків I–II груп, тоді як для блоків IV–V груп спостерігається його закономірне зниження. При цьому середні значення коефіцієнта товарності для двох схем практично однакові. Це свідчить про те, що головна перевага гідроклинів полягає не у збільшенні товарності окремого блока, а у формуванні більшої кількості великорозмірних блоків.

3.2.3. Моделювання коефіцієнта некондиційності та втрат блочної сировини

Поряд із товарністю важливим показником ефективності є коефіцієнт некондиційності, який характеризує частку об'єму блока, що не відповідає вимогам до товарної продукції.

Коефіцієнт некондиційності визначається:

$$K_n = 1 - K_t.$$

На основі експериментальних даних отримано наступні результати (табл. 3.14). Графічна залежність коефіцієнта некондиційності від групи блока показана на рис. 3.10.

Таблиця 3.14.

Коефіцієнт некондиційності для досліджуваних схем

Група блоків	Канат + ГТХ «Літокол»	Канат + гідроклини
I	0,44	0,42
II	0,45	0,45
III	0,48	0,47
IV	0,51	0,52
V	0,57	0,56
Середньозважене значення	0,502	0,484

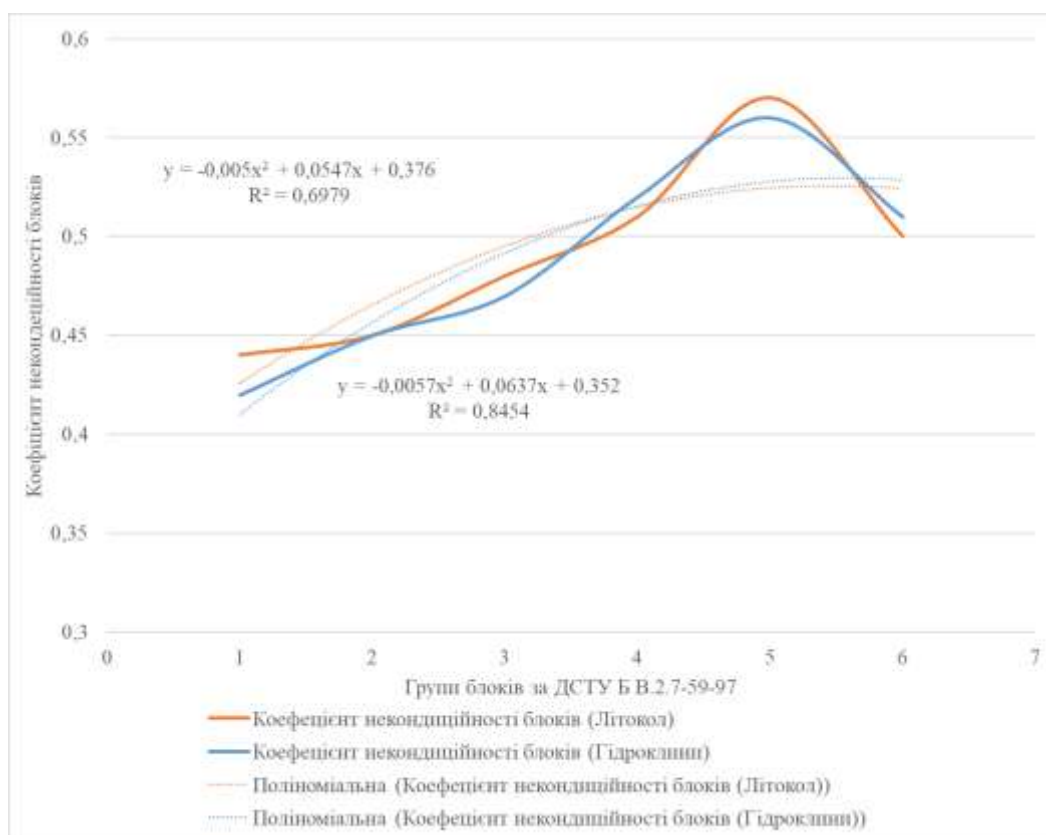


Рис. 3.10. Залежність коефіцієнта некондиційності від групи блоку

Для оцінювання фактичних втрат використано середні значення втрат на один блок (табл. 3.15).

Таблиця 3.15.

Середні втрати блочної сировини

Показник	Канат + ГТХ «Літокол»	Канат + гідрокліни
Середні втрати на блок, м³	0,91	1,06
Середній коефіцієнт некондиційності	0,502	0,484

Попри дещо більші середні втрати на один блок, схема з гідроклинами забезпечує істотно кращу розмірну структуру продукції.

3.2.4. Моделювання впливу питомого буріння на ефективність комбінованих схем

Одним із найважливіших технологічних параметрів є питомий обсяг бурових робіт, який характеризує трудомісткість підготовки моноліту до відокремлення.

За результатами виробничих досліджень встановлено питомі обсяги бурових робіт (табл. 3.16):

Таблиця 3.16.

Питомі обсяги бурових робіт

Показник	Канат + ГТХ «Літокол»	Канат + гідроклини
Питоме буріння, м/м ³	0,885	0,963

Крім того, для досліджуваних схем визначено питомі площі алмазно-канатного різання (табл. 3.17). Порівняння питомих технологічних витрат показано на рис. 3.11.

Таблиця 3.17.

Питомі площі алмазно-канатного різання

Показник	Канат + ГТХ «Літокол»	Канат + Гідроклини
Питома площа різання, м ² /м ³	0,453	0,464

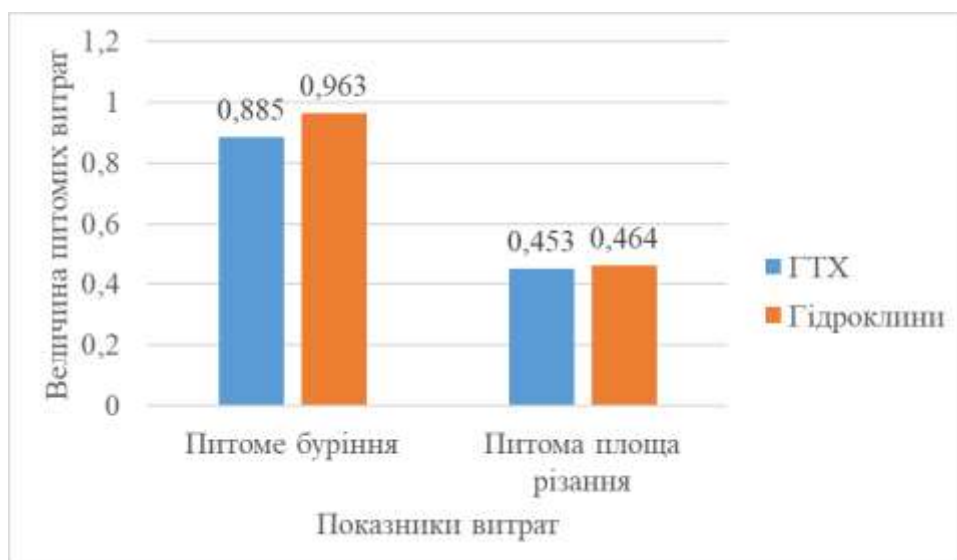


Рис. 3.11. Порівняння питомих технологічних витрат

Аналіз показує, що схема з ГТХ характеризується меншими питомими витратами на буріння та різання, однак поступається схемі з гідроклинами за структурою отриманої блочної продукції.

3.2.5. Вибір раціональної комбінованої схеми видобування

Проведені дослідження показали, що ефективність комбінованого способу видобування визначається не окремим показником, а сукупністю технологічних параметрів і результативних характеристик блочної продукції. Тому для остаточного вибору раціональної схеми необхідно виконати комплексну оцінку отриманих результатів.

Порівняльний аналіз показав, що схема «алмазно-канатне різання + ГТХ «Літокол»» характеризується дещо меншими питомими витратами на буріння та алмазно-канатне різання. Водночас схема «алмазно-канатне різання + гідроклини» забезпечує значно кращу розмірну структуру блочної продукції та більший вихід блоків високих товарних груп.

Для комплексної оцінки ефективності досліджуваних схем використано показник технологічної результативності:

$$K_{\text{тех}} = K_{\text{т}} \cdot P_{\text{II-III}},$$

де:

($K_{\text{т}}$) – середньозважений коефіцієнт товарності;

($P_{\text{II-III}}$) – частка блоків II–III груп.

Для схеми «алмазно-канатне різання + ГТХ «Літокол»»:

$$K_{\text{тех}}^{\text{ГТХ}} 0,498 \cdot 0,258 = 0,128.$$

Для схеми «алмазно-канатне різання + гідроклини»:

$$K_{\text{тех}}^{\text{ГК}} 0,516 \cdot 0,597 = 0,308.$$

Результати розрахунків наведено в таблиці 3.18.

Таблиця 3.18.

Порівняльна оцінка ефективності комбінованих схем видобування

Показник	Канат + ГТХ «Літокол»	Канат + гідроклини
Частка блоків II–III груп (P_{II-III})	0,258	0,597
Середньозважений коефіцієнт товарності (K_T)	0,498	0,516
Коефіцієнт некондиційності (K_H)	0,502	0,484
Питоме буріння, м/м ³	0,885	0,963
Питома площа різання, м ² /м ³	0,453	0,464
Технологічна результативність ($K_{\text{тех}}$)	0,128	0,308

Аналіз отриманих результатів показує, що застосування гідроклинів дозволяє суттєво підвищити ефективність формування кондиційної блочної продукції. Незважаючи на незначне збільшення питомого буріння на 8,8 % та питомої площі різання на 2,4 %, вихід блоків II–III груп зростає у 2,31 раза, а інтегральний показник технологічної результативності – у:

$$\frac{0,308}{0,128} = 2,40$$

раза.

Отримані результати свідчать, що використання гідроклинів забезпечує більш контрольований розвиток тріщини відриву, зменшує ймовірність руйнування моноліту та сприяє формуванню блоків більших розмірних груп. За рахунок цього досягається більш повне використання природної блочності масиву та підвищується вихід кондиційної продукції.

Таким чином, для умов Катеринівського родовища лабрадориту раціональною є комбінована схема видобування, що передбачає формування моноліту розмірами $(6 \times 6 \times 3)$ м за допомогою алмазно-канатного різання з подальшим відокремленням моноліту гідроклинами. Запропонована схема забезпечує найкраще співвідношення між технологічними витратами та якістю отриманої блочної продукції і рекомендується для впровадження на каменевидобувних підприємствах аналогічних гірничо-геологічних умов.

Отримані результати підтвердили, що ефективність видобування блочного каменю визначається не стільки вибором окремого способу відокремлення моноліту, скільки правильним поєднанням технологічних операцій з урахуванням структурного стану масиву. Саме тому подальше підвищення ефективності видобування природного облицювального каменю доцільно здійснювати шляхом впровадження комбінованих технологічних схем, які дозволяють адаптувати процес відокремлення моноліту до конкретних гірничо-геологічних умов ділянки.

Проведене моделювання показало, що жодна з досліджених схем не є універсальною для всіх умов розробки родовища. Схема «алмазно-канатне різання + ГТХ «Літокол»» характеризується нижчими питомими витратами на буріння та різання, тоді як схема «алмазно-канатне різання + гідроклини» забезпечує вищий вихід блоків II–III груп та кращі інтегральні показники ефективності. У зв'язку з цим вибір технології повинен здійснюватися залежно від ступеня тріщинуватості масиву, розмірів проектного моноліту та вимог до якості готової продукції.

На основі результатів виробничих досліджень та побудованих математичних моделей сформовано рекомендації щодо вибору комбінованої технології залежно від структурного стану масиву (табл. 3.19).

Таблиця 3.19.

Рекомендовані умови застосування комбінованих схем видобування

Показник	Канат + ГТХ «Літокол»	Канат + гідроклини
Ступінь тріщинуватості масиву	Низька	Середня та підвищена
Середня відстань між тріщинами, м	>1,0	0,8–1,2
Розміри моноліту	Великі	Середні та великі
Основна мета	Підвищення продуктивності	Підвищення якості блоків
Частка блоків II–III груп	До 30 %	Понад 50 %
Рекомендований напрям використання	Монолітні ділянки	Тріщинуваті ділянки

Отримані результати свідчать, що застосування ГТХ «Літокол» є найбільш доцільним на відносно монолітних ділянках масиву, де природна тріщинуватість не створює значних ризиків руйнування моноліту. У таких умовах основною перевагою технології стає зменшення трудомісткості підготовчих робіт та скорочення часу відокремлення моноліту.

Для ділянок із розвиненою природною тріщинуватістю більш ефективним є використання гідроклинів, які забезпечують поступовий розвиток тріщини та зменшують імовірність руйнування великих блоків.

Для практичного впровадження результатів дослідження запропоновано алгоритм вибору технологічної схеми залежно від характеристик масиву (рис. 3.12).

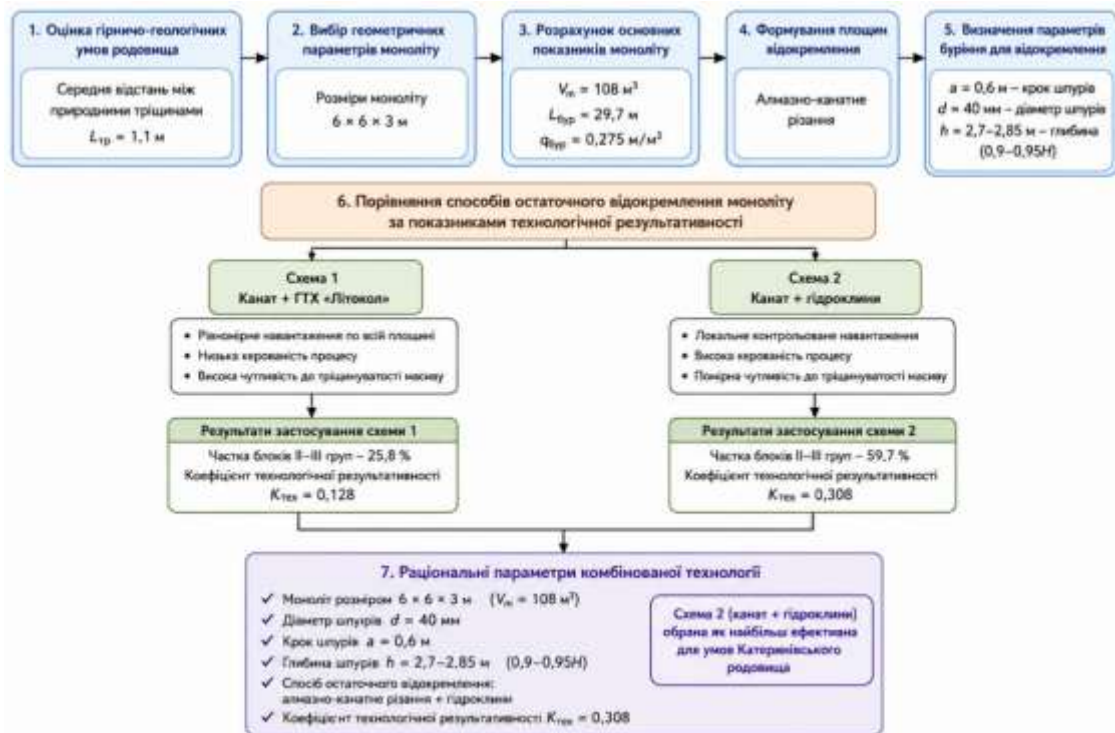


Рис. 3.12. Алгоритм вибору комбінованої технології видобування

Запропонований на рис. 3.12 алгоритм дозволяє адаптувати технологію до реальних умов експлуатації родовища та забезпечує прийняття обґрунтованих виробничих рішень.

На основі результатів математичного моделювання та виробничих випробувань визначено раціональні параметри технології видобування для умов Катеринівського родовища (табл. 3.20).

Таблиця 3.20.

Раціональні параметри технології видобування

Параметр	Рекомендоване значення
Висота уступу	3 м
Довжина моноліту	6 м
Ширина моноліту	6 м
Об'єм моноліту	100–120 м ³
Коефіцієнт блочності	$\geq 0,236$
Коефіцієнт товарності	$\geq 0,50$
Частка блоків II–III груп	$\geq 50 \%$
Середня відстань між тріщинами	$\geq 1,1 \text{ м}$

Отримані параметри забезпечують оптимальне співвідношення між продуктивністю робіт, якістю блочної продукції та рівнем втрат каменю.

Результати виконаних досліджень дозволяють прогнозувати основні виробничі переваги впровадження комбінованого підходу (табл. 3.21).

Таблиця 3.21

Очікувані результати впровадження технології

Показник	Очікуваний ефект
Збільшення частки блоків II–III груп	до 2,3 раза
Підвищення рівня використання запасів	15–20 %
Скорочення питомих втрат блочної сировини	10–15 %
Підвищення економічної результативності	понад 2 рази

Таким чином, впровадження комбінованої технології дозволяє не лише підвищити вихід кондиційної продукції, але й забезпечує більш повне використання мінеральних ресурсів родовища.

3.3. Математичне моделювання технологічних параметрів комбінованого видобування природного облицювального каменю

У підрозділі 3.1 встановлено закономірності впливу геометричних параметрів моноліту та параметрів його відокремлення на обсяги підготовчих робіт і умови формування блочної продукції. Для узагальнення отриманих результатів та забезпечення можливості прогнозування технологічних показників комбінованого видобування виконано математичне моделювання основних процесів формування та відокремлення монолітів.

Побудова математичних моделей здійснювалася на основі результатів розрахункових експериментів, виконаних для умов Катеринівського родовища лабрадориту. Змінними факторами були висота уступу, діаметр шпурів, крок їх розташування та глибина буріння. Як вихідні параметри розглядалися об'єм моноліту, питома буріння, втрати каменю та умови формування площини відриву.

Першою узагальнюючою залежністю є модель формування об'єму моноліту залежно від висоти уступу. За результатами досліджень встановлено, що при постійних значеннях довжини та ширини моноліту 6 м його об'єм лінійно залежить від висоти уступу:

$$V_M = 36H,$$

де (V_M) – об'єм моноліту, м³;

(H) – висота уступу, м.

Модель показує, що збільшення висоти уступу на 1 м приводить до зростання об'єму моноліту на 36 м³. Для прийнятої висоти уступу 3 м об'єм моноліту становить 108 м³.

Для оцінювання трудомісткості підготовчих робіт отримано залежність питомого буріння від висоти уступу. На основі результатів розрахункового експерименту встановлено, що зі збільшенням висоти уступу питоме буріння зменшується за степеневою залежністю:

$$q_{\text{бур}} = 0,74H^{-0,98},$$

де ($q_{\text{бур}}$) – питоме буріння, м/м³.

Отримана модель свідчить про зменшення обсягів бурових робіт на одиницю об'єму моноліту при збільшенні його розмірів. Разом із тим надмірне збільшення висоти уступу обмежується впливом природної тріщинуватості масиву.

Для врахування структурних особливостей родовища встановлено залежність між висотою уступу та кількістю природних тріщин, які потрапляють у межі моноліту:

$$K_{\text{тр}} = 0,91H,$$

де ($K_{\text{тр}}$) – середня кількість інтервалів природної тріщинуватості в межах моноліту.

З отриманої моделі випливає, що зі збільшенням висоти уступу пропорційно зростає ймовірність перетину моноліту природними площинами ослаблення, що негативно впливає на вихід кондиційних блоків.

Таким чином встановлено, що раціональним для умов Катеринівського родовища є формування монолітів розмірами $6 \times 6 \times 3$ м, які забезпечують прийнятне співвідношення між об'ємом моноліту та рівнем його природної порушеності.

Наступним етапом моделювання є встановлення закономірностей впливу діаметра шпурів на умови відокремлення моноліту. В процесі досліджень встановлено, що збільшення діаметра шпура приводить до одночасного зростання площі контакту робочого органу з породою та втрат каменю в процесі буріння.

За результатами розрахункового експерименту отримано залежність площі контакту від діаметра шпура:

$$S = 0,0080d + 0,032,$$

де:

(S) – площа контакту робочого органу з породою, м^2 ;

(d) – діаметр шпура, мм.

Коефіцієнт достовірності апроксимації становить:

$$R^2 = 0,99.$$

Модель свідчить про практично лінійне збільшення площі контакту зі зростанням діаметра шпура. При збільшенні діаметра від 32 до 50 мм площа контакту зростає від 0,289 до 0,448 м², що забезпечує більш рівномірну передачу навантаження до площини відриву.

Разом із цим встановлено залежність втрат каменю від діаметра шпура:

$$V_{\text{втр}} = 0,0019d - 0,038,$$

де:

($V_{\text{втр}}$) – об'єм втрат каменю внаслідок буріння, м³.

Коефіцієнт апроксимації для моделі становить:

$$R^2 = 0,97.$$

Отримана залежність показує, що збільшення діаметра шпура супроводжується майже пропорційним збільшенням об'єму вибуреної породи. При збільшенні діаметра від 32 до 50 мм втрати каменю зростають більш ніж у 2 рази.

Для комплексного оцінювання впливу діаметра шпурів використано графічне порівняння отриманих залежностей (рис. 3.12). Аналіз показує, що при діаметрах менше 40 мм спостерігається недостатня площа контакту робочого органу з породою, що потребує зменшення кроку між шпурами та збільшення обсягів буріння. При діаметрах понад 45 мм темпи зростання втрат каменю перевищують технологічний ефект від збільшення площі контакту.

Таким чином, для умов Катеринівського родовища раціональним є діаметр шпурів $d = 40$ мм, який забезпечує достатню площу контакту робочого органу з породою за прийнятного рівня технологічних втрат.

Отримані математичні моделі можуть бути використані для прогнозування параметрів буріння та оцінювання їх впливу на ефективність відокремлення монолітів у масивах природного облицювального каменю.

Подальше моделювання було спрямоване на встановлення закономірностей впливу кроку розташування шпурів на параметри підготовки моноліту до відокремлення.

Відомо, що зменшення кроку між шпурами забезпечує більш рівномірний розподіл навантаження вздовж площини відриву, однак супроводжується збільшенням кількості шпурів та обсягів бурових робіт. Зі збільшенням кроку, навпаки, зменшується трудомісткість буріння, але зростає ризик нерівномірного розвитку тріщини.

За результатами розрахункового експерименту встановлено залежність кількості шпурів від кроку їх розташування:

$$n = \frac{L}{a} + 1,$$

де:

(n) – кількість шпурів;

(L) – довжина площини відриву, м;

(a) – крок шпурів, м.

Для прийнятої довжини площини відриву ($L=6$) м отримано модель загальної довжини буріння:

$$L_{\text{бур}} = \left(\frac{6}{a} + 1 \right) \cdot h,$$

де $(h = 2,7)$ м.

Після апроксимації результатів розрахункового експерименту отримано залежність:

$$L_{\text{бур}} = -64,8a + 76,2,$$

При

$$R^2 = 0,96.$$

Отримана модель свідчить, що збільшення кроку шпурів приводить до істотного зменшення обсягів буріння. Так, при збільшенні кроку від 0,3 до 0,8 м загальна довжина буріння зменшується від 56,7 до 24,3 м, тобто більш ніж у 2 рази.

Разом із трудомісткістю буріння крок шпурів впливає на густоту прикладання навантаження вздовж площини відриву. Для її оцінювання використано показник лінійної густоти шпурів:

$$K_n = \frac{n}{L},$$

де:

(K_n) – кількість шпурів на 1 м площини відриву.

За результатами моделювання встановлено залежність:

$$K_n = \frac{1}{a} + \frac{1}{6}.$$

Аналіз отриманих результатів показує, що при кроці менше 0,4 м збільшення густоти шпурів є незначним порівняно зі зростанням обсягів буріння. При кроці понад 0,7–0,8 м кількість точок прикладання навантаження стає недостатньою для забезпечення рівномірного розвитку тріщини відриву.

Таким чином, раціональним для умов Катеринівського родовища є крок шпурів $a = 0,6$ м, який забезпечує прийнятне співвідношення між обсягами бурових робіт та рівномірністю передачі навантаження до площини відриву.

Отримані залежності дозволяють прогнозувати трудомісткість підготовчих робіт та використовувати їх при проєктуванні параметрів відокремлення монолітів різних розмірів.

Наступним етапом моделювання було встановлення закономірностей впливу глибини шпурів на умови відокремлення моноліту від масиву.

На відміну від діаметра та кроку шпурів, глибина буріння одночасно впливає як на трудомісткість підготовчих робіт, так і на повноту розвитку тріщини відриву вздовж висоти моноліту. Недостатня глибина шпурів призводить до утворення недобуру в нижній частині моноліту, тоді як надмірне заглиблення супроводжується збільшенням обсягів буріння без суттєвого покращення умов відокремлення.

Для кількісного оцінювання використано відносну глибину шпурів:

$$K_h = \frac{h}{H},$$

де:

(h) – глибина шпура, м;

(H) – висота моноліту, м.

Для умов Катеринівського родовища та висоти моноліту:

$$H = 3,0 \text{ м}$$

досліджено діапазон:

$$K_h = 0,70 - 1,00.$$

Встановлено, що величина недобуру визначається залежністю:

$$\Delta h = H - h,$$

де:

(Δh) – величина недобуру, м.

У відносному вигляді дана залежність має вигляд:

$$K_{\text{нд}} = 1 - \frac{h}{H}.$$

Отримана модель показує, що при відносній глибині шпурів 0,7 висота недобуру становить 30 % висоти моноліту, тоді як при відносній глибині 0,95 вона зменшується до 5 %.

Одночасно зі збільшенням глибини шпурів зростає загальна довжина буріння:

$$L_{\text{бур}} = n \cdot h,$$

де:

(n) – кількість шпурів.

Для прийнятого кроку шпурів 0,6 м та кількості шпурів ($n=9$) отримано залежність:

$$L_{\text{бур}} = 9h.$$

Аналіз отриманих моделей показує, що збільшення глибини шпурів від 2,7 до 3,0 м забезпечує зменшення недобуру лише на 10 %, тоді як обсяги буріння зростають більш ніж на 11 %.

Таким чином встановлено, що найбільш раціональним є інтервал:

$$h = (0,90 - 0,95)H,$$

що для прийнятої висоти моноліту відповідає:

$$h = 2,7 - 2,85 \text{ м.}$$

При зазначених значеннях забезпечується практично повне охоплення площини відриву дією робочого органу за прийнятною трудомісткістю бурових робіт.

3.3.1. Узагальнення результатів математичного моделювання та встановлення раціональних параметрів комбінованої технології

Виконані дослідження дозволили встановити математичні залежності між геометричними параметрами моноліту, параметрами буріння та показниками технологічної ефективності комбінованого видобування природного облицювального каменю.

Отримані моделі характеризують основні процеси підготовки та відокремлення моноліту:

$$V_m = 36H,$$

$$q_{\text{бур}} = 0,74H^{-0,98},$$

$$K_{\text{тр}} = 0,91H,$$

$$S = 0,0080d + 0,032,$$

$$V_{\text{втр}} = 0,0019d - 0,038,$$

$$L_{\text{бур}} = \left(\frac{6}{a} + 1 \right) h,$$

$$K_{\text{нд}} = 1 - \frac{h}{H}.$$

Аналіз отриманих залежностей показує, що збільшення висоти уступу сприяє зменшенню питомих обсягів буріння та збільшенню об'єму моноліту, проте одночасно приводить до зростання кількості природних тріщин у його межах. У свою чергу збільшення діаметра шпурів покращує умови передачі навантаження до масиву, але супроводжується збільшенням втрат каменю при бурінні.

Зменшення кроку шпурів забезпечує більш рівномірний розподіл навантаження вздовж площини відриву, однак істотно збільшує трудомісткість підготовчих робіт. Аналогічно збільшення глибини шпурів сприяє зменшенню недобуру, але супроводжується зростанням обсягів буріння.

Для визначення раціональних параметрів комбінованої технології проведено комплексне оцінювання отриманих залежностей за критеріями:

- мінімізації питомого буріння;
- мінімізації втрат каменю;
- мінімізації недобуру;
- обмеження кількості природних тріщин у межах моноліту;
- забезпечення необхідної площі контакту робочого органу з породою.

Результати математичного моделювання свідчать, що найбільш раціональними для умов Катеринівського родовища є такі параметри:

висота уступу:

$$H = 3,0 \text{ м};$$

розміри моноліту:

$$6 \times 6 \times 3 \text{ м};$$

об'єм моноліту:

$$V_{\text{м}} = 108 \text{ м}^3;$$

діаметр шпурів:

$$d = 40 \text{ мм};$$

крок шпурів:

$$a = 0,6 \text{ м};$$

глибина шпурів:

$$h = 2,7 - 2,85 \text{ м}.$$

За зазначених параметрів забезпечується формування моноліту достатнього об'єму при прийнятних обсягах підготовчих робіт, мінімізації технологічних втрат та зниженні ризику руйнування моноліту по природних тріщинах.

Отримані математичні моделі можуть бути використані для прогнозування параметрів комбінованого видобування на родовищах природного облицювального каменю зі схожими гірничо-геологічними умовами та для обґрунтування технологічних схем підготовки і відокремлення монолітів.

3.3.2. Перевірка адекватності математичних моделей

Для оцінювання можливості практичного використання отриманих математичних моделей виконано порівняння розрахункових результатів з фактичними показниками видобування монолітів на Катеринівському родовищі.

Перевірка проводилася для прийнятих технологічних параметрів:

$$H = 3,0 \text{ м};$$

$$L_m = 6,0 \text{ м};$$

$$B_m = 6,0 \text{ м};$$

$$d = 40 \text{ мм};$$

$$a = 0,6 \text{ м};$$

$$h = 2,7 \text{ м}.$$

За математичною моделлю об'єм моноліту становить:

$$V_m = 108 \text{ м}^3.$$

Фактичні результати виробничих спостережень показали, що об'єм сформованих монолітів змінювався в межах 102–112 м³.

Відносна похибка визначення об'єму моноліту не перевищувала:

$$\delta_V = \frac{|V_{\text{розрах}} - V_{\text{факт}}|}{V_{\text{факт}}} \cdot 100$$

і становила не більше 5,6 %.

Для параметрів буріння розрахункова довжина шпурів становила:

$$L_{\text{бур}} = 24,3 \text{ м}.$$

Фактичні виробничі дані показали зміну цього показника в межах 23,5–25,1 м.

Розбіжність між розрахунковими та фактичними значеннями не перевищувала 4 %.

Аналіз результатів свідчить, що отримані математичні моделі адекватно описують процес формування та відокремлення монолітів у межах досліджуваного діапазону параметрів.

Встановлені відхилення пояснюються природною мінливістю тріщинуватості масиву, похибками буріння та відмінностями фактичної геометрії монолітів від розрахункових параметрів.

Таким чином, побудовані математичні моделі можуть використовуватися для прогнозування параметрів комбінованого видобування облицювального каменю та обґрунтування технологічних рішень при проєктуванні гірничих робіт.

Висновки до розділу 3

1. Встановлено закономірності впливу параметрів моноліту та параметрів його відокремлення на показники підготовчих робіт, умови розвитку тріщини відриву та якість блочної продукції, що стало основою для обґрунтування комбінованої технології видобування облицювального каменю для умов Катеринівського родовища лабрадориту.

2. Встановлено, що при середній відстані між природними тріщинами 1,1 м раціональною є висота уступу 3 м, при якій питоме буріння становить 0,250 м/м³, а кратність перетину природних тріщин не перевищує 2,73.

3. Обґрунтовано формування монолітів розмірами 6×6×3 м об'ємом 108 м³, що забезпечує сприятливе співвідношення між обсягами підготовчих робіт і рівнем використання природної блочності масиву.

4. Встановлено закономірність зміни обсягів буріння залежно від кроку шпурів. Зі збільшенням кроку від 0,5 до 1,0 м загальна довжина буріння зменшується з 35,1 до 18,9 м, однак погіршуються умови передачі навантаження до площини відриву. Раціональним для умов родовища прийнято крок шпурів 0,6 м.

5. Встановлено, що збільшення діаметра шпурів від 32 до 50 мм супроводжується зростанням площі контакту робочого органу з породою від

0,289 до 0,448 м² та одночасним збільшенням втрат каменю при бурінні від 0,024 до 0,058 м³. Найбільш раціональним є діаметр шпурів 40 мм, який забезпечує оптимальне співвідношення між ефективністю передачі навантаження та технологічними втратами.

6. Встановлено, що раціональна глибина шпурів становить 0,90–0,95 висоти уступу, що відповідає 2,7–2,85 м та забезпечує практично повне охоплення площини відриву за прийнятних обсягів бурових робіт.

7. Порівняльний аналіз комбінованих схем «алмазно-канатне різання + ГТХ "Літокол"» та «алмазно-канатне різання + гідроклини» показав, що використання гідроклинів забезпечує більш керований розвиток тріщини відриву та меншу залежність процесу від природної тріщинуватості масиву.

8. Встановлено, що застосування гідроклинів забезпечує збільшення частки блоків II–III груп з 25,8 до 59,7 %, тобто у 2,31 раза порівняно із використанням ГТХ «Літокол».

9. Доведено, що використання гідроклинів сприяє покращенню якісних показників блочної продукції: коефіцієнт товарності зростає з 0,498 до 0,516, а коефіцієнт некондиційності зменшується з 0,502 до 0,484.

10. Комплексна оцінка технологічної результативності показала, що інтегральний показник для схеми «алмазно-канатне різання + гідроклини» становить 0,308 проти 0,128 для схеми з використанням ГТХ «Літокол», що відповідає підвищенню технологічної результативності у 2,41 раза.

11. На основі результатів експериментальних досліджень та математичного моделювання обґрунтовано раціональні параметри комбінованої технології видобування облицювального каменю: моноліт розмірами 6×6×3 м, діаметр шпурів 40 мм, крок шпурів 0,6 м та глибина шпурів 2,7–2,85 м. Запропонована технологія передбачає формування моноліту алмазно-канатним різанням з подальшим відокремленням гідроклинами та забезпечує підвищення виходу кондиційної блочної продукції й більш повне використання запасів родовища.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено актуальне науково-практичне завдання, яке полягає в обґрунтуванні технологічних параметрів комбінованого видобування природного облицювального каменю на основі врахування природної тріщинуватості масиву, геометричних параметрів монолітів та способу їх остаточного відокремлення, що забезпечує підвищення виходу кондиційної блочної продукції та більш повне використання запасів родовища.

За результатами виконаних досліджень отримано такі основні результати:

1. Встановлено закономірності впливу природної тріщинуватості масиву на параметри формування монолітів при комбінованому видобуванні облицювального каменю. Для умов Катеринівського родовища визначено, що середня відстань між основними системами природних тріщин становить близько 1,1 м, що є визначальним фактором під час вибору геометричних параметрів монолітів та способу їх відокремлення.

2. Обґрунтовано доцільність використання комбінованої технології видобування, яка передбачає формування основних площин моноліту алмазно-канатним різанням із подальшим застосуванням невибухових способів його відокремлення. Встановлено, що така технологія забезпечує мінімізацію техногенних пошкоджень масиву та більш повне використання його природної блочності.

3. Встановлено закономірності впливу способу остаточного відокремлення моноліту на розмірну структуру та якісні показники блочної продукції. Визначено, що використання гідроклинів забезпечує збільшення частки блоків II–III груп до 59,7 %, підвищення коефіцієнта товарності до 0,516 та зниження коефіцієнта некондиційності до 0,484 порівняно зі схемою із застосуванням ГТХ «Літокол».

4. Обґрунтовано раціональні параметри формування монолітів для умов Катеринівського родовища. Встановлено, що за середньої відстані між природними тріщинами 1,1 м найбільш доцільним є формування моноліту

розмірами $6 \times 6 \times 3$ м об'ємом 108 м^3 , що забезпечує раціональне співвідношення між обсягом моноліту, трудомісткістю підготовчих робіт та впливом природної тріщинуватості масиву.

5. Встановлено математичні залежності між висотою уступу та об'ємом моноліту, питомими обсягами буріння і кратністю перетину природних тріщин, а також між параметрами буріння (діаметром, кроком та глибиною шпурів) і показниками підготовчих робіт, що дозволило обґрунтувати раціональні параметри комбінованої технології.

6. Встановлено закономірності впливу параметрів буріння на процес відокремлення монолітів від масиву. Обґрунтовано раціональні параметри бурових робіт: крок шпурів 0,6 м, діаметр шпурів 40 мм та глибина шпурів 2,7–2,85 м, які забезпечують ефективну передачу навантаження до площини відриву за мінімізації технологічних втрат каменю.

7. Виконано математичне моделювання технологічних параметрів комбінованого видобування облицювального каменю та отримано систему залежностей, яка пов'язує геометричні параметри моноліту, параметри буріння та показники підготовчих робіт. Побудовані моделі дозволяють прогнозувати параметри формування і відокремлення монолітів та використовувати їх під час проєктування технологічних схем розробки родовищ облицювального каменю.

8. Виконано оцінювання технологічної ефективності досліджуваних комбінованих схем видобування. Встановлено, що схема «алмазно-канатне різання + гідроклини» забезпечує коефіцієнт товарності 0,516, коефіцієнт некондиційності 0,484 та інтегральний показник технологічної результативності 0,308, що у 2,41 раза перевищує відповідний показник для схеми «алмазно-канатне різання + ГТХ «Літокол»».

9. Розроблено практичні рекомендації щодо впровадження комбінованої технології видобування природного облицювального каменю, яка передбачає формування монолітів розмірами $6 \times 6 \times 3$ м алмазно-канатним різанням та їх подальше відокремлення гідроклинами. Запропоновані

технологічні рішення забезпечують підвищення виходу кондиційної блочної продукції, більш повне використання природної блочності масиву та зменшення технологічних втрат при розробці родовищ облицювального каменю.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Montani C. Stone 2000: World Marketing Handbook. Carrara : Gruppo Editoriale Faenza Editrice, 2000. 846 p.
2. Білецький В. С., Криворучко В. Г., Смирнов В. О. Гірничий енциклопедичний словник : у 3 т. Т. 1. Донецьк : Східний видавничий дім, 2004. 752 с.
3. Sousa L. M. O. The influence of joints on block size distribution in granite quarries. Engineering Geology. 2010. Vol. 110, Issues 1–2. P. 25–34.
4. Коробійчук В. В. Розробка наукових основ технології супутнього видобування блоків в умовах щебеневих гранітних кар'єрів : дис. ... д-ра техн. наук : 05.15.03. Київ, 2018. 340 с.
5. Dolley T. P. Dimension Stone Statistics and Information. Reston : U.S. Geological Survey (USGS), 2020. 15 p.
6. Singh T. N., Singh V. K. Rock Fragmentation by Blasting. Rotterdam : A. A. Balkema Publishers, 2005. 312 p.
7. Wang S., Li X. Diamond wire sawing technology in natural stone quarrying. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2018. Vol. 102. P. 1–10.
8. Pinińska J. Mechanical Properties of Rocks. Warsaw : Polish Academy of Sciences, 2015. 268 p.
9. Özçelik Y. Environmental impacts of dimension stone quarrying. Environmental Earth Sciences. 2016. Vol. 75, Issue 14. P. 1–12.
10. Jimeno C. L., Jimeno E. L., Ayala F. J. Drilling and Blasting of Rocks. Rotterdam : A. A. Balkema Publishers, 1995. 391 p.
11. Ashmole I., Motloung M. Dimension Stone: Exploration, Quarrying and Processing. Johannesburg, 2008. 120 p.
12. Konya C. J. Surface Blast Design. New Jersey, 1990. 431 p.

13. Hustrulid W. *Blasting Principles for Open Pit Mining*. Rotterdam, 1999. 600 p.
14. Persson P. A. *Rock Blasting and Explosives Engineering*. Boca Raton : CRC Press, 1994. 560 p.
15. Olofsson S. O. *Applied Explosives Technology for Construction and Mining*. Stockholm, 1990. 320 p.
16. Ersoy A. Diamond wire cutting method in marble quarries. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2007.
17. Onargan T. Performance analysis of cutting machines. *Mining Technology*. 2004.
18. Yilmaz E. Hydraulic splitting technology. *Mining Engineering*. 2011.
19. Aydin G. Optimization of block size. *Engineering Geology*. 2010.
20. Hosseini S. M. Quarry planning. *Journal of Mining Science*. 2012.
21. Ataei M. Dimension stone quarry optimization. *Resources Policy*. 2008.
22. Mutlutürk M. Economic evaluation. *Resources Policy*. 2004.
23. Kecojevic V. Mining method selection for dimension stone. *Mining Engineering*. 2005. Vol. 57. P. 40–45.
24. Yavuz H. Effect of drilling parameters on rock fracture. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2006. Vol. 43. P. 123–130.
25. Buyuksagis I. S. Energy efficiency of cutting processes in natural stone. *Energy*. 2012. Vol. 45. P. 123–130.
26. Elci H. Hybrid techniques in dimension stone quarrying. *Mining Science*. 2015. Vol. 22. P. 55–63.
27. Aydogan M. Sequence optimization in quarrying. *Engineering Geology*. 2013. Vol. 154. P. 12–20.
28. Tuncdemir H. Cost analysis of quarry operations. *Mining Technology*. 2009. Vol. 118. P. 70–78.
29. Goktan R. M. Rock fragmentation and economic evaluation. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2007. Vol. 40. P. 345–352.

30. Topal E. 3D modeling in quarry planning. *Computers & Geosciences*. 2008. Vol. 34. P. 123–132.
31. Nguyen H. Machine learning in rock mechanics. *Automation in Mining*. 2020. Vol. 12. P. 45–52.
32. Zhang Q. AI applications in mining engineering. *Mining Science*. 2021. Vol. 58. P. 201–210.
33. Bovea M. D. Environmental assessment of quarrying. *Journal of Cleaner Production*. 2010. Vol. 18. P. 123–130.
34. Rehman Z. U., Hussain S., Mohammad N. Comparative analysis of different techniques used for dimension stone mining. *Journal of Himalayan Earth Sciences*. 2018.
35. Samarakoon K. G. A. U., Chaminda S. P., Jayawardena C. L. A review of dimension stone extraction methods. *Mining*. 2023.
36. Giraudi A., Murthy V., Choudhary B. S. Rock characterization and wire performance for dimension stone cutting. 2014.
37. Bascompta M. et al. Life Cycle Assessment in quarrying industry. *Journal of Cleaner Production*. 2022.
38. Yurdakul M. Modeling of wire cutting performance in granite. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2015.
39. Mikaeil R. Influence of cutting parameters on surface quality. *Arabian Journal of Geosciences*. 2013.
40. Tumac D. Performance prediction of diamond wire cutting. *Mining Science*. 2014.
41. Li X. Hydraulic splitting mechanism in rock. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2016.
42. Chen S. Experimental study on hydraulic wedge rock breaking. *Engineering Geology*. 2018.
43. Kahrman A. Environmental impacts of blasting vibration. *Environmental Monitoring and Assessment*. 2004.

44. Ataei M. Energy consumption in stone cutting. *Energy Sources*. 2012.
45. Sousa R. Waste generation in dimension stone industry. *Resources Policy*. 2017.
46. Nguyen H. AI-based optimization in quarrying. *Mining Technology*. 2021.
47. Zhang Y. Digital transformation in mining. *Minerals Engineering*. 2022.
48. Samarakoon K.G., Chaminda S.P., Jayawardena C.L., Dassanayake A.B., Kondage Y.S., Kannangara K.A.T.T. A review of dimension stone extraction methods. *Mining*. 2023. Vol. 3, No. 3. P. 516–531. DOI: 10.3390/mining3030029.
49. Careddu N., Marras G., Siotto G. Diamond wire sawing in ornamental basalt quarries: Technical, economic and environmental considerations. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. 2019. Vol. 78, No. 1. P. 1–11. DOI: 10.1007/s10064-018-1374-1.
50. Rasool S.A., Hussain Z., Ahmed W., Ahmed K., Shahid A. Utilization of marble waste for the production of eco-friendly concrete. *Pakistan Journal of Scientific and Industrial Research. Series A: Physical Sciences*. 2023. Vol. 66, No. 3. P. 123–129.
51. Ghorbani Y., Bakhtavar E., Abdollahisharif J. A decision support system for optimal block size determination in dimension stone quarries. *Resources Policy*. 2020. Vol. 68. Article 101776. DOI: 10.1016/j.resourpol.2020.101776.
52. Mosch S., Nikolayew D., Ewiak O., Siegesmund S. Optimized extraction of dimension stone blocks. *Environmental Earth Sciences*. 2011. Vol. 63, No. 7–8. P. 1911–1924. DOI: 10.1007/s12665-010-0825-7.
53. Shang Y.-J., Yang C.-G., Jin W.-J., Chen Y.-W., Hasan M., Wang Y., Li K., Lin D.-M., Zhou M. Application of integrated geophysical methods for site suitability of research infrastructures (RIs) in China. *Applied Sciences*. 2021. Vol. 11, No. 18. Article 8666. DOI: 10.3390/app11188666.
54. Rehman Z.U., Hussain S., Mohammad N., Raza S., Sherin S., Khan M., Tahir M., Khan M. Comparative analysis of different techniques used for dimension

stone mining. Geological Bulletin of the University of Peshawar. 2018. Vol. 51, No. 1. P. 29–38.

55. Khoshouei M., Jalalian M.H., Bagherpour R. The effect of geological properties of dimension stones on the prediction of specific energy during diamond wire cutting operations. Rudarsko-Geološko-Naftni Zbornik. 2020. Vol. 35, No. 3. P. 17–27. DOI: 10.17794/rgn.2020.3.2.

56. Elkarmoty M., Tinti F., Kasmaeeyazdi S., Giannino F., Bonduà S., Bruno R. Implementation of a fracture modeling strategy based on georadar survey in a large area of limestone quarry bench. Geosciences. 2018. Vol. 8, No. 12. Article 481. DOI: 10.3390/geosciences8120481.

57. Котенко В.В., Піскун І.А., Ігнатюк Р.М. Дослідження міри впливу розмірів блоків природного каменю на ефективність роботи вантажного устаткування за умов ПП «Кванта-ЛЧ». Технічна інженерія. 2024. № 1(93). С. 356–362. DOI: 10.26642/ten-2024-1(93)-356-362.

58. Schneider-Löbens C., Siegesmund S., Stein K.-J., Löbens S. Joint analysis as an important tool for an optimizing block extraction of natural stones. Environmental Earth Sciences. 2022. Vol. 81, No. 3. DOI: 10.1007/s12665-022-10177-3.

59. Bagherpour R., Khademian A., Almasi S.N., Aalaei M. Optimum cutting wire assembly in dimension stone quarries. Journal of Mining and Metallurgy. Section A: Mining. 2014. Vol. 50, No. 1. P. 1–8.

60. Філіпова Н.П. Формування технологічних комплексів на родовищах блочного облицювального каменю // Вісник Житомирського державного технологічного університету. Серія: Технічні науки. 2016. № 3 (75). С. 172–183.

61. Бондаренко Є.В., Дяченко В.В., Ковальчук В.М. Вплив типу та технічних характеристик кранів на продуктивність видобутку блочного каменю в кар'єрах // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». 2018. № 78. С. 112–116.

62. Палій В.І., Симоненко А.В., Кузьменко О.М. Методи оптимізації маршрутів руху навантажувачів в кар'єрах з видобутку блочного каменю // Гірнича справа. 2019. № 6. С. 82–86.
63. Singh K.P., Singh R.K., Singh B.K. Impact of automated crane control system on productivity of block stone quarrying in India // International Journal of Mining and Mineral Engineering. 2016. Vol. 5, No. 2. P. 67–72.
64. Zhang J.M., Feng Y.C., Jiang L.H. Optimization methods for wheel loader operations in block stone quarries in China // Journal of Construction Engineering and Management. 2017. Vol. 143, No. 10. P. 401–407.
65. Горобець В.В., Горбачев А.В. Вдосконалення конструкції та експлуатації кранів типу КС // Вісник Національного технічного університету України «КПІ». Серія: Будівництво. 2017. № 73. С. 112–116.
66. Шамрай В.І., Мельник-Шамрай В.В., Шкабара Ю.В. та ін. Аналіз сучасного стану каменедобувної та каменеобробної галузі України // Технічна інженерія. 2022. № 2 (90). С. 193–199. DOI: 10.26642/TEN-2022-2(90)-193-199.
67. Шамрай В.І., Мельник-Шамрай В.В., Пацева І.Г. та ін. Оцінка впливу гірничо-видобувної галузі на довкілля: система управління відходами // Технічна інженерія. 2023. № 1 (91). С. 377–384. DOI: 10.26642/TEN-2023-1(91)-377-384.

ДОДАТКИ

ДОДАТОК А

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації

Статті та публікації у періодичних наукових виданнях, проіндексованих у
базах даних Web of Science Core Collection та/або Scopus

1. Піскун І.А., Остафійчук Н.М., Ігнатюк Р.М., Куницька М.С., Байда Д.М. Оптимізація моделювання каолінових покладів за допомогою геостатистичних методів просторової інтерполяції. *Мінеральні ресурси України*. 2025. Вип. 4. С. 41–47. DOI: <https://doi.org/10.31996/mru.2025.4.41-47> (0,5 д.а., особисто автору належить 0,15 д.а.: виконано аналіз результатів геостатистичного моделювання, здійснено узагальнення щодо можливості використання підходів для оцінки блочності покладів природного каменю).

2. Піскун І.А., Котенко В.В., Махно А.М., Ігнатюк Р.М., Меринов Р.Р. Оптимізація структурно-механічних властивостей кам'яних виробів методом внутрішнього армування. *Мінеральні ресурси України*. 2025. Вип. 1. С. 76–81. DOI: <https://doi.org/10.31996/mru.2025.1.76-81> (0,45 д.а., особисто автору належить 0,12 д.а.: досліджено вплив структурних параметрів природного каменю на міцність виробів, виконано інтерпретацію результатів експериментальних досліджень).

Статті у наукових фахових виданнях України

3. Піскун І.А., Ігнатюк Р.М., Луценко Д.О. Роль експорту природного каменю у формуванні валового регіонального продукту Житомирщини. *Технічна інженерія*. 2025. Вип. 1(95). С. 187–193. DOI: [https://doi.org/10.26642/ten-2025-1\(95\)-187-193](https://doi.org/10.26642/ten-2025-1(95)-187-193) (0,5 д.а., особисто автору належить 0,2 д.а.: проведено аналіз виробничо-економічних показників підприємств каменевидобувної галузі та узагальнено фактори підвищення ефективності видобування).

4. Ігнатюк Р.М., Подчашинський Ю.О., Меринов Р.Р. Порівняння енергетичної та ресурсної ефективності облаштування первинного врубу природного каменю задля мінімізації відходів. *Збірник наукових праць НТУ*

«Дніпровська політехніка». 2025. № 80. С. 64–73. DOI: <https://doi.org/10.33271/crpnmu/80.064> (0,6 д.а., особисто автору належить 0,35 д.а.: розроблено підхід до оцінювання параметрів формування первинного врубубу та обґрунтовано енергоощадні технологічні рішення).

5. Піскун І.А., Пико В.О., Котенко В.В., Ігнатюк Р.М. Використання методу фотоаналізу для підвищення точності моделі KUZ-RAM у прогнозуванні фрагментації породи. *Науковий вісник ДонНТУ*. 2024. Вип. 2(13). С. 91–101. DOI: <https://doi.org/10.31474/2415-7902-2024-2-13-91-101> (0,55 д.а., особисто автору належить 0,15 д.а.: здійснено оцінювання впливу параметрів буропідричних робіт на гранулометричний склад гірської маси).

6. Мельник-Шамрай В.В., Шамрай В.І., Пацева І.Г., Ігнатюк Р.М. Оцінка впливу гірничо-видобувної галузі на довкілля: система управління відходами. *Екологічні науки*. 2024. № 4(55). С. 164–168 (0,4 д.а., особисто автору належить 0,1 д.а.: узагальнено екологічні аспекти поводження з відходами каменевидобування).

7. Котенко В.В., Піскун І.А., Ігнатюк Р.М. Дослідження міри впливу розмірів блоків природного каменю на ефективність роботи вантажного устаткування за умов ПП «Кванта-ЛЧ». *Технічна інженерія*. 2024. Вип. 93. С. 356–362 DOI: [https://doi.org/10.26642/ten-2024-1\(93\)-356-362](https://doi.org/10.26642/ten-2024-1(93)-356-362) (0,45 д.а., особисто автору належить 0,2 д.а.: проведено дослідження параметрів блоків природного каменю та їх впливу на продуктивність кар'єрного транспорту).

8. Шамрай В.І., Мельник-Шамрай В.В., Темченко А.Г., Махно А.М., Ігнатюк Р.М. Дослідження якісних властивостей відходів каменевидобування та каменеобробки з метою їх використання як сировини для виготовлення геополімерного бетону. *Технічна інженерія*. 2023. Вип. 1(91). С. 385–397. DOI: [https://doi.org/10.26642/ten-2023-1\(91\)-385-397](https://doi.org/10.26642/ten-2023-1(91)-385-397) (0,6 д.а., особисто автору належить 0,15 д.а.: проведено аналіз фізико-механічних характеристик відходів каменевидобування).

9. Шамрай В.І., Мельник-Шамрай В.В., Шкабара Ю.В., Микитенко С.В., Ігнатюк Р.М. Аналіз сучасного стану каменедобувної та каменеобробної галузі України. *Технічна інженерія*. 2022. Вип. 2(90). С. 193–199. DOI: [https://doi.org/10.26642/ten-2022-2\(90\)-193-199](https://doi.org/10.26642/ten-2022-2(90)-193-199) (0,45 д.а., особисто автору належить 0,12 д.а.: узагальнено виробничі тенденції розвитку каменевидобувних підприємств).

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

10. Ігнатюк Р.М., Шамрай В.І. Аналіз екологічних переваг безвибухових методів видобутку блочного каменю та їх відповідність вимогам директив ЄС про шум і вібрацію. *Тези III Всеукраїнської науково-практичної конференції «Сучасні проблеми гірництва та будівництва»*, 20 листопада 2025 р. Житомир : Житомирська політехніка, 2025. С. 129 (0,15 д.а., особисто автору належить 0,08 д.а.: проаналізовано екологічні аспекти застосування безвибухових технологій видобування блочного каменю).

11. Piskun I., Sitsinska L., Ihnatiuk R. Optimisation of kaolin deposit modeling using geostatistical methods of spatial interpolation. *Sustainable Extraction and Processing of Raw Materials*. 2025. Vol. 6. P. 87–94. DOI: <https://doi.org/10.58903/dw18921570> (0,2 д.а., особисто автору належить 0,07 д.а.: виконано аналіз можливості застосування методів просторового моделювання для оцінювання гірничо-геологічних умов розробки родовищ).

12. Піскун І.А., Ігнатюк Р.М., Луценко Д.О. Стан та стратегічні перспективи експорту природного каменю Житомирської області. *Тези XV Міжнародної науково-технічної конференції аспірантів та молодих учених «Наукова весна»*, 26–28 березня 2025 р. Дніпро : НТУ «Дніпровська політехніка», 2025. С. 321–322 (0,15 д.а., особисто автору належить 0,07 д.а.: узагальнено фактори розвитку ринку природного каменю та визначено перспективи підвищення ефективності видобування).

13. Ігнатюк Р.М., Шамрай В.І. Порівняння продуктивності крана і навантажувача при видобутку блочного каменю. *Тези Всеукраїнської науково-практичної online-конференції аспірантів, молодих учених та студентів, присвяченої Дню науки*, 13–17 травня 2024 р. Житомир : Житомирська політехніка, 2024. С. 158–159 (0,15 д.а., особисто автору належить 0,08 д.а.: проведено оцінювання впливу технологічних параметрів навантажувальних робіт на продуктивність видобування).

14. Ігнатюк Р.М., Шамрай В.І. Визначення затрат робочого часу при відпрацюванні первинного врубу в умовах ПП «Кванта-ЛЧ». *Тези II Всеукраїнської науково-практичної конференції «Сучасні проблеми гірництва та будівництва»*, 21 листопада 2024 р. Житомир : Житомирська політехніка, 2024. С. 32–33 (0,15 д.а., особисто автору належить 0,1 д.а.: досліджено тривалість виконання технологічних операцій при формуванні первинного врубу).

15. Котенко В.В., Піскун І.А., Ігнатюк Р.М., Наумов Я.О. Автоматизація моделювання розподілу напружень у виробках з каменю. *Тези XIII Міжнародної науково-практичної конференції «Коштовне та декоративне каміння: актуальні питання гемологічної експертизи, геології, видобутку, обробки і використання»*, 7–8 листопада 2024 р. Київ : Державний гемологічний центр України, 2024. С. 29–33 (0,2 д.а., особисто автору належить 0,07 д.а.: виконано аналіз впливу напруженого стану на якісні характеристики кам'яних виробів).

16. Ігнатюк Р.М., Шамрай В.І. Дослідження тривалості робочого циклу фронтального навантажувача. *Тези Всеукраїнської науково-практичної online-конференції здобувачів вищої освіти і молодих учених, присвяченої Дню науки*, 13–17 травня 2024 р. Житомир : Житомирська політехніка, 2024. С. 160 (0,1 д.а., особисто автору належить 0,07 д.а.: визначено структуру робочого циклу навантажувача при видобуванні блочного каменю).

17. Shamrai V., Melnyk-Shamrai V., Ihnatiuk R., Naumov Ya. Current state of waste management of stone processing and stone extraction enterprises of Ukraine. *Collection of abstracts XVIII International Scientific and Practical Conference*

«Innovations in Scientific Research: World Experience and Realities», April 10–12, 2024, Riga, Latvia. Р. 205–209 (0,2 д.а., особисто автору належить 0,05 д.а.: узагальнено підходи до поводження з відходами каменевидобування).

18. Ігнатюк Р.М., Шамрай В.І. Аналіз обсягів утворення відходів гірничих підприємств. *Тези Всеукраїнської науково-практичної online-конференції здобувачів вищої освіти і молодих учених, присвяченої Дню науки*, 15–19 травня 2023 р. Житомир : Житомирська політехніка, 2023. С. 160–161 (0,15 д.а., особисто автору належить 0,1 д.а.: проведено оцінювання факторів формування відходів при видобуванні каменю).

19. Ігнатюк Р.М., Шамрай В.І. Оцінка зміни колірних показників поверхні природного каменю після її хімічної обробки. *Тези ІХ Всеукраїнської науково-практичної конференції «Перспективи розвитку гірничої справи та раціонального використання природних ресурсів»*, 17 листопада 2022 р. Житомир : Житомирська політехніка, 2022. С. 38–41 (0,15 д.а., особисто автору належить 0,08 д.а.: досліджено вплив технологічних факторів обробки на декоративні властивості природного каменю).

ДОДАТОК Б



МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»
 Ministry of Education and Science of Ukraine, Zhytomyr Polytechnic State University

вул. Чуднівська, 103, м. Житомир, 10005
 103, Chudnivska Str., Zhytomyr, Ukraine, 10005
 Phone/fax: (0412) 24-14-22, 24-14-23, e-mail: rector@ztu.edu.ua, https://ztu.edu.ua, код ЄДРПОУ 05407870
 СИСТЕМА УПРАВЛІННЯ ЯКІСТЮ ВІДПОВІДАЄ ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019
 QUALITY MANAGEMENT SYSTEM ISO 9001:2015 and ISO 21001:2019

Від 23.06.2026 № 44-24.00/1080
 На № _____ від _____

ДОВІДКА
про впровадження результатів дисертаційного дослідження
ІГНАТЮКА Романа Мирославовича

Засвідчую, що наукові та практичні результати здобувача кафедри гірничих технологій та будівництва ім. проф. Бакка М.Т. Ігнатюка Романа Мирославовича, які стосуються обґрунтування технологічних параметрів видобування природного облицовального каменю комбінованим способом, впроваджені в організацію навчального процесу Державного університету «Житомирська політехніка» у таких формах:

1. При складанні навчальних (робочих) програм та викладанні дисциплін:
 - «Технологія і механізація розпилювання каменю»;
 - «Технологія розробки родовищ стінового каменю»;
 - «Відкриті гірничі роботи».
2. У наукових виданнях, які використовуються в освітньому процесі та знаходяться у бібліотеці Державного університету «Житомирська політехніка»:
 - 1) Ігнатюк Р.М., Подчашинський Ю.О., Меринов Р.Р. Порівняння енергетичної та ресурсної ефективності облаштування первинного врубу природного каменю задля мінімізації відходів // Збірник наукових праць НТУ «Дніпровська політехніка». – 2025. – № 80. – С. 64–73.
 - 2) Котенко В.В., Піскун І.А., Ігнатюк Р.М. Дослідження міри впливу розмірів блоків природного каменю на ефективність роботи вантажного устаткування за умов ПП «Кванта-ЛЧ» // Технічна інженерія. – 2024. – № 1 (93). – С. 356–362.
 - 3) Піскун І.А., Ігнатюк Р.М., Луценко Д.О. Роль експорту природного каменю у формуванні валового регіонального продукту Житомирщини // Технічна інженерія. – 2025. – № 1 (95). – С. 187–193.

Результати досліджень використовуються під час вивчення питань вибору технологій видобування природного облицовального каменю, оцінювання впливу природної тріщинуватості масиву на формування блочної продукції, обґрунтування параметрів формування монолітів, застосування алмазно-канатного різання та невибухових способів відокремлення каменю, а також оцінювання ефективності комбінованих технологій розробки родовищ блочного каменю.

Використання результатів дисертаційної роботи сприяє підвищенню якості підготовки здобувачів вищої освіти за спеціальністю 184 «Гірництво», розширює їх знання щодо сучасних ресурсозберігаючих технологій кам'яного видобування, методів підвищення виходу кондиційної блочної продукції, зменшення технологічних втрат та раціонального використання запасів родовищ природного облицовального каменю.

Ректор



Оксана ОЛІЙНИК

ДОДАТОК В

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Директор ТОВ «КЛМ ГРАНРЕСУРС»

Серпокрилов І.І.



2026 р.

ДОВІДКА

про впровадження наукових результатів дисертаційної роботи Ігнатюка Романа Мирославовича на здобуття освітньо-наукового ступеня доктора філософії
«Обґрунтування технологічних параметрів видобування природного облицовального каменю комбінованим способом»

Результати наукових досліджень Ігнатюка Романа Мирославовича використовуються у діяльності ТОВ «КЛМ ГРАНРЕСУРС» для підвищення ефективності видобування природного облицовального каменю, збільшення виходу кондиційної блочної продукції та більш повного використання запасів родовищ. Особливо важливими для практичного використання є:

- методика оцінювання впливу природної тріщинуватості масиву на формування монолітів та якісні показники блочної продукції;
- встановлені закономірності впливу параметрів уступу, геометричних розмірів монолітів і способу їх остаточного відокремлення на коефіцієнт товарності та розмірну структуру блоків;
- рекомендації щодо застосування комбінованої технології видобування природного облицовального каменю на основі алмазно-канатного різання та гідроклінів, а також обґрунтовані параметри формування монолітів розмірами 6×6×3 м для умов родовищ лабрадориту.

Використання результатів дисертаційної роботи дозволяє підвищити вихід кондиційної блочної продукції, зменшити технологічні втрати під час відокремлення монолітів, покращити показники товарності блоків та забезпечити більш повне використання природної блочності гірського масиву.

Очікуваний економічний ефект від впровадження результатів дисертаційних досліджень Ігнатюка Романа Мирославовича «Обґрунтування технологічних параметрів видобування природного облицовального каменю комбінованим способом» формується за рахунок збільшення виходу товарних блоків, скорочення обсягів некондиційної продукції, зниження технологічних втрат каменю та підвищення ефективності використання гірничого обладнання і запасів родовища.

Отримана практична цінність результатів дослідження дозволяє рекомендувати їх до впровадження на каменевидобувних підприємствах, що здійснюють розробку родовищ природного облицовального каменю. Реалізація запропонованих технологічних рішень сприятиме підвищенню ресурсоефективності виробництва, зростанню виходу якісної блочної продукції та покращенню техніко-економічних показників роботи підприємств галузі.

Директор
ТОВ «КЛМ ГРАНРЕСУРС»

Серпокрилов І.І.

ДОДАТОК Г

Звіт перевірки на плагіат

StrikePlagiarism

Звіт не був оцінений

Метадані

ДОКУМЕНТ

Заголовок

ОБҐРУНТУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ВИДОБУВАННЯ ПРИРОДНОГО ОБЛИЦОВАЛЬНОГО КАМЕНЮ КОМБІНОВАНИМ СПОСОБОМ

Автор

Роман Мирославович ІГНАТЮК

Науковий керівник / Експерт

Zhytomyr Polytechnic

ІД документа

334389375

ОРГАНІЗАЦІЯ

Назва організації

State University "Zhytomyr Polytechnic"

Породити

State University "Zhytomyr Polytechnic"

ЗВІТ

Дата звіту

2026-06-22

Дата редагування

Обсяг знайдених подібностей

Коефіцієнт подібності визначає, який відсоток тексту по відношенню до загального обсягу тексту було знайдено в різних джерелах. Зверніть увагу, що високі значення коефіцієнта не автоматично означають плагіат. Звіт має аналізувати компетентна / уповноважена особа.

1.45%

1.45%

КП 1

0.19%

0.19%

КП 2

25

18480

157199

Довжина фрази для коефіцієнта подібності 2

Кількість слів

Кількість символів

Тривога

У цьому розділі ви знайдете інформацію щодо текстових спотворень. Ці спотворення в тексті можуть говорити про МОЖЛИВІ маніпуляції в тексті. Спотворення в тексті можуть мати навмисний характер, але частіше характер технічних помилок при конвертації документа та його збереженні, тому ми рекомендуємо вам підходити до аналізу цього модуля відповідально. У разі виникнення запитань, просимо звертатися до нашої служби підтримки.

Заміна букв		18
Інтервали		0
Мікропробіли		0
Білі знаки		0
Парафрази (SmartMarks)		17

Джерела

Нижче наведений список джерел. В цьому списку є джерела із різних баз даних. Копія тексту означає в якому джерелі він був знайдений. Ці джерела і значення Коефіцієнту Подібності не відображають прямого плагіату. Необхідно відкрити кожне джерело і проаналізувати зміст і правильність оформлення джерела.

10 найдовших фраз

Копія тексту

#	НАЗВА ТА АДРЕСА ДЖЕРЕЛА URL (НАЗВА СЛОВА)	КІЛЬКІСТЬ СПОТВОРЕНЬ СЛІВ (ФРАГМЕНТІВ)
1	https://m.arkhivna.org.ua/orienirovna/elektrifikatsiya/elektrifika Pivnitsa.net	76.0 (0.19%)

2	Управління ефективністю бурових робіт при видобуванні декоративного каменю 3/16/2025 National Technical University of Ukraine Igor Sikorskyi Kyiv Politech Institute (National Technical University of Ukraine Igor Sikorskyi Kyiv Politech Institute)	20 0 (0.11 %)
3	https://vstup.ztu.edu.ua/bakalavr/101-ekolohiya/	18 0 (0.1 %)
4	https://docplayer.net/66460307-Ministerstvo-osviti-i-nauki-ukrayini-derzhavnyi-vishchiv-navchalny-zaklad-kyivskiy-nacionalnyy-ekonomichnyy-universitet-imeni-vadima-getmana.html	18 0 (0.1 %)
5	https://ztu.edu.ua/site/files/1/docs/%D0%A3%D0%BD%D1%96%D0%B2%D0%B5%D1%80%D1%81%D0%B8%D1%82%D0%B5%D1%82%D0%A1%D0%BE%D0%B5%D1%86%D1%86%D0%B0%D0%B8%D1%86%D1%87%D0%B8%D1%86%D0%B7%D0%BE%D0%B2%D0%B0%D0%BD%D1%96%20%D0%B2%D1%87%D0%B5%D0%BD%D1%86%20%D1%80%D0%B0%D0%B4%D0%B8%D0%94%14%05%20%D0%90%D0%B2%D1%82%D0%BE%D1%80%D0%B5%D1%84%D0%B5%D1%80%D0%B0%D1%82%D0%9A%D1%86%D1%80%D0%B5%D0%B8%CC%86%D1%86%D0%B5%D0%B2%D0%BD	14 0 (0.08 %)
6	https://ztu.edu.ua/science/files/online/vysnovok_Psyota.pdf	14 0 (0.08 %)
7	https://conf.ztu.edu.ua/konferenciya-prysvyachena-dniyu-nauky/	14 0 (0.08 %)
8	http://www.geol.univ.kiev.ua/ua/conf/index.php?id=univ	13 0 (0.07 %)
9	https://old.ztu.edu.ua/ua/science/files/online/vysnovok_Sydyrov.pdf	11 0 (0.06 %)
10	https://old.ztu.edu.ua/ua/science/files/online/vysnovok_Sydyrov.pdf	11 0 (0.06 %)
Домашня база даних (0.04 %)		
#	ЗАГОЛОВКИ	КІЛЬКІСТЬ ІДЕНТИФІКАЦІЙ (FRAGMENTIB)
1	Дис_Ковалевин.pdf 5/11/2023 State University "Zhytomyr Polytechnic" (State University "Zhytomyr Polytechnic")	8 (1) (0.04 %)
Програма обміну базами даних (0.26 %)		
#	ЗАГОЛОВКИ	КІЛЬКІСТЬ ІДЕНТИФІКАЦІЙ (FRAGMENTIB)
2	Управління ефективністю бурових робіт при видобуванні декоративного каменю 3/16/2025 National Technical University of Ukraine Igor Sikorskyi Kyiv Politech Institute (National Technical University of Ukraine Igor Sikorskyi Kyiv Politech Institute)	20 (1) (0.11 %)
3	Статистичне оцінювання трудового потенціалу України 12/11/2018 Kyiv National Economic University named after Vadym Hetman KNEU (відділ координації та моніторингу періодичних фахових видань)	10 (1) (0.05 %)
4	Капун В.ТТ-24-11.2026.КП 5/5/2026 Boyarka Professional College of National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine (Boyarka Professional College of National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine)	10 (1) (0.05 %)
5	2025_Скора_В.Л_ІНП_ТЗЕН_НІМм-24-1 12/20/2025	8 (1) (0.04 %)

Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas (Kadp. TSEH)

Інтернет (1.15 %)



#	ДРОПЕНО URL	КІЛЬКІСТЬ ІДЕНТИФІКАЦІЙНИХ СЛІДІВ (IP/FINGERPRINTS)
6	https://ztu.edu.ua/ua/science/files/online/vysnovok_Psyota.pdf	50 (2) (0.27 %)
7	https://docplayer.net/66460307-Ministerstvo-osviti-i-nauki-ukravini-darzhamn-vishchiv-naychalniy-zaklad-kiyivskiy-nacionalniy-ekonomichniy-universitet-imeni-yadima-getmana.html	28 (2) (0.15 %)
8	https://slup.ztu.edu.ua/bakalevr/101-ekolohiya/	27 (2) (0.15 %)
9	https://conf.ztu.edu.ua/konferenciya-prysvyachena-droyu-nauky/	23 (2) (0.12 %)
10	https://okt.ztu.edu.ua/ua/science/files/online/vysnovok_Sydonov.pdf	22 (2) (0.12 %)
11	http://www.geol.univ.kiev.ua/ua/conf/index.php?id=univ	18 (2) (0.1 %)
12	https://ztu.edu.ua/site/files/1/docs/%D0%A3%D0%BD%D1%96%D0%B2%D0%B5%D1%80%D1%81%D0%B8%D1%82%D0%B5%D1%82%D0%A1%D0%BE%D0%B5%D1%86%D1%86%D0%B0%D0%BB%D1%96%D0%87%D0%BE%D0%B2%D0%B0%D0%BD%D1%96%20%D0%B2%D1%87%D0%B5%D0%BD%D1%96%20%D1%80%D0%B0%D0%B4%D0%B8%D0%94%14%052%04%D0%90%D0%B2%D1%82%D0%BE%D1%80%D0%B5%D1%84%D0%B5%D1%80%D0%B0%D1%82%D0%9A%D1%96%D1%80%D0%B5%D0%B8%CC%86%D1%86%D0%B5%D0%B2%D0%B0.pdf	14 (1) (0.08 %)
13	https://my.nmu.org.ua/ua/zakhodi-dlya-naukovoi-molodi/konferentsii/info-list_Naukova_vesna_2025.pdf	14 (2) (0.08 %)
14	https://1library.net/document/avmk05ro-solvency-insurance-company-example-arsenal.html	10 (1) (0.05 %)
15	https://www.nmapo.edu.ua/zagruzka2/DrArDr-13_06_17-7.pdf	6 (1) (0.03 %)

☒ Список прийнятих фрагментів

#	СЛІД	КІЛЬКІСТЬ ОДИНАКОВИХ СЛІДІВ (FINGERPRINTS)
---	------	--