



МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ
ІНСТИТУТ імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

**МАТЕРІАЛИ МІЖНАРОДНОЇ НАУКОВО-ТЕХНІЧНОЇ
КОНФЕРЕНЦІЇ**

**«СУЧАСНИЙ СТАН І ПЕРСПЕКТИВИ
РОЗВИТКУ ГЕОТЕХНІЧНОЇ ІНЖЕНЕРІЇ»**

**MATERIALS OF THE INTERNATIONAL SCIENTIFIC
AND TECHNICAL CONFERENCE
«CURRENT STATE AND DEVELOPMENT
PROSPECTS OF GEOTECHNICAL ENGINEERING»
GEO-25**

04-05 червня 2025, Київ, Україна

June 04-05, 2025, Kyiv, Ukraine



**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ імені ІГОРЯ
СІКОРСЬКОГО»**

**Матеріали
міжнародної науково-технічної конференції
«СУЧАСНИЙ СТАН І ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ
ГЕОТЕХНІЧНОЇ ІНЖЕНЕРІЇ»**

**Materials
of the International Scientific and Technical Conference
«CURRENT STATE AND DEVELOPMENT PROSPECTS
OF GEOTECHNICAL ENGINEERING»
GEO-25**

м. Київ, 04 - 05 червня 2025 року
Kyiv, June 04-05, 2025

Друкується за рішенням Вченої ради
НН ІЕЕ КПІ ім. Ігоря Сікорського
(протокол № 12 від 30.06.2025 р.)

КПІ імені Ігоря Сікорського
2025

УДК 622+624.1](0.62)
С91

Матеріали міжнародної науково-технічної конференції «Сучасний стан і перспективи розвитку геотехнічної інженерії. GEO-25» – [Електронний ресурс]. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2025. – 123 с.

ISBN 978-617-8324-55-1

Представлені матеріали наукових досліджень у сфері геотехнічної інженерії, а саме особливості та результати 3D моделювання у гірництві, технології захисту довкілля та забезпечення екологічної безпеки, розглянуто проблеми видобування корисних копалин відкритим та підземними способами та способи їх вирішення, наведені ефективні технології гірництва та геотехнічного будівництва, а також технології переробки та зберігання відходів виробництва. Збірка призначена для науковців, інженерно-технічних працівників та студентів, які спеціалізуються у галузі гірництва (видобутку та переробки корисних копалин), геотехнічному будівництві та захисті навколишнього середовища.

Матеріали конференції рекомендовано до опублікування Вченою радою навчально-наукового інституту енергозбереження та енергоменеджменту Національного технічного університету України «Київського політехнічного інституту імені Ігоря Сікорського» (протокол № 12 від 30.06.2025 року) у відповідності до наказу КПІ ім. Ігоря Сікорського № НОД/485/25 від 03 червня 2025 року.

ОРГАНІЗАЦІЙНИЙ КОМІТЕТ

Почесний голова організаційного комітету:

Вовк Оксана Олексіївна, д.т.н., професор, директорка НН ІЕЕ КПІ ім. Ігоря Сікорського

Голова організаційного комітету:

Зуєвська Наталя Валеріївна, д.т.н., професор, професорка кафедри геоінженерії

Співголова організаційного комітету:

Тверда Оксана Ярославівна, д.т.н, професор, професорка кафедри геоінженерії

Члени організаційного комітету:

Броницький Вадим Олегович, кандидат технічних наук, доцент кафедри геоінженерії

Вапнічна Вікторія Вікторівна, к.т.н., доц. кафедри геоінженерії

Ган Олена Валеріївна, к.т.н., ст. викл. кафедри геоінженерії

Гребенюк Тетяна Володимирівна, к.т.н., доц. кафедри геоінженерії

Шайдецька Любов Валентинівна, к.т.н., доц. кафедри геоінженерії.

Комп'ютерна верстка: О.В. Ган, О.О. Фролов

За довідками звертатися за адресою: 03056, м. Київ, вул. Борщагівська, 115, Національний технічний університет України «КПІ ім. Ігоря Сікорського», кафедра «Геоінженерії», тел. +380 63 037 28 48, E-mail: v.vapnichna@kpi.ua

ISBN 978-617-8324-55-1

УДК 622+624.1](0.62)
© КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2025
© Видавець Цибульська, 2025

ЗМІСТ

СЕКЦІЯ 1. 3D МОДЕЛЮВАННЯ В ГІРНИЦТВІ.....	7
N. Çetin	
Blastholes pattern simulation modelling for an open mine with GPSS/H.....	7
Г. І. Гайко, В. Ю. Берездецький, Ю. В. Зуєвський	
Особливості врахування невизначеностей геологічного середовища при моделюванні динамічних процесів у програмному комплексі ANSYS.....	10
Л.В. Шайдецька, Н. Шукурлю	
Перспективи та особливості видобування алунітових руд	16
Y. Zuievskyi, O. Vovk	
Applied numerical modeling of deep explosive charge–soil interaction using ansys explicit dynamics.....	21
P. Hajiyev, E. Shukurlu, N. Zuievska	
Using the wipfrag image analysis system to evaluate the quality of explosive rock fragmentation	25
СЕКЦІЯ 2. ТЕХНОЛОГІЇ ЗАХИСТУ ДОВКІЛЛЯ ТА ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ.....	29
O. Kofanova, O. Kofanov	
Enhancement of the country’s energy safety through the transition to environmentally friendly biofuels and AI-based solutions	29
Н.П. Кириленко, І.Г. Пацева, Л.О. Герасимчук	
Цифрові рішення для зниження екологічного навантаження від транспортних операцій на кар’єрах блочного каменю	32
В.О. Хрутьба, Р.С. Лисак, Ю.С. Хрутьба, М.Ю. Борятинський, І.В. Бельмега	
Особливості міжнародних екологічних проєктів національного плану відновлення України	36
Р.О. Новохатько, О.В. Ган	
Комплексні рішення для очищення повітря в умовах хімічного виробництва	39
Т.М. Ткаченко, В.О. Мілейковський	
Можливості технологій вертикального озеленення для багатоповерхових будівель.....	42

СЕКЦІЯ 3. ГІРНИЦТВО ТА ГЕОТЕХНІЧНЕ БУДІВНИЦТВО..... 49

В.І. Шамрай, П.В. Шепель

Застосування дрібнодисперсних відходів природного каменю в геополімерних сумішах..... 49

О.В. Романенко, І.Г. Сахно

Фрикційний анкер підвищеної несучої здатності..... 52

М.І. Бельтек, О.В. Ган, О.О. Фролов

Вплив тріщинуватості гірського масиву на ефективність його руйнування вибухом..... 56

Т.А. Олійник, Н.В. Кушнірук, К.А. Левченко²

Відходи гірничо-металургійного комплексу як резерв промислового виробництва: стан і перспективи..... 62

А.О. Остапчук, О.О. Фролов

Дослідження стійкості борта кар'єра при видобутку прибортових запасів неперекристалізованих вапняків..... 65

В.В. Коробійчук, М.В. Качуровський, В.О. Соколовський

Вплив технології відпрацювання розвалу гірської породи на розміри та форму розвалу негабаритного матеріалу 69

Д.А. Вилобков, О.О. Фролов

Аналіз та вибір способів спорудження гірничих виробок великого перерізу в міцних породах 79

Д. В. Литвинчук, А. С. Гаращук, М. І. Сергієнко

Застосування новітньої бурової техніки для підвищення ефективності буровибухових робіт на геотехнічних об'єктах України..... 85

С.В. Сахно, Л.С. Завгородня, О.С. Булич, О.Л. Кирсанов

Оцінка асиметричності і неоднорідності втрати стійкості конвеєрних штреків ПрАТ «Шахтоуправління «Покровське» на всіх етапах життєвого циклу..... 90

І.Я. Климентова, О.О. Фролов

Особливості проектування та прокладання підземних комунікацій для волоконно-оптичних ліній зв'язку 94

T. Kosenko, E. Shukurlu

Use of GIS technologies for geospatial analysis of gold ore deposits..... 99

В. В. Вапнічна, О. О. Безсмертна

Аналіз основних схем армування ґрунту: сучасний стан і перспективи... 103

Горєв О.В., О. Я. Тверда, К.К. Ткачук

Аналіз фізико-хімічного складу забійок при проведенні вибухових робіт на кар'єрах 108

М.В. Дзьоба, О.О. Фролов

Розробка захисних конструкцій для забезпечення стійкості борта кар'єра при дії на нього додаткового навантаження 111

В.І. Шамрай, А.В. Шуляк

Вивчення ефективності використання дрібнодисперсних відходів природного каменю як замітника цементу в бетоні 115

І.А. Піскун, Д.І. Заліван, Я.О. Наумов, С.І. Башинський

Дослідження доцільності застосування біочару як засобу відновлення родючості ґрунтів, порушених видобутком титанової сировини 119

СЕКЦІЯ 1. 3D МОДЕЛЮВАННЯ В ГІРНИЦТВІ

UDC 622.235

N. Çetin, Dept. of Mining Engineering, Ph.D. , Assistant Professor,
Faculty of Engineering, Dept. of Mining Engineering,
Kütahya Dumlupınar University', Türkiye

BLASTHOLES PATTERN SIMULATION MODELLING FOR AN OPEN MINE WITH GPSS/H

In this study, a simulation model is developed by using GPSS/H simulation software program for a small surface coal mine by varying the number of blasthole drilled out at a given array pattern to determine the out of sequence firing (OOSF) and crowding as ms delays by varying the scatter in mean delay time while assuming a predefined value for crowding as ms delay. The simulation results and the interpretations of them for a given mine site provides the optimal sequencing and the scatter of the selected blasting agent.

Keywords: Drilling and Blasting, Surface Mining, Discrete-Event Systems Simulation, GPSS/H Software

У цьому дослідженні розроблено імітаційну модель з використанням програмного забезпечення GPSS/H для невеликого вугільного родовища, яке розробляється відкритим способом. У ході дослідження варіюється кількість пробурених свердловин за заданою схемою розташування визначення послідовності підривання (OOSF) і часу уповільнення (затримки в мс) шляхом зміни розкиду середнього часу затримки, при цьому передбачається, що уповільнення задано. Результати моделювання та їх інтерпретація для даної ділянки родовища дозволяють визначити оптимальну послідовність та ефективність вибраної вибухової речовини.

Ключові слова: буропідривні роботи, відкритий видобуток, моделювання дискретно-подійних систем, програмне забезпечення GPSS/H

Introduction. Drilling and blasting are two of the major unit operations in most open pit mines. The main goal for these operations is to optimize rock fragmentation that may cost as high as 25-30 % of the total operating cost in open pit mining. Efficient blast design along with proper choice of explosives can produce better fragmentation with associated lower operating cost compared to the blast designs and explosives under adverse conditions. Delay patterns and varying the blasthole array to fit the natural excavation topography allow for more efficient use of the explosive energy in a blast. Benches may be designed and carried out with more than one face so that simple blasting patterns can be used to remove the rock materials [1].

A face (or bench in an open pit mine) about to be blasted consists of numerous holes filled with powder (or suitable blasting agent). The holes are blasted in sequence to allow for maximum fragmentation and detonation. For example, if the holes were drilled in concentric circles, the sequence of the blast would be from the innermost ring to the outer ring. Each of the holes in each circle would ideally have the same delay. To ensure this sequencing, delay detonators are used. The length of this delay is given by the manufacturer's specification in milliseconds (ms).

For economic reasons, the blast must be both well planned and be accurately executed using the minimum amount of explosives. If the blast sequence is correct, less explosives are required at a single time.

Typical delays, as given by manufacturers, might be for 200 ms, 300 ms, 1500 ms etc. However, in practice, these delays tend to be average values and the actual delay times are stochastically distributed. In this example, the delay times will be assumed to be estimated from a normal distribution. Figure 1 shows a typical face about to be blasted. It is of concern both the holes are fired in proper sequence and that they do not fire too close in sequence. If the holes fire out of sequence, this is known as “Out-of-Sequence-Firing” (OOSF), if they fire too close together, this is known as “Crowding”. Figure 2 shows an arrangement of a few holes. Those numbered 1, are to be donated at the same time and so have a delay of 200 ms. those numbered 2 are to be fired next and they have a delay of 300 ms.



Figure 1 – A typical face to be blasted of firing for holes

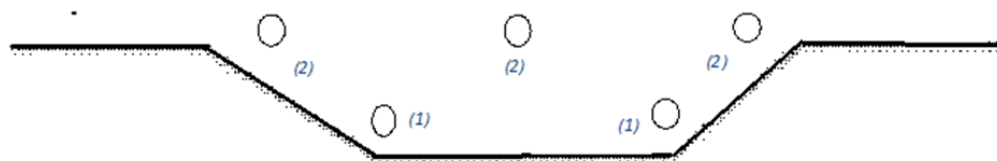


Figure 2 – Arrangement for firing of blast holes

Materials and research results. GPSS/H is a Discrete-Event systems simulation language widely used by many academicians and commercial users and it uses process-interaction approach to modelling. The modeler specifies the sequence of events separated by lapses in time which describes the manner in which objects flow through a system. Models are developed in text files in GPSS/H and compiled into memory and executed [2]. It is considered in this study a case study problem which consists of a series of shots as given by the arrangement in Figure 3.

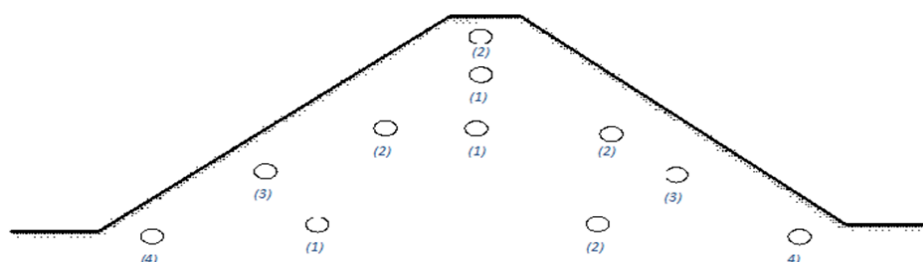


Figure 3 – Arrangement of firing for sample holes

The simulation was done for 200 simulated blasts [3]. There were 11 holes and, because of their arrangement, each time a simulation was done, there had to be 24 tests for OOSF and crowding. This first sequence (1) consisted of 3 holes. Their blast times were compared to the second sequence of holes (2) consisting of 4 holes. There were 12 tests done here. However, the next sequence (2) for 8 total comparisons. Finally, sequence (4) consisted of 2 holes and each of these was compared to the sequence (3). There were 4 such comparisons. Thus, the total of 24 (12 + 8 + 4). The simulation was performed for varying values of the scatter. 1000 simulated blasts were performed. The mean delay times are as shown in Figure 3 and the standard deviations were taken starting at 9 % of these values. Crowding was assumed to take place if the delay was 30 ms or less. The simulation was the repeated with std. dev. increased by 1 % until it was 20 % of the mean. Input values and prompt are:

Input the time for crowding as ms delay

<< 30>>

How many blasts to simulate for

<<1000>>

Input the scatter as a percent

<<9>>

The simulation results are given in Table 1. The interpretation of the results depends on the particular mining situation and how many OOSF's are allowed. If these are to be no more than, say, 0.5 %, then the detonators need to have a standard deviation of less than 13 % of the mean as this gave 100 OOSF's. There were 24.000 possible OOSF's and 0.5 % of this is 120. For a standard deviation of 14% of the mean, there were 140 OOSF's.

Table 1 – Results of Simulation for Case Study Problem

% Scatter Std. Dev.	Out of Sequence Firings	Crowding
9	5	20
10	15	32
11	35	62
12	60	77
13	100	89
14	140	110
15	182	133
16	242	139
17	298	164
18	255	195
19	412	233
20	484	277

Conclusions. A small case study example problem is presented for blasting pattern in open pit mine where a series of shots as given by the arrangement. Drilling and blasting practices used in many open pit mines are mostly designed by the intensive grade-control practices that have developed as a result of complex grade distributions found in these ore bodies.

References

- [1] S. M. Benett and J. R. Sturgul, "A computer Simulation Model of a Surface Blast", Int. Jour. of Surface Mining, Vol.2 No.2, Belkema Publ. 1989.
- [2] T. J. Schriber, An Introduction to Simulation Using GPSS/H, John Wiley & Sons, 1990.
- [3] J. Banks, J. S. Carson, B. L. Nelson and D. M. Nicol, Discrete-Event System Simulation, 5th Ed. Pearson Education. Publ., 2010

УДК 624.1

Г. І. Гайко, д.т.н., професор
В. Ю. Берездецький, аспірант
Ю. В. Зуєвський, аспірант

*Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна*

ОСОБЛИВОСТІ ВРАХУВАННЯ НЕВИЗНАЧЕНОСТЕЙ ГЕОЛОГІЧНОГО СЕРЕДОВИЩА ПРИ МОДЕЛЮВАННІ ДИНАМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ У ПРОГРАМНОМУ КОМПЛЕКСІ ANSYS

В моделі програмного комплексу ANSYS представлено оцінку змін геомеханічного процесу утворення воронки при вибуху накладного заряду в залежності від зміни щільності ґрунту. Зазначена проблема коректності відображення геологічного середовища з використанням інструментарію програмного комплексу ANSYS і врахуванням невизначеності (змінності) параметрів геологічного середовища для підвищення надійності результатів.

Ключові слова: програмний комплекс ANSYS; динамічні навантаження; геологічне середовище; підземна споруда; невизначеність властивостей, коефіцієнт безпеки.

The ANSYS software package model provides an assessment of changes in the geomechanical process of crater formation during the explosion of a surface charge depending on the change in soil density. The problem of correctness of displaying the geological environment using the ANSYS software package toolkit and taking into account the uncertainty (changeability) of the geological environment parameters to improve the reliability of the results is indicated.

Keywords: ANSYS software; dynamic loads; geological environment; underground structure; uncertainty of properties, safety factor.

Вступ. Дослідження динамічних навантажень і критичних впливів на ґрунтові масиви і підземні споруди отримали особливу актуальність з початком Російсько-української війни, коли питання захисту населення та критичної інфраструктури в підземному просторі набуло державного значення. Відсутність доктрини великої війни сучасною конвенційною зброєю в Європі тривалий час

виключала пріоритетність безпекового (захисного) фактору в планувальних і проєктних рішеннях розвитку міст. Розроблена в КПП ім. Ігоря Сікорського стратегія й методологія планування підземного простору як складової сталого й безпечного розвитку великих міст [1], отримала в останні роки нове прикладне значення – інтенсивного нарощування кількості та якості підземних захисних споруд подвійного призначення [2, 3]. Його розвиток в сучасних умовах потребує більш достовірних і надійних даних щодо захисних властивостей цих споруд, особливо – мілкового закладання.

Поруч із традиційними теоретичними, експериментальними (натурними) та експериментально-аналітичними методами оцінки геомеханічних процесів і підземних конструкцій в останні десятиріччя широко застосовується комп'ютерне моделювання геотехнічних систем на базі Метода скінчених елементів (МСЕ), який широко використовують програмні комплекси (ПК), зокрема: українська ЛІРА, зарубіжні MODEL, ANSYS, Elmer, ELCUT, LS-DYNA, Algor, SolidWorks, Phase-2, PLAXIS, COMSOL, 3D MAX, FEMM, Nastran, Abaqus, Cosmos/M тощо [4]. Кожен з них має певні переваги в межах окремих задач (областей застосування), проте визнаним лідером для моделювання динамічних процесів вважається ПК ANSYS [5]. Обчислення в ANSYS Autodyn (сучасний варіант програмного комплексу) реалізуються через чисельне вирішення системи диференціальних рівнянь у часткових похідних, які описують закон збереження маси, імпульсу та енергії. Завдяки цьому забезпечується точне врахування фізичних закономірностей поширення ударних та детонаційних хвиль, розповсюдження тріщин і деформацій, а також взаємодії середовищ з різними механічними характеристиками. Особливістю Autodyn є підтримка різних розрахункових методів:

Лагранжа – метод для моделювання деформованих твердих тіл з можливістю відстеження геометричних змін сітки;

Ейлера – метод для опису газодинамічних процесів і поведінки продуктів вибуху без деформації сітки;

ALE (Arbitrary Lagrangian-Eulerian) — гібридний метод Лагранжа-Ейлера для задач з великою деформацією або зміною меж матеріалів;

SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics) – метод для моделювання текучих середовищ, які сильно руйнуються або змінюють форму.

Важливою особливістю цього програмного продукту є механізм зв'язку моделей, який дозволяє комбінувати в одній розрахунковій системі декілька методів. Шляхом визначення матеріальних моделей для тіл у заданій системі визначаються залежності між основними фізико-механічними параметрами об'єктів, моделювання навантажень відбувається на основі вирішення рівнянь станів, моделі міцності, моделі руйнування і математичного алгоритму штучної ерозії кінцевих елементів.

Застосовуючи моделі ПК ANSYS у задачах геотехнічної інженерії слід пам'ятати, що однією з відмінних рис цієї науки є те, що інженеру доводиться працювати з природними матеріалами в геологічному середовищі, яке значною

мірою змінюється під дією кліматичних та техногенних факторів і переважно знаходиться поза контролем в часі і просторі. Багато авторів підкреслюють складність коректного відображення властивостей геологічного середовища в моделях, заснованих на методі скінчених елементів (МСЕ), причому відсутність дієвого інструментарію врахування невизначеностей властивостей ґрунтів призводить до обмеження використання результатів моделювання на практиці [4, 6-10]. Спроби врахувати невизначеності імовірнісними методами або методами системного аналізу (оцінка ризиків) торкалися переважно лише статичних моделей [6].

Мета та завдання. Показати діапазон змін геомеханічного процесу утворення воронки в ґрунті від вибуху накладного заряду в залежності від зміни лише одного з параметрів ґрунту (щільності) в моделі ПК ANSYS. Запропонувати підходи щодо врахування невизначеності (змінності) параметрів геологічного середовища для підвищення надійності результатів.

Матеріали і результати досліджень. Поставлена задача вирішувалась моделюванням вибуху накладного заряду на земній поверхні з відстеженням змін утворення воронки в піщаному ґрунті над підземною спорудою. Для моделювання використовували програмний комплекс ANSYS Autodyn. Геометрію тіла зарядів вибухової речовини реалізовано у вигляді циліндрів діаметром 427 мм і висотою 214 мм – для заряду з еквівалентною потужністю 50 кг тротилу (що приблизно дорівнює носійній здатності безпілотного літального апарату (БЛА)). Слід зауважити, що використання в моделі накладного заряду є певною ідеалізацією удару БЛА, оскільки інерційна сила падіння й занурення заряду в ґрунт може додати до енергії руйнування до 15-20 %, які також треба враховувати. Геологічне середовище було представлене піском (зі стандартної бібліотеки ANSYS).

Прийнята модель Granular (Modified Drucker-Prager) – модифікована модель Дукера-Прагера, яка використовується для моделювання механічної поведінки гранульованих і сипучих матеріалів, що є оптимальним для обраного ґрунту (пісок). Модель враховує пластичну деформацію та наростання щільності під дією навантажень.

Основні параметри моделі включали:

Pressure Hardening (зміцнення під тиском) – таблиця залежностей між тиском і пластичною деформацією, дозволяє врахувати зміцнення піску під дією навантаження стискання;

Density Hardening (зміцнення від щільності) – таблиця залежностей між граничною міцністю та зміною густини при ущільненні, що критично важливо для сипучих матеріалів;

Variable Shear Modulus (змінний модуль зсуву) – таблиця залежностей зміни модуля зсуву залежно від щільності, що необхідно для точного опису деформаційної поведінки піску при різному ступені ущільнення;

Shear Modulus (модуль зсуву) = $7,69 \times 10^7$ Па – початковий модуль зсуву, який задає жорсткість матеріалу до початку деформації (це значення характерне для сухих пісків середньої щільності);

Tensile Pressure Failure (руйнування від тиску на розтягання) – модель руйнування на розтяг, яка описується через Maximum Tensile Pressure = -0.001 Па. Це технічний параметр моделі, який дозволяє запобігти нереалістичному розтяганню матеріалу під час розрахунку та видаляє розрахункові елементи, коли вони втрачають контакт;

Compaction EOS Linear (лінійний ефект ущільнення) – рівняння стану ущільнення, яке описує, як пісок реагує на зміну об'єму при стисканні. Рівняння включає:

Solid Density: 2641 кг/м^3 – густина твердого скелету ґрунту без пор;

Compaction Path – таблицю залежності тиску від щільності;

Linear Unloading – залежність швидкості звуку від щільності для опису розвантаження після пікового тиску.

Density (щільність) – базовий параметр розрахункової моделі.

Аналіз параметрів моделі свідчить, що переважна більшість з них пов'язана зі щільністю або її зміненням під дією навантажень, тому оцінка впливу зміни щільності ґрунту буде значною мірою відображати діапазон можливих змін результатів моделювання. Оскільки зміна щільності ґрунту є процесом сталим (під дією природно-кліматичних та техногенних факторів), то аналіз різних варіантів моделювання дасть можливість оцінити вплив невизначеності властивостей ґрунтів на розміри воронки руйнування. Діапазон щільності піску знаходиться в досить широких межах. Для першого варіанту моделі прийнята щільність 1600 кг/м^3 (середня насипна густина важких пісків), що відображає ситуацію будівництва підземної споруди відкритим способом із подальшою засипкою котловану піщаним ґрунтом. Для другого варіанту – 1900 кг/м^3 , що характерно для ущільнення насипного піщаного ґрунту під дією природно-кліматичних або техногенних факторів.

Результати моделювання наведені на рис. 1 (перший варіант) і рис. 2 (другий варіант). На рис. 1 глибина воронки склала близько 4 м, при цьому підземна споруда прямокутного перерізу з товщиною бетонної оправи 300 мм, яка була розміщена на глибині 6 м (від земної поверхні до покрівлі споруди) залишилась неушкодженою. Автори провели моделювання для тих самих умов, але при глибині закладання підземної споруди 3 м і отримали результат часткового руйнування споруди. На рис. 2 глибина воронки склала близько 2,3 м і розміщена на глибині 3 м підземна споруда залишилась без руйнувань. Таким чином зміна щільності ґрунту з 1600 кг/м^3 до 1900 кг/м^3 призвела до зменшення глибини воронки від вибуху накладного заряду масою 50 кг (і тотожних усіх інших параметрів) з 4 м до 2,3 м, при цьому в першому випадку підземна споруда виявилась частково зруйнованою, а в другому – неушкодженою. Тобто помилка у визначенні щільності ґрунту в зазначеному діапазоні може призвести до діаметрально протилежних висновків, щодо захищеності підземної споруди.

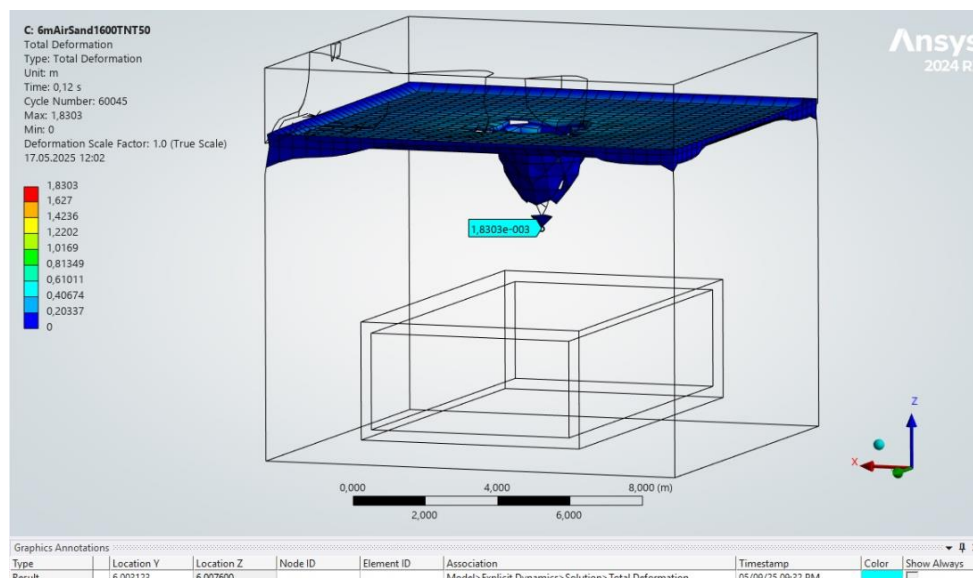


Рисунок 1 – Результати моделювання утворення воронки в піщаному ґрунті щільністю 1600 кг/м³ (глибина воронки – 4 м, глибина закладання підземної споруди 6 м).

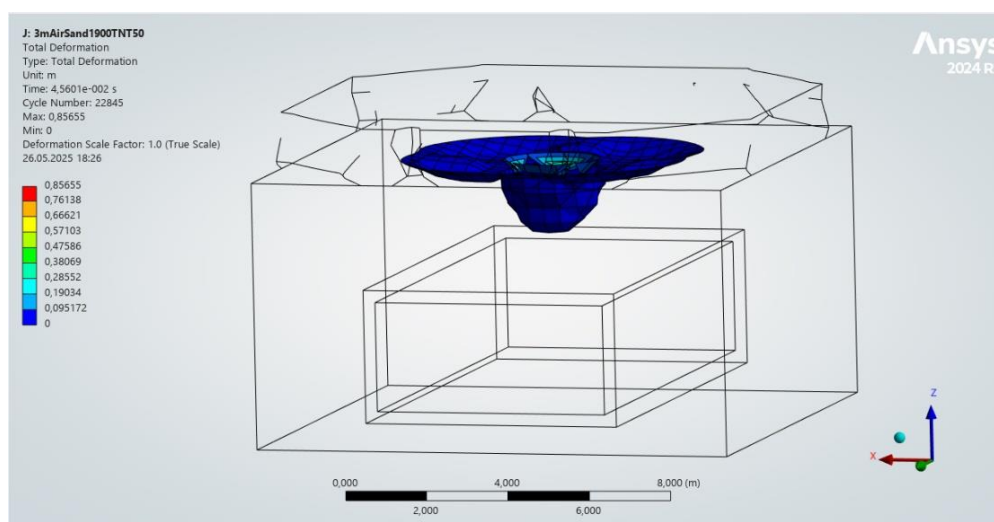


Рисунок 2 – Результати моделювання утворення воронки в піщаному ґрунті щільністю 1900 кг/м³ (глибина воронки – 2,3 м, глибина закладання підземної споруди 3 м).

Оскільки геологічні структури формуються в широкому спектрі складних фізичних умов, історія яких невідома і не завершена, механіка ґрунтів характеризується значними невизначеностями. Тому «одноточкові» величини завдання параметрів у моделі не можуть знайти тотожного відображення в реальних природно-технічних системах. Якщо в параметрах програмного забезпечення для геомеханічних систем не буде місця для врахування невизначеності, будь-які зроблені висновки будуть під сумнівом.

Авторам бачиться перспективним для вирішення зазначеного кола задач оцінки захисних властивостей ґрунтів при дії вибухів на підземні споруди використовувати введене Г.К. Бондариком поняття «поле властивостей»

змінного геологічного середовища. Оскільки щільність ґрунтів у розглянутій моделі є визначальним параметром, то слід розглядати в моделі межі діапазонів можливих змін щільності для умов і локації розміщення об'єкту та приймати рішення по найбільш загрозливому для безпеки об'єкту показнику щільності (у нашому випадку – 1600 кг/м^3).

Висновки. Проведені дослідження свідчать, що неможливо прийняти безпечне рішення лише на основі одного детермінованого комп'ютерного експерименту, якщо профіль ґрунту, поведінка ґрунту, фізика та вплив будівництва не є повністю відомими, не можуть бути точно розраховані в необхідний момент часу. Слід констатувати, що детерміновані рішення, отримані за допомогою МСЕ, не можуть бути безпосередньо застосовані до реального проєкту природничо-технічної системи на конкретному місці без корегування шляхом спеціальної комбінації неформальних стратегій управління ризиками, які повинні включати застосування коефіцієнта безпеки. Для розглянутих моделей і задач доцільно використовувати такий коефіцієнт безпеки, що забезпечить прийняття рішення по найбільш несприятливому для безпеки об'єкту значенню щільності в діапазоні можливих змін інженерно-геологічних умов на місці розміщення об'єкту. При цьому також потрібно зберігати інженерно-експертну оцінку як невід'ємну складову процесу прийняття рішень.

Список використаної літератури

- [1] Панкратова Н.Д., Гайко Г.І., Савченко І.О. (2020). Розвиток підземної урбаністики як системи альтернативних проєктних конфігурацій. Київ: Наукова думка, 134 с.
- [2] Pankratova, N., Haiko, H., Savchenko, I. (2024). Modeling the Underground Infrastructure of Urban Environments. A Systematic Approach. The Urban Book Series, Springer, 256 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-031-47522-1>
- [3] Гайко Г. І., Ган А. Л., Вапнічна В. В., Матвійчук І. О. Аналіз прогресивних конструктивних рішень підземних споруд цивільного захисту. Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика, 2024, No 26. – С. 31-40. <http://btrp.diit.edu.ua/issue/view/18555>
- [4] Півняк Г.Г., Шашенко О.М., Сдвижкова О.О. та ін. (2009). Моделювання геотехнічних систем: монографія. Дніпро: Нац. гірн. ун-т, 247 с.
- [5] ANSYS Help. Електронний ресурс: https://ansyshelp.ansys.com/public/account/secured?returnurl=/Views/Secured/main_page.html?hl=1
- [6] Kok-Kwang Phoon, Zi-Jun Cao, Jian Ji and others. (2022). Jianye Ching Geotechnical uncertainty, modeling, and decision making. Soils and Foundations. Volume 62, Issue 5. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2022.101189>
- [7] Aladejare, A.E. and Wang, Y. (2017). Evaluation of rock property variability. Georisk: Assessment and Management of Risk for Engineered Systems and Geohazards, 11(1), 22–41.
- [8] S.L. Barbour, J. Krahn. (2004). Numerical modelling – prediction or process? Geotechnical News, pp. 44-52.
- [9] B. Cami, S. Javankhoshdell, K.K. Phoon, J. Ching. (2020). Scale of fluctuation for spatially varying soils: estimation methods and values. ASCE-ASME Journal of Risk and Uncertainty in Engineering Systems, Part A: Civil Engineering, 6 (4) (2020), p. 03120002.
- [10] J. Ching, K.K. Phoon, Y.H. Ho, M.C. Weng. (2021). Quasi-site-specific prediction for deformation modulus of rock mass. Canadian Geotechnical Journal, 58 (7), pp. 936-951.

УДК 622.3

Л.В. Шайдецька, к.т.н., доцент,
Нігар Шукурлю, студентка,
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Україна

ПЕРСПЕКТИВИ ТА ОСОБЛИВОСТІ ВИДОБУВАННЯ АЛУНІТОВИХ РУД

Проведено аналіз перспектив розвитку видобування алунітових руд на прикладі Зайлікського родовища алуніту в Дашкесанському районі, Азербайджанська Республіка, визначено економічну та технологічну ефективності їх використання, а також оцінка потенціалу даного виду сировини як альтернативного джерела алюмінію.

Ключові слова: алунітові руди, сталий розвиток, гірничодобувна промисловість, геологічні особливості.

An analysis of the prospects for the development of alunite ore mining is carried out on the example of the Zaylik alunite deposit in the Dashkasan district, Azerbaijan Republic, the economic and technological efficiency of their use is determined, as well as an assessment of the potential of this type of raw material as an alternative source of aluminum.

Keywords: Alunite ores, sustainable development, mining, geological features.

Вступ. Розробка родовищ алунітових руд має особливе значення в умовах зростання попиту на алюміній та пошуку альтернативних джерел цієї сировини. Бокситові родовища, що традиційно є основним джерелом алюмінію, поступово виснажуються, а екологічні обмеження на їх розробку стають все жорсткішими. Тому алунітові руди можуть стати перспективною альтернативою, особливо в регіонах, де існують значні запаси алунітів.

Враховувати технологічні інновації, які дозволяють знижувати витрати на переробку алунітової руди та підвищувати її економічну ефективність, а також екологічні аспекти – використання алуніту в косметології та очищенні води демонструє його багатофункціональність. Таким чином розробка нових методів видобування алунітових руд є актуальним як з точки зору ресурсозбереження, так і технологічного та економічного розвитку.

Метою дослідження є аналіз перспектив розвитку видобування алунітових руд, визначення економічної та технологічної ефективності їх використання, а також оцінка потенціалу даного виду сировини як альтернативного джерела алюмінію. Основними завданнями дослідження є оцінити геологічні запаси та доступність алунітових родовищ, а також виявити можливості розширення застосування алуніту у промисловості та косметології.

Матеріали та результати досліджень. Родовища алунітових руд пов'язані з областями вияву молодого вулканізму, де зазвичай локалізуються серед туфогенних порід. Найбільші запаси алунітових руд зосереджені в Китаї та

Азербайджані. Алунітові родовища відомі в Дашкесанському, Шамхорському і Ордубадському районах. Найвідоміше родовище - Заглікське, приурочене до вулканогенно-осадових товщ середньої і верхньої юри, прорваних Дашкесанським інтрузивом. Заглікське родовище, руда якого перероблялася на Кировабадському алюмінієвому заводі. Вміст алуніту в руді – не більше 55 %, останнє - кварц і каолінит (рис.1).



Рисунок 1 – Алунітове родовище в Дашкесанському районі, Азербайджанська Республіка

Хімічний склад заглікської руди %: 22 – Al_2O_3 ; 22 – SO_3 ; R_2O (у перерахунку на Na_2O) – 8; 40 – SiO_2 . Алуніт асоціює з каолінітом, кварцом, гематитом, лімонітом, халцедоном, опалом тощо. Бортівий вміст алуніту 25%. Потужність пластовидібних покладів 20 м, 95% – рудна маса (алуніт і кварц), 5% – глинисті мінерали. Вияви бокситів виявлені в Нахичеванській області – в теригенно-карбонатних відкладах девону-пермі у вигляді тіл пластової та лінзовидної форми, потужністю 2-13 м і протяжністю 1,5-2 км. Кременевий модуль типу 2:1 (аліти і сіаліти) [1].

Алунітова порода (рис. 2), утворюється в результаті метасоматичних процесів у вулканічних туфах та інших кислих породах під дією гарячих сульфатних розчинів, належить до класу сульфатів $KAl_3(SO_4)_2(OH)_6$. До складу алунітової породи входять мінерали: алуніт ($KAl_3(SO_4)_2(OH)_6$) який є основним мінералом та визначає властивості породи, кварц (SiO_2) – надає породі високу твердість і стійкість, опал – аморфна форма діоксиду кремнію, що ускладнює процес збагачення, барит ($BaSO_4$) – сульфат барію, що іноді трапляється як домішка, гіпс ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) – може бути присутнім у невеликих кількостях, галлуазит і каолінит – алюмосилікати, які утворюються як супутні мінерали, гематит (Fe_2O_3) – оксид заліза, що впливає на колір і фізичні властивості гірської породи [2].



Рисунок 2 – Різновиди алунітів

Світові запаси алунітових руд оцінюються як значні, проте їх розробка залежить від економічної доцільності та технологічних можливостей.

Зайлікське родовище алуніту в Дашкесанському районі, Азербайджанська Республіка, визнані у всьому світі як такі, що мають найбільші поклади алунітів, є сировиною для отримання алюмінію в алюмінієвій промисловості, а також для отримання сірчаної кислоти (рис.3) [3].



а)



б)

Рисунок 3 – Алунітове родовище в Дашкесанському районі, Азербайджанська Республіка: а – особливості рельєфу родовища; б – зразки породи

Водночас, надзвичайно вигідним з економічної точки зору може стати отримання з видобутого алуніту на наступних етапах його переробки сульфату калію, який використовується в сільському господарстві як добриво, а також елементарної сірки та інших речовин, що використовуються в хімії та медицині.

Для видобування алунітових руд можуть використовуватися, в залежності від інженерно-геологічних умов відкритий (кар'єрний) спосіб, який застосовується при неглибокому заляганні родовищ, та підземний (шахтний) спосіб – використовується для глибоких родовищ. Видобуток здійснюється буровибуховими роботами або спеціальними машинами, що ріжуть породу.

Гідрометалургійний метод – видобуток із застосуванням кислотного або лужного розчину. Він допомагає вилучити алюміній та інші компоненти алунітової руди.

Підземне вилуговування – сучасна технологія, при якій реагенти вводяться у рудний масив, а корисні компоненти вилучаються розчинами без необхідності традиційного видобутку. Алуніти мають широке застосування в різних галузях промисловості завдяки вмісту алюмінію, калію та сульфатів. Основні напрями їх використання наведені в табл. 1 та на рис. 4.

Таблиця 1 – Сфера застосування алунітових руд відповідно до галузі

Галузь	Сфера застосування
Металургія	Використовується як джерело алюмінію для виробництва глинозему
	Використовується у виробництві алюмінієвих сплавів
Хімічна промисловість	Виготовлення сірчаної кислоти, яка є важливим компонентом у багатьох промислових процесах
	Використовується для отримання калійних добрив
Будівельна промисловість	Виготовлення цементу та інших будівельних матеріалів, що мають високу міцність і стійкість до агресивного середовища
Керамічна промисловість	Використовується у виробництві спеціальної кераміки та вогнетривких матеріалів
Енергетика	Може застосовуватися у виробництві термостійких ізоляційних матеріалів
Екологічні технології	Очищення води та нейтралізація кислотних стоків у промислових процесах
	Переробка відходів гірничої промисловості
Косметична та медична сфера	Деякі форми алуніту використовуються у виготовленні антисептичних засобів та косметичних продуктів (наприклад, мінеральні дезодоранти)
Сільське господарство	Виготовлення мінеральних добрив для поліпшення родючості ґрунтів
	Використовується в захисті рослин від шкідників та захворювань

Завдяки своїм унікальним фізико-хімічним властивостям алуніти є перспективним матеріалом для різних сфер промисловості, і їх застосування продовжує розширюватися.



Рисунок 4 – Галузі застосування алунітових руд

Висновки:

1. Вивчення та оцінка різних типів родовищ алуніту, особливо у вулканічних поясах, є одними з найактуальніших питань розширення мінерально-сировинної бази.

2. Оцінка алунітового рудника Зайлик, використання алуніту як сировини у виробництві алюмінію залежно від результатів техніко-економічного обґрунтування, та загалом комплексний розвиток алюмінієвої промисловості, займають важливе місце серед запланованих проектів Азейбаржану.

3. Аналіз геологічних матеріалів підтверджує, що походження та характер поширення глибоких тектонічних розломів має значення в розвитку геологічних, включаючи вулcano-плутонічні, метаморфічні процеси та пов'язаного з ними розвитку руд. Наразі на території Республіки відомі десятки оцінених та розвіданих золотоносних родовищ. Найбільша кількість корінних родовищ розташована в Малокавказькій частині Республіки.

Список використаної літератури

[1] Алуніт. Властивості, родовища і перспективи використання // Інститут геології. URL: <https://insgeo.com.ua/alunit/> (дата звернення: 10.05.2025).

[2] Алюмінієві руди // Велика українська енциклопедія. URL: [https://vue.gov.ua/Алюмінієві руди](https://vue.gov.ua/Алюмінієві_руди) (дата звернення: 12.05.2025).

[3] Tagiev I. I., Paşayev N. V., Karimov V. M., Volcanic and fault-fractured ore-controlling structures and minerals of the Azerbaijan part of the Lesser Caucasus // Journ. Geol. Geograph. Geology, 30(3), 581–588. [Електронний ресурс]. Доступно за посиланням: https://www.dnu.dp.ua/docs/visnik/fgg/program_6204d126a5307.pdf,

UDC 622.083+721.011

Yurii Zuievskyi, PhD student,
Oksana Vovk, Doctor of Technical Sciences, Professor,
*National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute",
Kyiv, Ukraine*

APPLIED NUMERICAL MODELING OF DEEP EXPLOSIVE CHARGE– SOIL INTERACTION USING ANSYS EXPLICIT DYNAMICS

This study presents an improved numerical model of the interaction between a deep explosive charge and a soil medium under conditions of delayed detonation. The simulation was performed using ANSYS Explicit Dynamics. A hybrid Eulerian–Lagrangian mesh was employed to accurately represent the explosive charge, explosive products, and soil domain. The model simulates the vertical penetration of explosive charge into the ground, followed by detonation after a short delay. Validation was carried out by comparing the simulation results with real-world crater dimensions recorded in the Kyiv region during recent explosive charge attacks. The results demonstrate significant differences between surface and subsurface explosions, emphasizing the higher destructive potential of delayed detonation. The approach contributes to the assessment of underground infrastructure resilience under modern military threats and may support the development of protective design standards.

Keywords: deep explosive charge, explosive loading, soil modeling, delayed detonation, crater formation, ANSYS Explicit Dynamics

Представлена вдосконала чисельна модель взаємодії глибинного заряду вибухової речовини (ВР) з ґрунтовим середовищем в умовах уповільненої детонації. Моделювання проводилося з використанням ANSYS Explicit Dynamics. Для точного моделювання заряду ВР, продуктів вибуху та ґрунтової області використовувалася гібридна Ейлерово-лагранжева сітка. Модель імітує вертикальне проникнення заряду ВР у ґрунт із подальшою детонацією після невеликої затримки. Валідація проводилася шляхом порівняння результатів моделювання з реальними розмірами кратерів, зафіксованими на Київщині під час недавніх вибухів із застосуванням вибухових зарядів. Результати демонструють суттєві відмінності між поверхневими та підземними вибухами, що підкреслює вищий руйнівний потенціал уповільненої детонації. Цей підхід сприяє оцінці стійкості підземної інфраструктури до сучасних військових загроз та може сприяти розробці стандартів проектування захисних споруд.

Ключові слова: глибинний заряд вибухової речовини, вибухове навантаження, моделювання ґрунту, уповільнена детонація, кратероутворення, ANSYS Explicit Dynamics

Introduction. Deep explosive charge attacks on civilian areas in Ukraine have intensified the need to assess the structural stability of underground shelters and infrastructure. Unlike static or cyclic loads, explosive loading produces extreme pressures and shock waves that significantly alter soil behavior. Traditional engineering tools are insufficient for such modeling. Therefore, advanced software like ANSYS Explicit Dynamics is required to simulate real explosive charge–soil interaction scenarios and predict the effects of high-energy detonations on critical subsurface structures [1-5].

Methods and Materials. Numerical modeling was conducted in ANSYS Explicit Dynamics, a simulation tool designed for analyzing fast transient dynamic phenomena such as explosions and high-velocity impacts. To capture the complex interaction between

the explosive charge, explosive products, and surrounding soil, a hybrid Eulerian–Lagrangian mesh was employed. The soil domain was represented using the Lagrangian formulation, while the explosive charge body and detonation gases were modeled using the Eulerian approach [1-5]. This combination enables accurate tracking of both large deformations in the soil and the fluid-like behavior of explosion products.

The simulated explosive charge had a mass of 1500 kg, including 500 kg of TNT, and an initial vertical velocity of 800 m/s. A delayed detonation was modeled with a time lag of 10^{-5} seconds after impact, representing the behavior of modern warheads such as the Russian Iskander and North Korean KN-23, which are designed to penetrate soil before exploding. The detonation process was defined using the Jones–Wilkins–Lee (JWL) equation of state, which characterizes the relationship between pressure, internal energy, and volume for explosive materials under high-speed detonation.

The mechanical behavior of the soil was described using the Drucker–Prager Strength Piecewise model, allowing nonlinear stress-strain behavior to be captured based on pressure-dependent shear strength. Material properties of loess sandy loams with natural saturation were implemented based on experimental data.

To simulate the behavior of an infinite soil medium and eliminate artificial reflections at the boundaries, impedance-based boundary conditions were applied along the lateral and bottom edges of the model. Two detonation scenarios were analyzed: a surface explosion with the charge placed on the soil, and a buried explosion initiated after the explosive charge's penetration. The computational mesh was refined to ensure numerical stability and accuracy, with Eulerian elements half the size of Lagrangian ones.

Results. The simulation results revealed significant differences between surface and subsurface explosions. The surface detonation produced a shallow crater with a maximum equivalent stress in the soil of 9.03×10^8 Pa (Fig. 1).

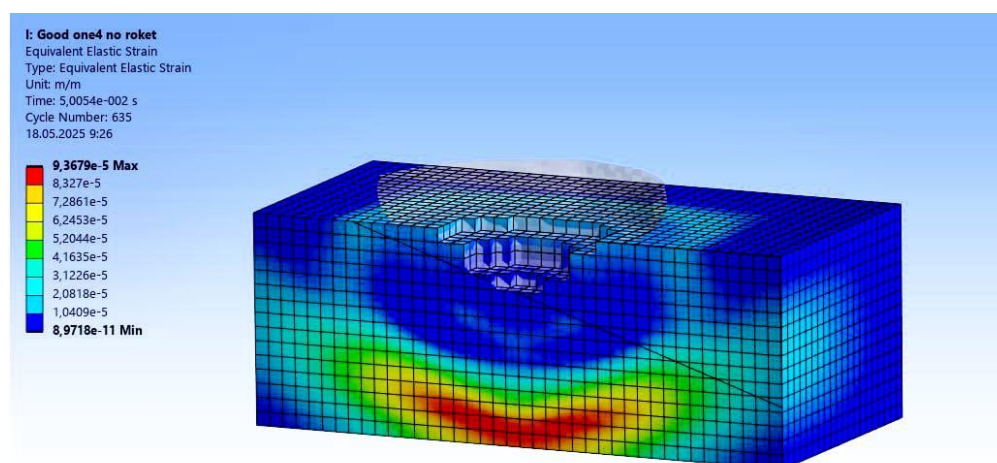


Figure 1 – Cross-sectional view of the crater and the elastic strain state of the soil following the surface detonation of a contact explosive charge

In contrast, the delayed subsurface explosion generated a stepped, deeper crater and reached stress levels three orders of magnitude higher-up to 4.8×10^5 Pa (Fig. 2).

The underground explosion also demonstrated a more concentrated shock wave with a single dominant peak (37% of maximum amplitude), while the surface explosion produced three lower-amplitude peaks. The damping time for shock wave propagation was shorter in the buried explosion scenario (0.0125 s vs. 0.05 s), indicating more intense energy transmission and structural impact (Fig. 3 and Fig. 4). The simulation results closely matched real crater observations in Bucha, confirming the model's adequacy.

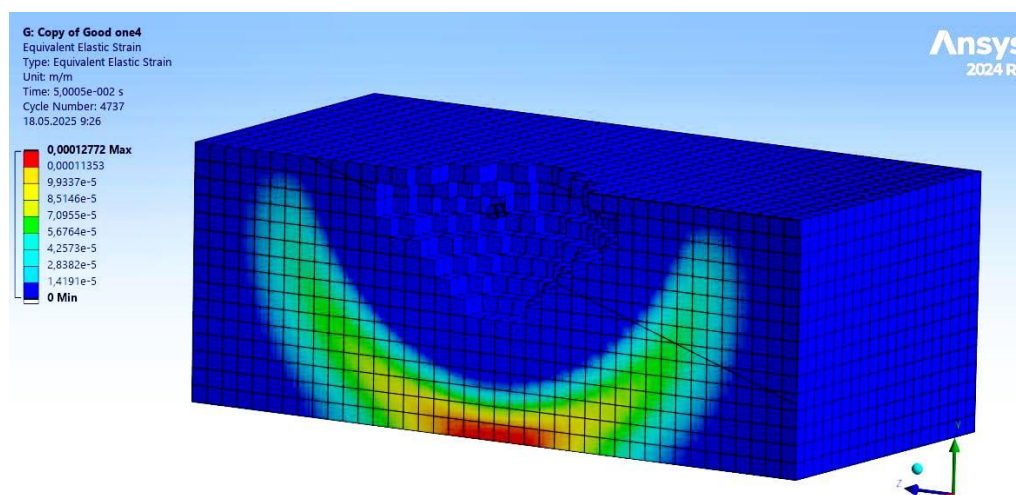


Figure 2 – Cross-sectional view of the crater and the strain state of the soil resulting from a buried explosion after explosive charge impact and penetration into the ground

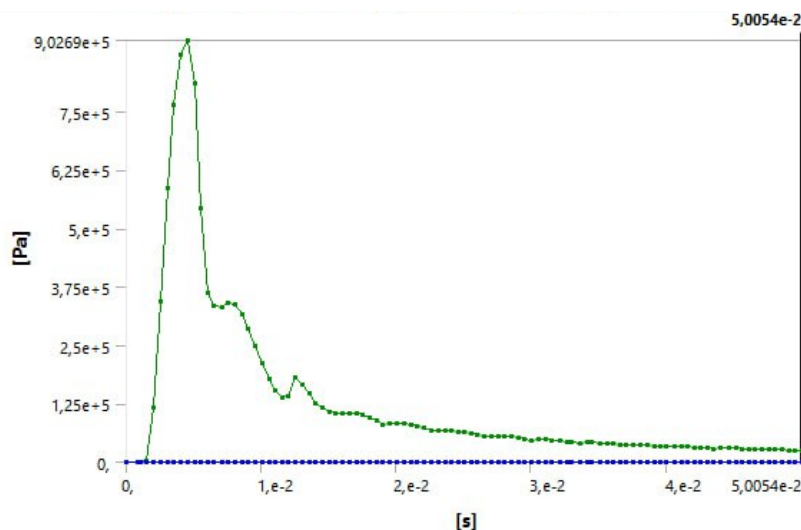


Figure 3 – Time history of von Mises equivalent stress in the soil for the surface charge detonation scenario

The maximum equivalent stress in the soil during a surface explosion is $9.03 \cdot 10^8$ Pa, while during a penetration explosion, the equivalent stress is three orders of magnitude higher, reaching $4.8 \cdot 10^5$ Pa. The detonation wave from the surface explosion exhibits three peaks with relatively low amplitudes of 1.9 % and 5.7 % of the maximum,

whereas the penetration-type explosion has a single peak with an amplitude of 37 % of the maximum. The damping time for the surface explosion is 0.05 seconds, while for the underground explosion it is 0.0125 seconds, indicating different dynamic mechanisms of the process and different soil responses to the explosion. This highlights the significantly greater destructive potential of penetration-type explosions.

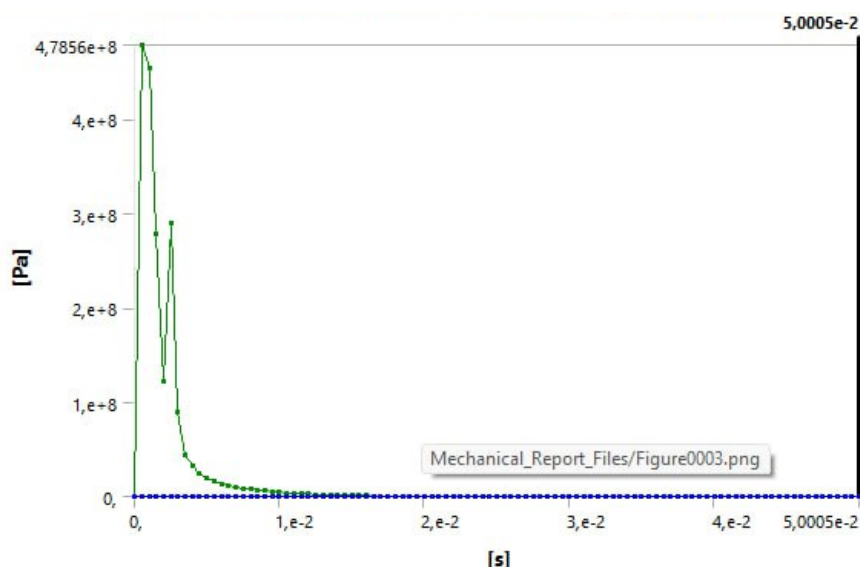


Figure 4 – Time history of von Mises equivalent stress in the soil for the buried explosion scenario involving explosive charge impact and penetration

Conclusions. The study confirms that delayed detonation after explosive charge penetration significantly increases the destructive effect on the soil medium compared to surface explosions. The numerical model developed in ANSYS Explicit Dynamics accurately simulates real-world scenarios involving modern ballistic threats. The findings highlight the need to revise protective design strategies for underground infrastructure, taking into account the deeper, more concentrated damage caused by buried charges. The presented approach can serve as a practical tool for evaluating structural vulnerability and developing civil defense measures under explosive charge threat conditions.

References

- [1] Zuievskia N. et al. Forecasting the Destruction of Shallow Subway Stations by the Action of an Explosion. IOS Press Ebooks, 2024, vol. 157, pp. 28-44.
- [2] Aubram D. et al. An ALE method for penetration into sand utilizing optimization-based mesh motion. Computers and Geotechnics, 2014, vol. 65, pp. 241-249.
- [3] Sunil Kumar K. et al. Explicit dynamic simulations on high explosive systems. AIP Conf. Proc., 2024, vol. 2835, 020016.
- [4] An J. et al. Simulation of soil behavior under blast loading. Int. J. Geomech., 2011, vol. 11(4), pp. 323-334.
- [5] Jiang H., Xie Y. A note on the Mohr–Coulomb and Drucker–Prager strength criteria. Mech. Res. Commun., 2011, vol. 38, pp. 309-314.

Polad Hajiyev, PhD student,
Elnur Shukurlu, PhD student,
Natalia Zuievskaya, Doctor of Technical Sciences, Professor,
*National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»,
Kyiv, Ukraine*

USING THE WIPFRAG IMAGE ANALYSIS SYSTEM TO EVALUATE THE QUALITY OF EXPLOSIVE ROCK FRAGMENTATION

The effectiveness of blasting operations in surface mining critically depends on the quality of rock fragmentation, which directly influences the performance of excavation, loading, transport, and crushing processes. This study presents a practical approach to optimizing blast performance in gold-bearing quartzite quarries by integrating digital fracture mapping, adaptive borehole patterning, and image-based fragmentation assessment.

Keywords: *blasting optimization, rock fragmentation, fracture intensity, borehole pattern, granulometric analysis, WipFrag, quarry, open-pit mining*

Ефективність вибухових робіт на відкритих гірничих роботах критично залежить від якості руйнування гірських порід, що безпосередньо впливає на продуктивність процесів виїмки, навантаження, транспортування та дроблення. У цьому дослідженні представлений практичний підхід до оптимізації ефективності вибухових робіт на золотоносних кварцитових кар'єрах шляхом інтеграції цифрового картування тріщинуватості, адаптивного розташування свердловин та оцінки фрагментації на основі зображень.

Ключові слова: *оптимізація вибухових робіт, фрагментація гірських порід, інтенсивність тріщинуватості, розташування свердловин, гранулометричний аналіз, WipFrag, кар'єр, відкритий видобуток*

Introduction. Efficient rock fragmentation is essential for achieving low-cost and high-throughput operations in open-pit mines. The quality of a blast is evaluated by parameters such as fragmentation size distribution, muck pile geometry, and bench floor conditions. These characteristics determine the efficiency of subsequent loading, hauling, and crushing stages. However, excessive oversize and uneven particle sizes remain common, particularly in heterogeneous ore bodies or structurally complex rock masses.

Modern crushing and sorting equipment imposes stringent demands on the size of blasted material. For instance, the allowable oversize content should not exceed 5%, and the average rock fragment size must match the inlet capacity of crushers and transport systems. Despite significant advancements in blasting technology, conventional design methods often fail to account for in-situ rock mass variability, particularly natural jointing and blockiness.

Methodology and Data Collection. This research was conducted at the Tulallar gold-quartz deposit, characterized by complex morphology and heterogeneous fracturing. A GIS-based fracture analysis was performed using in-situ structural measurements. The data were used to generate fracture intensity zoning maps, based on specific fracture density (fractures per meter).

Instead of applying a traditional uniform diagonal drilling grid, a zonal drilling scheme was developed. Borehole spacing and delay sequences were adjusted according to local fracture categories. This modification aimed to reduce drilling costs and improve blast energy distribution.

Experimental blasts were conducted using different borehole spacings, charge configurations, and inter-row delay timings. Four critical parameters were varied: Natural fracture intensity; Borehole spacing; Inter-row delay interval; Charge geometry and stemming material.

The resulting rock fragmentation was documented using high-resolution field photography (Fig. 1) and processed via WipFrag software for granulometric analysis (Fig. 2). Oversized fragments were defined as those exceeding 60 mm, based on crusher design specifications.



Figure 1 – Field photo analysis of rock fragmentation using tablet-based image capture

Results and Discussion. The adapted borehole grid resulted in: A 6% reduction in total drilling volume; Better alignment of energy distribution with geological structure; Noticeable improvement in fragmentation uniformity; Reduced oversize content by up to 15% in comparison to control blocks.

The granulometric analysis indicated a shift in average fragment size toward optimal values, with an increased fragmentation homogeneity index (Fig. 3). The particle size classes are color-coded according to granulometric ranges using digital photo analysis. Zones with high natural jointing benefited most from reduced borehole density, while tighter patterns were retained in more competent rock zones.

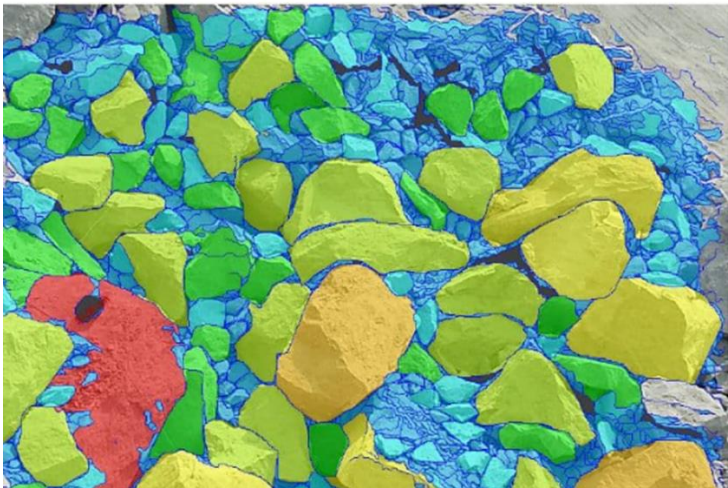
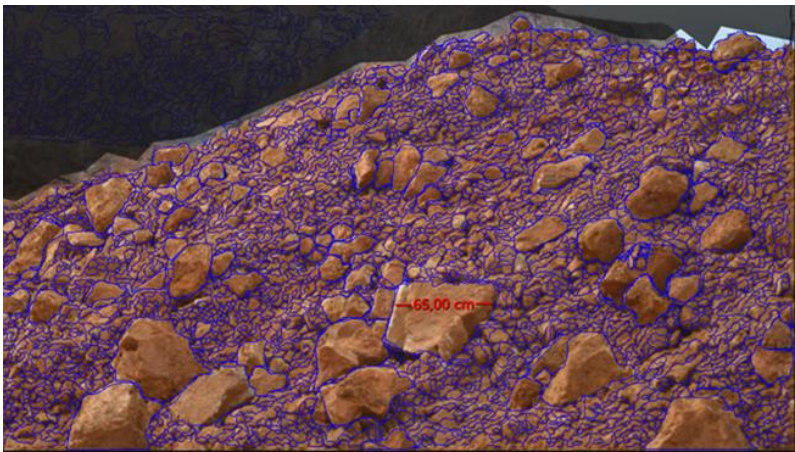
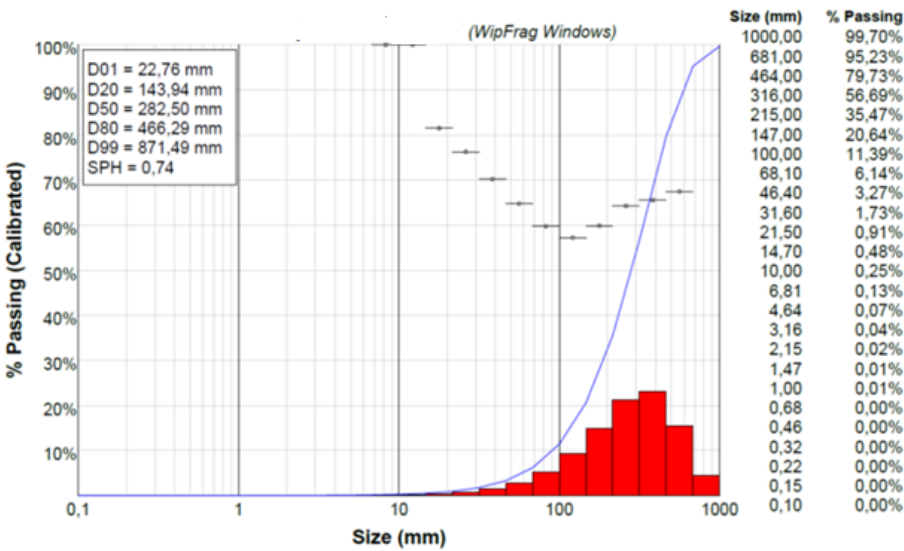


Figure 2 – Fragmentation analysis of the blasted rock mass based on image segmentation.



a)



b)

Figure 3 – Analysis of the granulometric distribution of the blasted rock mass: a) – Photo of the blasting site; b) – Image processing based on the selected reference scale;.

Additionally, it was confirmed that fracture-informed drilling significantly reduced the frequency of re-blasting operations due to excessive boulder formation, which is especially valuable for cost and time-sensitive operations such as gold ore extraction.

Conclusion. The findings highlight the importance of incorporating real-time geological variability into blast design. By coupling fracture intensity mapping with adaptive drilling patterns, it is possible to significantly enhance the efficiency of blasting operations.

The use of modern tools like WipFrag and GIS-based zoning enables faster feedback loops and data-driven decision-making in the field. While current blast design software often overlooks microstructural rock features, this study demonstrates that their inclusion leads to measurable improvements in productivity and reduction of operational costs.

Future work will focus on real-time fragmentation monitoring with UAV-based imaging and automated mesh processing to further optimize blasting strategies.

References

- [1] Sobolevskiy, R., Zuievskaya, N., Korobiichuk, V., Tolkach, O., Kotenko, V.: Cluster analysis of fracturing in the deposits of decorative stone for the optimization of the process of quality control of block raw material. *East. Eur. J. Enterp. Technol.* 5(3–83), 21–29 (2016).
<https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.80652>
- [2] Zuievskaya, N., Kryvoruchko, A., Shaidetska, L., Shukurlu, E. (2024). The Use of GIS to Improve the Parameters of Gold-Bearing Quartzite Extraction Technology. In: Shukurov, A., Vovk, O., Zaporozhets, A., Zuievskaya, N. (eds) *Geomining. Studies in Systems, Decision and Control*, vol 224. Springer, Cham.
https://doi.org/10.1007/978-3-031-70725-4_10
- [3] Зуєвська, Н. В., Косенко, Т. В., Шукюрлю, Е., & Коробійчук, В. В. (2024). Оцінка фракційності мінералів з використанням геоінформаційних систем в інженерно-геологічних вишукуваннях. *Технічна інженерія*, (1(93)), 332–338.
[https://doi.org/10.26642/ten-2024-1\(93\)-332-338](https://doi.org/10.26642/ten-2024-1(93)-332-338)
- [4] Korobiichuk, V., Temchenko, A., Zuievskaya, N., Temchenko, O. (2024). Determination of the Impact of Methods and Schemes for Opening a Deposit and Individual Quarry Horizons on the Efficiency of Open-Pit Mining Technology. In: Shukurov, A., Vovk, O., Zaporozhets, A., Zuievskaya, N. (eds) *Geomining. Studies in Systems, Decision and Control*, vol 224. Springer, Cham.
https://doi.org/10.1007/978-3-031-70725-4_3

СЕКЦІЯ 2. ТЕХНОЛОГІЇ ЗАХИСТУ ДОВКІЛЛЯ ТА ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ

UDC 504.03:004.8

O. Kofanova, Doctor of Pedagogical Sciences, Ph.D. in Chemistry, Professor,
O. Kofanov, Ph.D. in Economics, Ph.D. in Engineering Sciences, Associate Professor,
National Technical University of Ukraine 'Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute', Ukraine

ENHANCEMENT OF THE COUNTRY'S ENERGY SAFETY THROUGH THE TRANSITION TO ENVIRONMENTALLY FRIENDLY BIOFUELS AND AI-BASED SOLUTIONS

Розроблено концептуальну модель посилення енергетичної безпеки України шляхом переходу до екологічно чистих біопалив і впровадження рішення на основі штучного інтелекту для оцінки екологічності стартапів.

Ключові слова: енергетична безпека, біопаливо, штучний інтелект, стартапи, сталий розвиток, зелена економіка, оцінка екологічності.

A conceptual framework is developed to enhance Ukraine's energy safety via biofuels and the implementation of the authors' AI tool for sustainability assessment of high-tech and deep-tech innovative startups.

Keywords: energy safety, biofuels, artificial intelligence, startups, sustainability, circular economy, eco-assessment.

Introduction. In the face of growing crisis events of natural and anthropogenic origin, climate change, and energy dependence on fossil fuels, the issue of national energy security becomes critical. Ukraine, possessing a significant potential for the use of raw materials of biological origin, has a strategic opportunity to enhance its energy autonomy by shifting to environmentally friendly biofuels. At the same time, rapid advancements in artificial intelligence (AI) offer new ways for optimizing the production, distribution, and consumption of alternative energy sources.

The purpose and objectives. Thus, the study aims to outline a conceptual framework for strengthening the country's energy safety by combining the transition to biofuels with the authors' AI-driven solution.

Materials and research results. Energy safety and security covers the entire spectrum of national resilience – from stable infrastructure to affordability, sustainability, and independence from external geopolitical risks. For Ukraine, the damage to particular energy assets, disruption of logistics chains, and threats to critical infrastructure expose systemic vulnerabilities. According to international assessments, the diversification of energy sources and the development of decentralized, renewable-based energy systems represent one of the key priorities for future state resilience.

Environmentally friendly biofuels, such as biogas, biodiesel, and bioethanol, offer a lot of eco-centered advantages – unlike fossil fuels, they result in a closed carbon cycle and significantly lower greenhouse gas emissions. In particular, the use of second-generation biofuels can reduce emissions by over 80 % compared to conventional fuels.

So, the role of biofuels as a decentralized, renewable, and climate-neutral energy source makes them a strategic pillar in Ukraine's green recovery.

Artificial intelligence and data science applications can support the energy transition in multiple ways. First, predictive analytics enables accurate demand forecasting, which is crucial for planning biofuel production and storage. Second, AI-based optimization algorithms can maximize energy output from available biomass resources by dynamically adjusting process parameters based on real-time data. In smart energy grids, AI facilitates real-time load balancing between biofuel generators and consumer nodes, thereby increasing reliability. AI systems can also monitor infrastructure using computer vision and sensor data, detecting anomalies and scheduling preventive maintenance. Furthermore, natural language processing and AI-driven stakeholder platforms can streamline decision-making among policymakers, investors, and producers by simulating the impact of regulatory changes or investment scenarios.

As part of the proposed model for strengthening Ukraine's energy security, a key role is played by the development of the authors' environmentally safe and resource-efficient technology for producing biodiesel fuel from waste vegetable oils and animal fats. This innovative method transforms waste into a valuable energy resource, aligning with circular economy principles and contributing to decarbonization. The technological process is considered in detail in [1, 2]. This approach represents a sustainable alternative to conventional fossil-based fuels and demonstrates how effective waste management can contribute to both energy security and climate resilience.

In the context of developing environmentally safe technologies such as innovative biodiesel production from waste feedstocks, it is critical to ensure that such solutions are ecologically validated and aligned with circular economy principles from their earliest stages. This is where our cutting-edge AI startup can be implemented. Our solution offers a powerful decision-support platform for high-tech and deep-tech startup teams, enabling them to quickly and accurately evaluate the ecological friendliness and sustainability potential of their projects, without the need for complex expertise in environmental science or lifecycle assessment.

The uniqueness of our AI-powered service lies in its ability to perform a structured sustainability assessment using a hybrid model that combines generative artificial intelligence and Saaty's Analytic Hierarchy Process (AHP) [3]. This dual-core methodology allows our algorithm to:

- 1) interpret the startup's idea description using a structured input framework (Business Model Canvas, Job to Be Done, etc.);
- 2) assign intelligent priority weights across a customizable multi-criteria AHP hierarchy related to ecological impact, circularity, emissions, and social risks;
- 3) deliver a transparent and reproducible decision: 'Eco-friendly – proceed' or 'Not eco-friendly – pivot', encouraging better design choices and early course correction.

The solution is particularly relevant in sectors like green energy, biofuels, and waste-to-resource technologies, where founders need to justify the sustainability of their innovation, not only to regulators but also to investors and environmentally conscious customers. For instance, a startup working on a unique biodiesel synthesis

technology from waste oils and animal fats could use this AI tool to validate the approach across criteria such as feedstock circularity, energy efficiency, greenhouse gas emissions, and waste management.

The impact of the proposed solution is threefold:

- 1) integrating circular economy principles from the ideation phase of technological innovations;
- 2) enhancing the eco-positive image of startups, improving product-market fit in sustainability-driven economies;
- 3) fostering long-term business resilience, including reduced environmental liabilities and improved access to green financing.

Given that fewer than 10 % of startups succeed, and that demand today is increasingly driven by ecological credibility, our solution addresses a mission-critical bottleneck. The global context is highly favorable too: over 50 million new ventures are launched annually, with AI applications in sustainability projected to exceed \$10 billion in investment by 2026 and \$297 billion in global AI software spending by 2027 [4].

Conclusions. The transition to environmentally friendly biofuels, combined with advanced AI-driven solutions, presents a viable and strategic pathway for strengthening Ukraine's energy security. Biofuels offer clear ecological advantages, including reduced greenhouse gas emissions and enhanced sustainability, while contributing to the diversification and decentralization of the national energy system. Their integration into Ukraine's energy system reduces dependence on imported fossil fuels and aligns with global climate commitments. Artificial intelligence technologies significantly amplify the potential of this transition – the union between AI applications and biofuel innovations opens new opportunities for national resilience, environmental responsibility, and economic competitiveness. The proposed authors' AI-powered startup introduces a novel approach to assessing the ecological viability of startup innovations, ensuring early alignment with circular economy principles and increasing the chances of long-term success in green markets.

References

- [1] О. В. Кофанова та О. Є. Кофанов, «Валеологічні аспекти заміни вуглеводневого дизельного палива на біодизель», *Зб. наук. праць Вінницького нац. аграр. ун-ту. Серія.: Технічні науки*, вип. 1(89), т. 1, с. 144–148, 2015. (укр.)
- [2] O. Kofanov, O. Kofanova, O. Vasylykevych, O. Zozul'ov, Yu. Kholkovsky, V. Khrutba, O. Borysov, and O. Bobryshov, "Mitigation of the environmental risks resulting from diesel vehicle operation at the mining industry enterprises," *Mining of Mineral Deposits*, vol. 14, no. 2, pp. 110–118, 2020, doi: 10.33271/mining14.02.110.
- [3] O. Kofanov, O. Kofanova, K. Tkachuk, O. Tverda, and I. Shostak, "Enhancement of the market attractiveness and success of startups on the circular economy and sustainability principles," *Agricultural and Resource Economics*, vol. 10, no. 2, pp. 167–189, 2024, doi: 10.51599/are.2024.10.02.07.
- [4] *10 Strategic Data and Analytics Predictions Through 2028*. Gartner: веб-сайт. [Онлайн]. Доступно: <https://www.gartner.com/en/articles/gartner-strategic-data-and-analytics-predictions-through-2028> (дата звернення: 14.03.2025).

УДК 504.05:622.271:656.2

Н.П. Кириленко, асистент,
І.Г. Пацева, д.т.н., професор,
Л.О. Герасимчук, канд. с.-г. наук, доцент
Державний університет «Житомирська політехніка», Україна

ЦИФРОВІ РІШЕННЯ ДЛЯ ЗНИЖЕННЯ ЕКОЛОГІЧНОГО НАВАНТАЖЕННЯ ВІД ТРАНСПОРТНИХ ОПЕРАЦІЙ НА КАР'ЄРАХ БЛОЧНОГО КАМЕНЮ

Розроблено цифрову модель для вибору типу транспортування кам'яних блоків у кар'єрі з урахуванням витрат пального з метою скорочення собівартості транспортних операцій та викидів CO₂, NO_x, SO₂.

Ключові слова: цифрове моделювання, кар'єр, екологічне навантаження, паливо, самоскид, навантажувач.

A digital model was developed to select the optimal transport type for hauling stone blocks in a quarry, considering fuel consumption to reduce transportation costs and emissions of CO₂, NO_x, and SO₂.

Keywords: digital modeling, quarry, environmental impact, fuel, dump truck, wheel loader.

Вступ. У видобувній промисловості транспортування блоків займає 45–65 % собівартості продукції. Особливої актуальності набуває пошук рішень, які дозволяють зменшити витрати пального та скоротити викиди шкідливих речовин при перевезенні. У цьому контексті зростає попит на цифрові інструменти, які забезпечують гнучке, оперативне та екологічно обґрунтоване планування транспортних процесів.

Створення цифрових моделей відкриває нові можливості для прийняття управлінських рішень з урахуванням екологічного чинника відповідно до вимог законодавства Європейського Союзу у сфері охорони довкілля, а також ключових положень Європейської Зеленої Угоди (European Green Deal). Це набуває особливого значення для України в умовах імплементації *acquis communautaire*, виконання екологічних директив ЄС і адаптації національної системи регулювання до стандартів сталого розвитку, що є обов'язковою умовою євроінтеграції [1-3].

Традиційні підходи до вибору транспорту в кар'єрах, як правило, не враховують реальні дорожні умови, сезонні фактори, геометрію блоків та рівень викидів, що може призводити до перевитрат ресурсів і недооцінки екологічних наслідків. Натомість використання цифрового моделювання дозволяє проаналізувати декілька логістичних сценаріїв та обрати найбільш ефективний з точки зору не лише економіки, а й екологічної безпеки.

Особливої актуальності це набуває для малих і середніх підприємств, які не мають доступу до дорогих комерційних систем диспетчеризації, але прагнуть відповідати сучасним екологічним вимогам та мінімізувати вуглецевий слід своєї діяльності. Таким чином, впровадження доступних цифрових рішень у

транспортні операції кар'єрів блочного каменю сприяє не лише зниженню витрат, а й підвищенню екологічної відповідальності гірничих підприємств відповідно до принципів сталого розвитку.

Метою дослідження є розроблення цифрової моделі для обґрунтованого вибору типу транспортування блоків облицювального каменю у кар'єрі з урахуванням витрат пального, логістичних параметрів та обсягів викидів CO₂, NO_x, SO₂ і твердих частинок, що дозволяє підвищити екологічну та економічну ефективність виробництва.

Для досягнення мети були поставлені такі **завдання**:

1. Проаналізувати особливості транспортних операцій у кар'єрах блочного каменю з урахуванням геометрії блоків, умов доріг та технічного парку підприємства.

2. Побудувати математичну модель, яка враховує витрати пального, тривалість циклу, ухил, тип транспорту, технічні коефіцієнти, а також екологічні параметри.

3. Реалізувати модель у середовищі Google Colab з інтеграцією Google Sheets для забезпечення доступності в умовах реального виробництва.

4. Забезпечити автоматизовану перевірку відповідності габаритів блоків геометрії кузова транспорту та формування оптимальної схеми укладки.

5. Розрахувати та порівняти собівартість перевезення і обсяги забруднюючих викидів за різними логістичними сценаріями (навантажувач та самоскид).

6. Запропонувати практичні рекомендації для малих і середніх підприємств щодо оптимізації транспортних рішень відповідно до екологічних директив європейського союзу ЄС (директиви 2010/75/ЄС, 2008/50/ЄС, Zero Pollution Action Plan).

Матеріали та результати досліджень. Дослідження виконано на прикладі Південної ділянки Межирічського родовища, де здійснюється видобуток і транспортування блоків облицювального граніту. Щотижневий обсяг видобутої гірської маси становить близько 160 м³, з яких лише 20–30 % — це товарні блоки. Для моделювання використовувались технічні параметри фронтального навантажувача CAT 980H та автосамоскида КрАЗ-65055.

Розроблена цифрова модель дозволяє порівнювати логістичні сценарії транспортування з урахуванням таких параметрів, як геометрія блоків, відстань та ухил дороги, коефіцієнти зчеплення та надійності, витрати пального, заробітна плата персоналу, викиди CO₂, NO_x, SO₂ та PM.

Модель реалізовано в середовищі Google Colab з інтеграцією Google Sheets, що забезпечує можливість введення змінних у польових умовах. Впроваджено алгоритм автоматичного розрахунку розміщення блоків у кузові самоскида, визначення тривалості циклу, витрат на 1 м³ продукції та рівня екологічного навантаження (рис. 1).

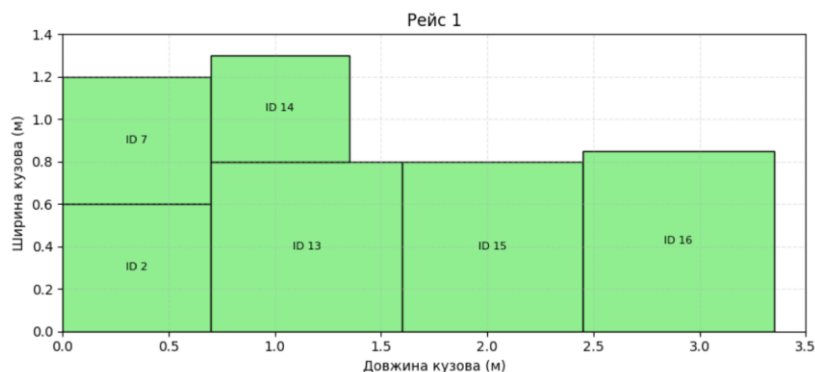


Рисунок 1 – Схема розміщення блоків у кузові самоскида (згенеровано в Google Colab)

Отримані результати моделювання свідчать про суттєве зниження витрат пального та собівартості перевезення, а також скорочення викидів шкідливих речовин за рахунок адаптивного вибору техніки. Детальні значення представлено в таблиці 1 та на рисунку 2.

Таблиця 1 – Динаміка змін основних забруднюючих речовин після оптимізації (на кожні 25 м³ товарних блоків)

Забруднююча речовина	До оптимізації	Після оптимізації	Скорочення
Вуглекислий газ (CO ₂), кг	267,07	185,44	81,63
Оксиди азоту (NO _x), кг	4,98	3,46	1,52
Діоксид сірки (SO ₂), кг	0,398	0,276	0,122
Тверді частинки (PM), кг	0,099	0,069	0,03

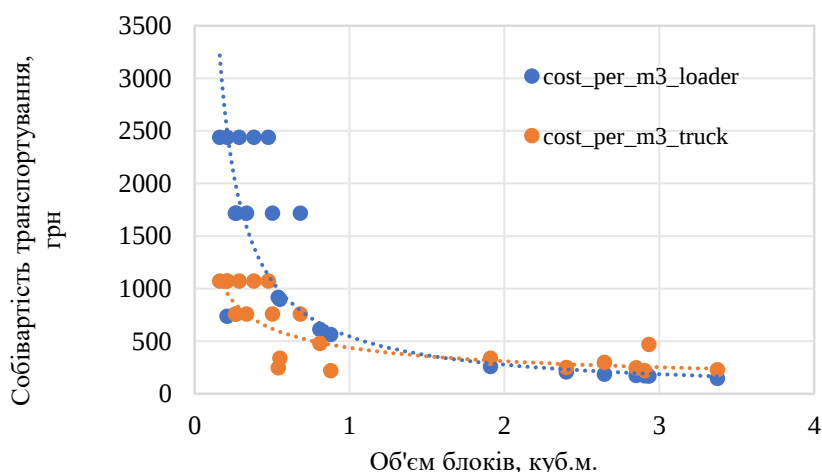


Рисунок 2 – Собівартість транспортування 1 та 2 блоків (грн/м³) залежно від типу техніки

Модель адаптована для використання на малих кар'єрах і може бути впроваджена як мобільний застосунок із функцією GPS-моніторингу та швидкого розрахунку логістичних сценаріїв. Введення параметрів блоків здійснюється вручну або за допомогою лазерного вимірювання з подальшим внесенням даних у таблицю або додаток.

Висновки. У ході дослідження розроблено адаптивну цифрову модель для порівняльної оцінки транспортних сценаріїв у кар'єрах блочного каменю. Вона враховує геометричні параметри блоків, дорожні умови, витрати пального, технічні коефіцієнти, а також обсяги викидів CO₂, NO_x, SO₂ та твердих частинок.

Модель дозволяє здійснювати швидкі розрахунки собівартості перевезення як для окремих блоків, так і для загального обсягу видобутої маси. Впроваджено функціонал автоматичної перевірки габаритної сумісності блоків із кузовом техніки, формування оптимальної схеми укладки, а також екологічної оцінки кожного рейсу.

За результатами симуляцій:

- витрати пального знижуються до 30-31 %;
- собівартість транспортування – до 26 %;
- викиди CO₂ – на 326,4 кг на 100 м³ продукції;
- викиди NO_x, SO₂ та РМ – відповідно на 6,08 кг, 0,488 кг і 0,12 кг.

Модель адаптована для використання на малих кар'єрах і може бути реалізована у вигляді мобільного застосунку з функцією GPS-моніторингу та внесенням параметрів блоків вручну або за допомогою лазерного заміру.

Найкращі результати досягаються за умов:

- транспортування дрібних блоків (до 0,7 м³) автосамоскидами з укладанням по 5–6 штук;
- перевезення великих блоків (понад 2,5 м³) навантажувачем.

Подальша оптимізація досягається при сценаріях перевезення середніх блоків (0,7–2,5 м³) автосамоскидами з укладанням по 2 блоки, а також транспортуванні окремих великих блоків (понад 2,5 м³) навантажувачем. Така стратегія забезпечує найкращий баланс між витратами пального, тривалістю циклу та рівнем викидів шкідливих речовин.

Таким чином, запропоноване рішення може використовуватись як інструмент для прийняття управлінських рішень, що базуються на реальних техніко-економічних та екологічних показниках, і відповідає сучасним підходам ЄС до зменшення техногенного навантаження в гірничій промисловості.

Список використаної літератури

[1] N. Kyrylenko, "Substantiation of the wheel loader employment at dimension stone quarries in Ukraine," ITALIAN JOURNAL OF ENGINEERING GEOLOGY AND ENVIRONMENT (IJEGE), no. 2, pp. 57–62, 2017, doi: 10.4408/IJEGE.2017-02.S-06.

[2] Mohan Munirathinam and Jon C. Yingling, "review of computer-based truck dispatching strategies for surface mining operations," *International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment*, vol. 8(1), pp. 1–15, 1994, Accessed: Apr. 01, 2025. [Online]. Available: <https://www.semanticscholar.org/paper/A-review-of-computer-based-truck-dispatching-for-Munirathinam-Yingling/1d33269204c38990004f15e7ca5be733afe815aa>.

[3] Cigdem Gurgur, Kadri Dagdelen, and Songwut Artittong, "Optimisation of a real-time multi-period truck dispatching system in mining operations," *International Journal of Applied Decision Sciences*, vol. 4(1), pp. 57–79, Jan. 2011, doi: 10.1504/IJADS.2011.038091.

УДК 351.77: 504.062:351.777(477)

В.О. Хрутьба¹, д.т.н., професор

Р.С. Лисак¹, к.т.н., доцент

Ю.С. Хрутьба², к.е.н., доцент

М.Ю. Борятинський¹, аспірант

І.В. Бельмега², аспірант

¹Національний транспортний університет, Україна

²Державний університет «Житомирська політехніка», Україна

ОСОБЛИВОСТІ МІЖНАРОДНИХ ЕКОЛОГІЧНИХ ПРОЄКТІВ НАЦІОНАЛЬНОГО ПЛАНУ ВІДНОВЛЕННЯ УКРАЇНИ

Розглянуто роль екологічних проєктів у реалізації Плану відновлення України після збройної агресії ворога. Проаналізовано ключові напрями екологічної реконструкції держави з орієнтацією на Європейський зелений курс. Висвітлено екологічні збитки, спричинені війною, та окреслено основні підходи до їх подолання шляхом інтеграції природоохоронних заходів у стратегії повоєнного відновлення. Приділено увагу можливостям фінансування екологічних ініціатив через міжнародні програми Європейського Союзу.

Ключові слова: Плану відновлення України, Європейський зелений курс, екологічні проєкти, вплив війни.

The role of environmental projects in the implementation of Ukraine's Recovery Plan after the armed aggression of the enemy is examined. The key directions of the country's ecological reconstruction, guided by the European Green Deal, are analyzed. The environmental damage caused by the war is highlighted, and the main approaches to addressing it through the integration of environmental protection measures into post-war recovery strategies are outlined. Attention is given to the opportunities for financing environmental initiatives through international programs of the European Union.

Key words: Ukraine Recovery Plan, European Green Deal, environmental projects, impact of war.

Вступ. В умовах широкомасштабної агресії гостро постає питання відновлення як зруйнованої інфраструктури, так і екосистем. Саме тому важливою частиною Національного плану відновлення України [1] є екологічна складова, яка передбачає гармонізацію в питаннях економіки, безпеки та соціального розвитку. Концепція «зеленої» реконструкції розвивається в Україні, орієнтуючись на Європейський зелений курс. Ефективним механізмом відновлення та відбудови країни, а також залучення міжнародного фінансування, є реалізація і впровадження екологічних проєктів, які спрямовані на відновлення навколишнього природного середовища та мінімізації наслідків впливу війни.

Поряд із цим виникає проблема вибору доцільних і актуальних проєктів для надання міжнародного фінансування та забезпечення відповідності екологічних проєктів вимогам Європейського зеленого курсу та іншим міжнародним зобов'язанням. Тому дослідження особливостей міжнародних екологічних проєктів дозволить знайти можливості для фінансування програм та проєктів і таким чином сприятиме реалізації Плану відновлення.

Метою роботи є визначення місця екологічних проєктів, які спрямовані на вирішення проблем захисту, збереження та відновлення довкілля, при реалізації Національного плану відновлення України.

Матеріал і результати досліджень. Стратегія Європейського Союзу направлена на трансформацію економіки ЄС у кліматично нейтральну, екологічно стійку та соціально справедливу до 2050 року, що підтверджено Європейською зеленою угодою [2], яка є орієнтиром і для країн-партнерів ЄС, зокрема України. Відповідність принципам Угоди є важливою умовою для процесу євроінтеграції, виходу на європейський ринок та збільшення обсягів фінансової для реалізації проєктів. У контексті повоєнної реконструкції Україна взяла курс на «зелене» відновлення, що базується на європейських стандартах сталого розвитку [3].

За даними Міністерства захисту довкілля та природних ресурсів України з початку повномасштабного вторгнення вже зафіксовано понад 8000 фактів заподіяння шкоди довкіллю внаслідок збройної агресії ворога [4]. Збройні конфлікти завжди залишають свій відбиток у навколишньому природному середовищі. Десятками мільярдів доларів США оцінені загальні збитки довкіллю України від війни. Негативний, а часом і незворотній, вплив характеризується забрудненням усіх компонентів біосфери. Його наслідки можуть мати довготривалий ефект на десятки чи сотні років.

Для подолання наслідків війни необхідно забезпечити інтеграцію природоохоронних заходів у відновлення України. Тому політика держави формується також з урахуванням цих потреб. Створена 21 квітня 2022 року Національна рада з питань відновлення України від наслідків війни має на меті розробку та реалізацію стратегії післявоєнного відновлення країни, враховуючи руйнування, спричинені російською агресією [5].

На Міжнародній конференції у Лугано (Швейцарія) 4 липня 2022 року учасники від нашої країни представили План відновлення України, який включає 850 проєктів з реконструкції країни з бюджетом понад 750 мільярдів доларів [6,1]. Відновлення України спрямоване на прискорення сталого економічного зростання. План визначає перелік національних програм для досягнення ключових результатів. Основні національні програми Національного плану післявоєнного відновлення:

- передумови відновлення: зміцнення інституційного потенціалу;
- передумови відновлення: цифровий уряд;
- зміцнення оборони та безпеки;
- прагнєть до інтеграції в ЄС;
- відновлення чистого та безпечного довкілля;
- енергетична незалежність та зелена угода;
- покращення бізнес-середовища;
- забезпечити конкурентний доступ до фінансування;
- забезпечити макрофінансову стабільність;

- усунення логістичних вузьких місць та інтеграція з ЄС;
- зростання секторів економіки, що створюють додану вартість;
- відновлення та модернізація житлового фонду та інфраструктури регіонів;
- відновлення та модернізація соціальної інфраструктури;
- покращення системи освіти;
- модернізація системи охорони здоров'я;
- розвиток систем культури та спорту;
- забезпечення цілеспрямованої та ефективної соціальної політики.

Програми та проекти Плану відновлення потребують фінансування. В умовах нестачі коштів державного бюджету можливості реалізувати заплановане відкриваються завдяки Порталу фінансування та тендерів ЄС [7]. Проекти, спрямовані на відновлення чистого та безпечного довкілля, можуть бути профінансовані завдяки Програмі з питань довкілля та кліматичних дій (LIFE). Дана програма створена в 1992 році і вже співфінансувала тисячі проектів та продовжує надавати можливості новим екологічним ініціативам. Вона зосереджує свою увагу на питаннях природи та біорізноманіття, циркулярної економіки та якості життя, пом'якшення наслідків зміни клімату та адаптації до них, переходу на чисту енергію.

Висновки. В умовах масштабних екологічних збитків, завданих війною, екологічна складова стає невід'ємною складовою Плану відновлення України. Орієнтація на Європейський зелений курс виступає позитивним фактором для пришвидшення темпів євроінтеграції, відкриває доступ до міжнародного фінансування та партнерства, сприяє реалізації Плану відновлення. Реалізація екологічних проектів допомагає зменшити негативний вплив війни на довкілля, підвищити екологічну безпеку у країні та наблизитися до досягнення цілей сталого розвитку. А фінансування природоохоронних ініціатив підтримується міжнародними програмами. Таким чином, орієнтація на екологічний курс у питаннях відновлення України відповідає сучасним викликам та сприяє наближенню України до інтеграції у Європейський Союз.

Список використаної літератури

- [1] План відновлення України. URL: <https://recovery.gov.ua/> (дата звернення: 20.05.2025)
- [2] Communication from the commission to the European Parliament, the European Council, the Council, the European economic and social committee and the committee of the regions. The European Green Deal. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A52019DC0640> (дата звернення: 20.05.2025)
- [3] Європейський Зелений Курс. URL: <https://ukraine-eu.mfa.gov.ua/posolstvo/galuzeve-spivrobitnictvo/klimat-yevropejska-zelena-ugoda> (дата звернення: 20.05.2025)
- [4] ЕкоЗагроза. Офіційний ресурс Міністерства захисту довкілля та природних ресурсів України. URL: <https://ecozagroza.gov.ua/> (дата звернення: 20.05.2025)
- [5] Національна рада з відновлення України від наслідків війни. URL: <https://www.kmu.gov.ua/diyalnist/konsultatyvno-doradchi-orhany/nacionalna-rada-z-vidnovlennya-ukrayini-vid-naslidkiv-vijni> (дата звернення: 20.05.2025)

[6] Міжнародна конференція з питань відновлення України. 4-5 липня 2022 – Лугано, Швейцарія. URL: <https://ua.unc-international.com/past-conferences/unc22/ukraine-recovery-conference-2022-mizhnarodna-konferenciya-z-pitan-vidnovlennya-ukrayini>(звернення:20.05.2025)

[7] Портал фінансування та тендерів ЄС. URL: <https://ec.europa.eu/info/funding-tenders/opportunities/portal/screen/home> (дата звернення: 20.05.2025)

УДК 628.511+614.71]:661.16(045)

Р.О. Новохатько, студент гр. ГТ-41мп

О.В. Ган, к.т.н., ст. викладач

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна

КОМПЛЕКСНІ РІШЕННЯ ДЛЯ ОЧИЩЕННЯ ПОВІТРЯ В УМОВАХ ХІМІЧНОГО ВИРОБНИЦТВА

Проаналізовано склад повітря у виробничих приміщеннях хімічного підприємства. Наведено результати ефективності різних систем очищення повітря, що забезпечує зниження концентрацій шкідливих речовин до безпечного рівня.

Ключові слова: *пестициди, забруднення повітря, фільтри очищення, гранично допустимі концентрації, санітарно-гігієнічні норми, стале середовище, екологічна безпека.*

The composition of air in the production premises of a chemical enterprise was analyzed. The results of the effectiveness of various air purification systems are presented, demonstrating their ability to reduce the concentration of harmful substances to safe levels.

Keywords: *pesticides, air pollution, purification filters, maximum permissible concentrations, sanitary and hygienic standards, sustainable environment, environmental safety.*

Вступ. Пестициди є невід'ємною частиною сучасного виробництва, зокрема в сільському господарстві, тваринництві та промисловості. Вони застосовуються для захисту рослин, знищення шкідників і обробки матеріалів, але більшість з них мають хімічне походження і можуть бути небезпечними для здоров'я. Особливо вразливими до впливу токсичних речовин є працівники, які безпосередньо контактують із пестицидами на виробництві [1]. У світі щороку реєструють близько 2 мільйонів випадків отруєння пестицидами, що свідчить про актуальність проблеми. Європейський Союз вже кілька десятиліть впроваджує політику обмеження застосування небезпечних сполук. В Україні контроль за використанням пестицидів також здійснюється на законодавчому рівні, але питання безпеки робочого середовища вимагає додаткової уваги.

Забруднення повітря в зоні хімічного виробництва залишається серйозною екологічною та виробничою проблемою. У складі викидів часто фіксують перевищення гранично допустимих концентрацій (ГДК) таких речовин, як NO_x, пил, бенз(а)пірен, формальдегід тощо. Це становить загрозу як для довкілля, так і для здоров'я працівників [2].

Мета та завдання. Метою дослідження було розробити та апробувати систему ефективного очищення повітря для умов хімічного виробництва. Основні завдання – визначити рівні забруднення повітря в робочій зоні хімічного підприємства, підібрати типи фільтраційних матеріалів та оцінити її ефективність.

Матеріали та результати досліджень. У ході дослідження було здійснено моніторинг повітряного середовища в межах виробничих приміщень хімічного підприємства, яке спеціалізується на виробництві полімерної продукції [3, 4]. Основну увагу приділено виявленню найбільш небезпечних забруднювачів, що утворюються в процесі термічної обробки, пресування та хімічного з'єднання полімерів, у тому числі з використанням клеїв та смол.

За результатами аналізу було встановлено, що у повітрі робочої зони присутні такі шкідливі речовини: діоксид азоту (NO_2), пил загальний та дрібнодисперсний, бенз(а)пірен, формальдегід, фенол, аміак, а також леткі органічні сполуки (ЛОС) [5]. Деякі з виявлених компонентів мають виражені канцерогенні, мутагенні та алергенні властивості.

Значні концентрації шкідливих забруднюючих речовин, результати вимірювання яких подано в таблиці 1, були зафіксовані на виробничому майданчику переважно в зонах фасування пестицидів і виробництва затверджувачів, що є основними джерелами їх викидів.

Таблиця 1 – Параметри забруднюючих речовин та їхня концентрація у повітрі

Забруднююча речовина	Одиниці виміру	Виміряна концентрація	ГДК (гранично допустима концентрація)	Перевищення ГДК		Клас небезпеки
				У, мг/м^3	У %	
Діоксид сірки (SO_2)	мг/м^3	0,25	0,05	0,2	500	2
Оксиди азоту (NO_x)	мг/м^3	5,26	2	3,26	263	2
Чадний газ (CO)	мг/м^3	5	3	2	167	4
Озон (O_3)	мг/м^3	0,12	0,1	0,02	120	1
Бенз(а)пірен	мг/м^3	0,00128	0,00015	0,00113	853	1
Формальдегід	мг/м^3	0,08	0,05	0,03	160	3
Пестициди	мг/м^3	5,5	3,5	2	157	1-4
Пил (PM_{10})	мг/м^3	0,15	0,05	0,1	300	3
Пил ($\text{PM}_{2.5}$)	мг/м^3	0,12	0,025	0,095	480	3

Ці дані вказують на значну потенційну загрозу для здоров'я працівників, що працюють у виробничій зоні без достатнього рівня очищення повітря.

Для вирішення проблеми високого рівня забруднення було протестовано кілька варіантів фільтраційного обладнання з різною схемою організації потоку та рівнями очищення [6]. Було здійснено повторний замір концентрацій забруднюючих речовин у тих самих точках. Результати показали суттєве зниження концентрацій по всіх показниках (табл. 2).

Таблиця 2 – Параметри очищення повітря у зоні фасування пестицидів після очищення відповідним фільтром

Забруднююча речовина	Концентрація до очищення, мг/м ³	ГДК, мг/м ³	Концентрація після очищення фільтр HEPA, мг/м ³	Концентрація після очищення фільтр Airwash Wishper 675, мг/м ³	Концентрація після очищення фільтр ULTRA VOC, мг/м ³
Діоксид сірки (SO ₂)	0,25	0,05	0,004	0,002	0,0036
Оксиди азоту (NO _x)	5,26	2	0,034	0,007	0,09547
Чадний газ (CO)	5,0	3	0,1	0,05	0,198
Озон (O ₃)	0,12	0,1	0,0002	0,0009	0,003
Бенз(а)пірен	0,00128	0,0002	0,00002	0,00001	0,00004
Формальдегід	0,08	0,05	0,002	0,0002	0,003
Пестициди	5,5	3,5	0,035	0,025	0,099
Пил (PM10)	0,15	0,05	0,0005	0,0011	0,0044
Пил (PM2.5)	0,12	0,025	0,0022	0,0011	0,004

Найвищу ефективність (табл. 3) продемонструвала трирівнева система фільтрації, що включала:

- грубий механічний фільтр (попереднє очищення) — затримує пил, волокнисті частки та більшість аерозолів;
- сорбційний шар (на основі активованого вугілля) — ефективно поглинає органічні пари, формальдегід та бензол;
- фільтр тонкого очищення (HEPA) — затримує дрібнодисперсні частинки (PM2.5, PM1) та мікрокраплі.

Таблиця 3 – Ефективність фільтру застосування фільтрів

Забруднююча речовина	Ефективність фільтру HEPA, %	Ефективність фільтру Airwash Wishper 675, %	Ефективність фільтру ULTRA VOC, %
Діоксид сірки (SO ₂)	98	99	99
Оксиди азоту (NO _x)	99	100	98
Чадний газ (CO)	98	99	96
Озон (O ₃)	100	99	98
Бенз(а)пірен	98	99	97
Формальдегід	98	100	96
Пестициди	99	100	98
Пил (PM10)	100	99	97
Пил (PM2.5)	99	100	97

Таким чином, після встановлення системи фільтрації повітря більшість небезпечних забруднювачів було приведено до рівня, нижчого за встановлені ГДК, що значно покращує умови праці та знижує професійні ризики.

Висновки. Після встановлення системи фільтрації повітря більшість небезпечних забруднювачів було приведено до рівня, нижчого за встановлені ГДК, що значно покращує умови праці та знижує професійні ризики.

Результати дослідження свідчать про те, що зазначена система очищення може бути адаптована для інших типів промислових підприємств, де наявне хімічне або пилове навантаження у повітряному середовищі. Технологія не потребує істотної перебудови вентиляційної інфраструктури, що робить її придатною для впровадження на діючих об'єктах.

Список використаної літератури

- [1] List of chemicals: Annex I - ECHA. (2025). Homepage - ECHA.
<https://echa.europa.eu/regulations/prior-informed-consent/list-chemicals>
- [2] Бодрик, О.О. (б. д.). Вплив пестицидів на здоров'я людини.
<http://dspace.pnpu.edu.ua/bitstream/123456789/16715/1/77.pdf>
- [3] Гігієнічна класифікація пестицидів за ступенем небезпечності, ДСП 8.8.1.2.002-98 № 2 (1998). Офіц.вебпорт. парламенту України <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/va002282-98#Text>
- [4] Транспортування, зберігання та застосування пестицидів у народному господарстві. Державні санітарні правила ДСП 8.8.1.2.001-98. (1998). Офіційний вебпортал парламенту України. <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0001282-98#Text>
- [5] Настанова щодо визначення небезпечних і шкідливих факторів та захисту від їх впливу при виробництві будівельних матеріалів і виробів та їх використанні в процесі зведення та експлуатації об'єктів будівництва. ДСТУ-Н Б А 3.2-1:2007 (2007). Мінбуд України. https://www.ksv.biz.ua/GOST/DSTY_ALL/DSTU5/dstu_b_a_3.2-1-2007.pdf
- [6] НЕРА фільтр для хімічної промисловості. (б. д.). ВЕНТ-ФІЛЬТР виробник повітряних фільтрів: карманні, панельні, рухані, фільтри НЕРА, фільтр-бокси, циліндричні, стельові, підлогові. <https://ventfilter.kiev.ua/goods/filtr-hepa-dlya-himicheskoy-promyshlennosti/>

УДК 581.6:692.232

Т.М. Ткаченко, д.т.н., професорка,
В.О. Мілейковський, д.т.н., професор,
Київський національний університет будівництва і архітектури, Україна

МОЖЛИВОСТІ ТЕХНОЛОГІЙ ВЕРТИКАЛЬНОГО ОЗЕЛЕНЕННЯ ДЛЯ БАГАТОПОВЕРХОВИХ БУДІВЕЛЬ

Для повного озеленення багатоповерхових будівель запропоновано використання контейнерів уздовж периметру покрівлі з рослинами, що звисають донизу, та контейнерів на балконах з в'юнкими рослинами.

Ключові слова: *зелені конструкції, вертикальне озеленення, в'юнки рослини, ампельні рослини, багатоповерхові будівлі, висотні будівлі*

For complete greening of multi-storey buildings, it is proposed to use containers along the perimeter of the roof with plants hanging downwards, and containers on balconies with climbing plants.

Keywords: *green structures, vertical greening, climbing plants, ampelous plants, multi-storey buildings, high-rise buildings*

Вступ. Технології зелених конструкцій, зокрема, передбачають вертикальне озеленення. Дехто плутає вертикальне озеленення з фасадним озелененням. Це дві різні технології. Фасадне озеленення – це спеціальна технічна система, яка розташовується на фасаді будівлі. У систему повністю інтегруються рослини з кореневою системою та субстратом, а також система живлення та поливу. Така система потребує суттєвих економічних затрат і обслуговування. На відміну від фасадного озеленення вертикальне озеленення – це бюджетна технологія, яка передбачає використання в'юнких рослин, коріння яких розташовані у ґрунті біля фасаду будівлі або в будь-яких контейнерах, а пагони заплітають фасад будівлі. Технологія вертикального озеленення розповсюджена достатньо широко як в Україні, так і в інших країнах світу. Її використовують для покращення [1] естетичного вигляду будівлі, її візуального сприйняття та підвищення її екологічності; для маскуванню архітектурних та будівельних недоліків; маскуванню цивільних та військових об'єктів, пам'ятників архітектури тощо; для додаткового охолодження фасадів будівель [2] та зменшення перегрівання будівель; для регулювання надходження сонячного світла у приміщення крізь вікна, скляні фасади та інші прозори системи; для покращення екологічних аспектів навколишнього середовища тощо. Однак, існують деякі проблеми застосування вертикального озеленення, а саме:

1. Покращення умов зростання рослин на фасадах будівель.
2. Проблема заплетіння вищих поверхів (вище 5 поверху).

Вирішенню цих питань присвячено дане дослідження.

Мета та завдання. Метою роботи є розгляд різних механізмів щодо полегшення заплетіння фасадів будівель в'юнкими рослинами.

Завдання роботи – запропонувати рішення щодо полегшення заплетіння фасадів; запропонувати способи озеленення вищих поверхів.

Матеріали та результати досліджень. Найчастіше для вертикального озеленення застосовуються декоративні види винограду (*Parthenocissus quinquefolia*, *Parthenocissus tricuspidata* "Veitchii") та плюща (*Hedera* sp. (наприклад, *Hedera helix*). Також застосовують і сортові види винограду. Зазвичай перелічені види рослин можуть самотужки плістися фасадами (рис.1).

Найбільший позитивний ефект спостерігається на фасадах с негладкою текстурою, наприклад, цегляна стіна або фасади, оздоблені декоративною шершавою плиткою чи штукатуркою (рис. 2). Рослини не будуть плестися великими площами засклення (рис. 3). На цьому рисунку видно, що ліани намагаються чіплятися одна за одну, але за скло вони зачепитися не спроможні. На рис. 3 в видно молоду гілку, яка вимушена звисати біля скла, адже не спроможна зачепитися й рости вгору. Якщо засклення має достатньо часту систему негладких рам, то рослини здатні зачіплятися до них (рис. 3 в). Для прискорення озеленення фасадів, утворення форми та запобігання пошкодження пагонами поверхонь фасадів, застосовуються різноманітні пристрої: шпалери, мотузки, решітки/сітки тощо (рис. 4-7). Однак, незважаючи на розповсюдження вертикального озеленення, існує проблема щодо озеленення верхніх поверхів будівель.



Рисунок 1 – Озеленення фасадів будівель
(авторська світлина)



Рисунок 2 – Вертикальне озеленення на
фасадах с негладкою структурою
(авторська світлина)



а



б



в

Рисунок 3 – Вертикальне озеленення на заскленні: *а* – вид ззовні; *б* – вид з внутрішнього боку; *в* – вид збоку (авторські світлини)

Максимально декоративне ефективне озеленення спостерігається приблизно до висоти п'ятого поверху. Надалі рослини втрачають декоративні якості та спостерігається відмирання пагонів. Саме в цьому випадку пропонується використання різних запропонованих рішень.

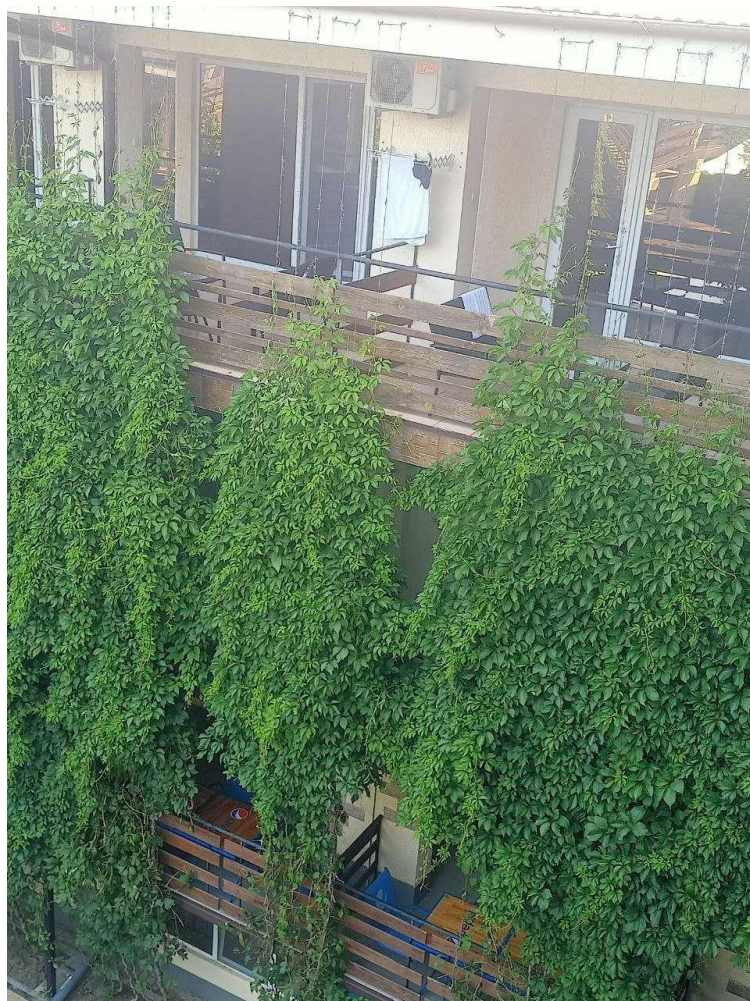


Рисунок 4 - Приклад використання мотузки для вертикального озеленення
(авторська світлина)



Рисунок 5 – Приклад використання сітки для вертикального озеленення
(авторська світлина)

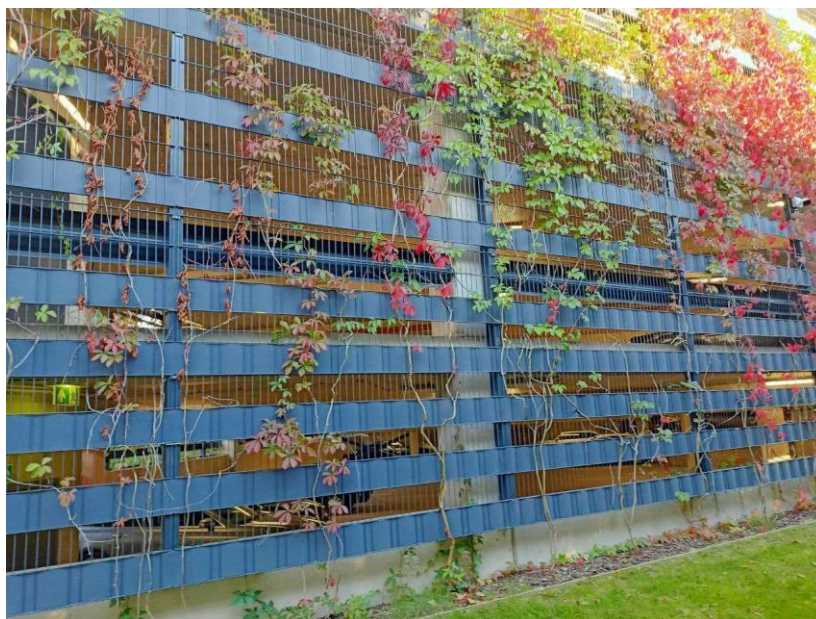


Рисунок 6 – Приклад використання решітки для озеленення паркінгу
(авторська світлина)



Рисунок 7 – Приклади використання шпалер для вертикального озеленення
(авторська світлина)

Для високих багатоповерхових будівель рекомендуємо використовувати покрівлю. На покрівлі розташовуються лотки або інші контейнери з вертикальними рослинами, пагони яких звішуються донизу. Таким чином, багатоповерхова будівля може бути повністю озеленена (рис. 8). Особливо ефективно для озеленення фасадів розміщувати лотки вздовж периметру покрівлі. Однак, слід врахувати, що звисання вниз може уповільнювати зростання витких рослин, що в природі в'ються вгору.

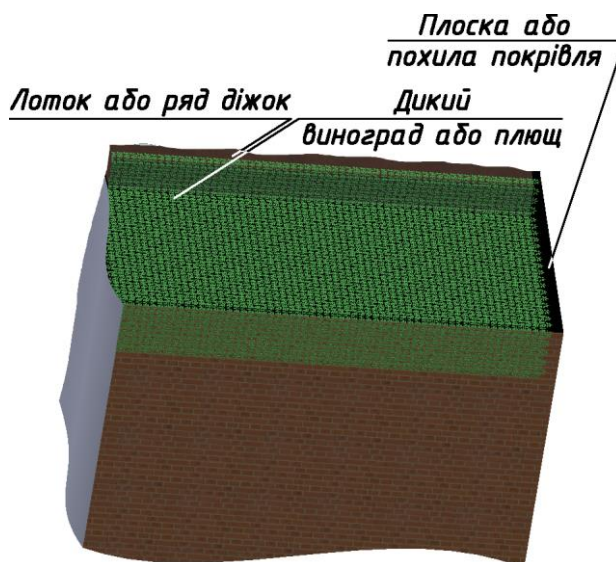


Рисунок 8 – Схема озеленення покрівлі та стіни багатоповерхової будівлі з застосуванням лоткового озеленення (авторське зображення)

Також перспективним рішенням, для середньої частини фасадів висотних будівель є озеленення фасадів з контейнерів на балконах. Це дозволяє повністю озеленити будівлю довільної висоти та поверховості. Для зашкленних балконів розміщення стулок, що відкриваються, та діжок рекомендовано ув'язувати таким чином, щоб забезпечити доступ для обслуговування, зокрема поливання в разі посухи та внесення добрив.

Подібні рішення дозволяють досягти не лише компенсаційного озеленення за вимогами ДБН Б 2.2-5:2011 [3], але й збільшувального озеленення, тобто збільшення площі озеленення порівняно зі станом до будівництва. Це – одна з можливостей будівництва об'єктів, що не лише зменшують негативний вплив на довкілля, але й у певних аспектах покращують його. Поняття збільшувального озеленення внесено авторами до проєкту українського стандарту зеленого будівництва СОУ ОЕМ 08.002.41.032:20XX, друга редакція якого перебуває в процесі громадського обговорення [4, 5].

Висновки. Таким чином, вертикальне озеленення є перспективною бюджетною технологією для озеленення урбоценозів. Його використовують для покращення естетичного вигляду будівлі, її візуального сприйняття та підвищення її екологічності; для маскуванню архітектурних та будівельних

недоліків; маскуванню цивільних та військових об'єктів, пам'ятників архітектури тощо; для додаткового охолодження фасадів будівель та зменшення перегріву будівель; для регулювання надходження сонячного світла у приміщення через вікна, скляні фасади та інші прозори системи; для покращення екологічних аспектів навколишнього середовища тощо. Максимально декоративне ефективне озеленення спостерігається приблизно до висоти п'ятого поверху. Для прискорення озеленення фасадів, утворення форми та запобігання пошкодження пагонами поверхонь фасадів, застосовуються різноманітні пристрої: шпалери, мотузки, решітки тощо. Для високих багатоповерхових будівель ми рекомендуємо використовувати покрівлю. По периферії покрівлі розташовуються ящики з вертикальними рослинами, пагони яких звішуються донизу. Для середньої частини фасадів висотних будівель рекомендовано озеленення фасадів з контейнерів на балконах. Таким чином, багатоповерхова або висотна будівля може бути повністю озеленена.

Список використаної літератури

- [1] Tkachenko T., Mileikovskiy V., Ujma A., Hajiyev M. Treatment of Out-of-Context Buildings During the Restoration of Historical Territories Using Green Structures. *International Journal of Conservation Science*. 2024. Том. 12, №. 3. С. 45–53. URL: <https://doi.org/10.36868/IJCS.2024.si.11>
- [2] Tkachenko T., Mileikovskiy V. Methodology of thermal resistance and cooling effect testing of green roofs. *Songklanakarin Journal of Science and Technology*. 2020. Том. 42, №. 1. С. 50–56. URL: <https://doi.org/10.14456/SJST-PSU.2020.8>
- [3] ДБН Б 2.2-5:2011, *Благоустрій територій*, зі зм. №1-36, Київ: Міністерство розвитку громад та територій України, 2022. Доступно за посиланням: https://e-construction.gov.ua/laws_detail/3256066732866930460
- [4] ДБН Б 2.2-5:2011, *Система екологічної сертифікації та маркування згідно з ДСТУ ISO 14024:2018 (ISO 14024:2018, IDT): Громадські будівлі: Екологічні критерії та метод оцінювання життєвого циклу*, друга редакція, Київ: ВГО Жива Планета, 2025. Доступно за посиланням: <https://livingplanet.org.ua/images/2025/28-02-2025-druga-redakciya.pdf>
- [5] Tkachenko T., Mileikovskiy V., “New Ukrainian Green Construction Standards” in *Proceedings of the the International Conference «European Green Dimensions: Fundamental, Applied, and Industrial Aspects»*, June 5–7, 2025, Mykolaiv: PMBSNU, 2025. P. 92 [Online]. Available: https://eugreendimensions.chmnu.edu.ua/storage/resources/Proceedings_CONFERENCE_EGD_2025.pdf

СЕКЦІЯ 3. ГІРНИЦТВО ТА ГЕОТЕХНІЧНЕ БУДІВНИЦТВО

УДК 691.32:666.972:628.4

В.І. Шамрай, к.т.н., доцент,

П.В. Шепель, студент,

Державний університет «Житомирська політехніка», Україна

ЗАСТОСУВАННЯ ДРІБНОДИСПЕРСНИХ ВІДХОДІВ ПРИРОДНОГО КАМЕНЮ В ГЕОПОЛІМЕРНИХ СУМІШАХ

У дослідженні розглянуто можливість повторного використання дрібнодисперсних відходів каменевидобувної та каменеобробної промисловості для створення геополімерних матеріалів. Було проаналізовано хімічний та гранулометричний склад відходів, які містять до 75% діоксиду кремнію (SiO_2) і придатні для лужної активації. Проведено серію експериментів зі створення геополімерних сумішей на основі цих відходів із застосуванням розчину NaOH та рідкого скла. Результати показали, що такі суміші можуть досягати міцності на стиск від 10 до 20 МПа залежно від гранулометричного складу сировини. Зразки з відходів каменеобробного виробництва продемонстрували нижчу міцність через надлишок води, необхідної для змочування дрібних частинок.

Ключові слова: геополімер, відходи, кремній, будівництво, міцність, лужна активація, камінь.

This study explores the potential reuse of fine-grained waste from stone quarrying and stone processing industries for the production of geopolymer materials. The chemical and granulometric composition of the waste was analyzed, revealing up to 75% silicon dioxide (SiO_2), making it suitable for alkaline activation. A series of experiments were conducted to produce geopolymer mixtures using sodium hydroxide solution and liquid glass. The results showed that these mixtures can achieve compressive strengths ranging from 10 to 20 MPa, depending on the particle size distribution of the raw materials. Samples based on stone processing waste demonstrated lower strength due to excess water required for wetting fine particles.

Keywords: geopolymer, waste, silica, construction, strength, alkaline activation, stone.

Вступ. Накопичення промислових відходів в Україні, зокрема відходів каменеобробної та каменевидобувної промисловості, стає дедалі актуальнішою екологічною та економічною проблемою. У зв'язку з цим зростає потреба у пошуку ефективних способів їх повторного використання. Одним із перспективних напрямків є створення геополімерних матеріалів на основі мінеральних відходів, які демонструють високу міцність, вогнестійкість і низький вуглецевий слід у порівнянні з традиційними будівельними матеріалами. У рамках дослідження було запропоновано використання дрібнодисперсних відходів природного каменю як сировини для виготовлення геополімерних сумішей, що дозволяє не лише зменшити обсяги накопичених відходів, а й створити новий екологічно безпечний будівельний матеріал.

Мета та завдання. Метою дослідження є оцінка можливості застосування дрібнодисперсних відходів каменевидобування та каменеобробки у виробництві геополімерів як альтернативи традиційним будівельним матеріалам.

Завдання дослідження:

1. Проаналізувати та дослідити фізико-хімічні властивості дрібнодисперсних відходів природного каменю, та їх вплив на створення геополімеру та його характеристики.

2. Дослідити фізико-хімічні властивості дрібнодисперсних відходів природного каменю та їх вплив на формування структури та властивостей геополімерних сумішей.

Матеріали та результати досліджень. Методика впровадження дрібнодисперсних відходів природного каменю у геополімерні суміші полягає у наступному:

1. Проводився відбір та підготовка зразків дрібнодисперсних відходів природного каменю на ТОВ «Омелянівський кар'єр» та ТОВ «Ніка-Гран»;

2. Визначався хімічний та гранулометричний склад дрібнодисперсних відходів природного каменю;

3. Проводилась підготовка 2-молярного розчину NaOH (220 мл, 10 % до маси відходів) шляхом розчинення 8 г NaOH у 100 мл води з виділенням тепла, витримано 24 години;

4. Проводилось замішування геополімерних сумішей на основі дрібнодисперсних відходів природного каменю, що включало додавання розчину 2М NaOH та 10 % від маси відходів Na_2SiO_3 ;

5. Проводилось випробовування геополімерних зразків на міцність з використанням пресу.

Дослідження хімічного складу дрібнодисперсних відходів природного каменю показав, що утворені внаслідок обробки природного каменю відходи характеризується високим вмістом діоксиду кремнію (SiO_2) — до 75 %, що обумовлює його високу хімічну стабільність. У складі також присутні оксиди алюмінію (Al_2O_3), калію (K_2O), натрію (Na_2O) та заліза (Fe_2O_3) у менших концентраціях. Загалом шлам має слабоосновний характер і придатний до лужної активації, що дозволяє використовувати його у створенні геополімерів. Завдяки вмісту активних мінеральних компонентів, він може частково замінювати цемент у будівельних матеріалах [1].

Гранулометричний склад дрібнодисперсних відходів каменевидобувного виробництва характеризується дещо більшими розмірами частинок (рис. 1). Переважаюча фракція в даних відходах має розміри частинок від 0,5 до 1,0 мм утворення яких зумовлене технологічними процесами видобування та переробки гірських порід: буріння, різання інструментом, що має відносно велику зернистість, дроблення гірських порід у дробарках та ін. У випадку утворення дрібнодисперсних відходів на каменеобробних підприємствах розміри їх частинок є у 10 разів меншими, переважно від 0,05 до 0,1 мм, що зумовлені процесами різання, шліфування та полірування інструментом із невеликою зернистістю, що забезпечують відповідну якість поверхні каменю [2].

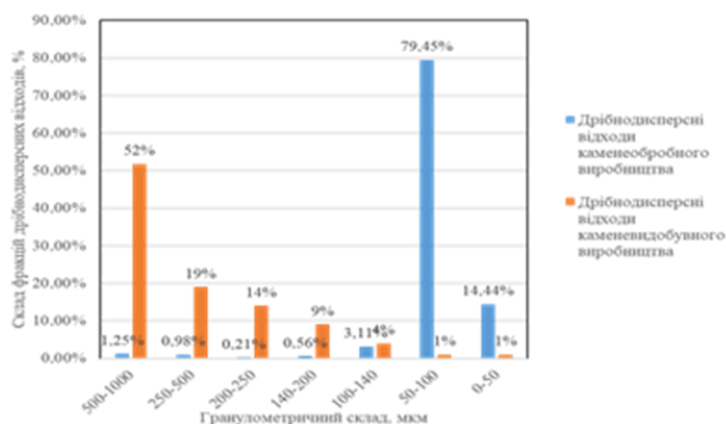


Рисунок 1 – Результати гранулометричного аналізу дрібнодисперсних відходів природного каменю

Внаслідок цього, досліджено можливість застосування дрібнодисперсних відходів природного каменю у виробництві геополімерів, шляхом проведення експериментальних випробувань, результати яких показано у табл. 1.

Таблиця 1 – Результати експериментальних випробувань застосування дрібнодисперсних відходів природного каменю у виробництві геополімерів

№ п/п	Тип відходів, маса сухої суміші, кг	Витрата розчину луку (NaOH + H ₂ O), мл	Витрата рідкого скла (Na ₂ SiO ₃), кг	Міцність при стиску, МПа
1	дрібнодисперсні відходи каменевидобування, 2,2 кг	220	0,220	17,18
2		220	0,220	14,95
3		220	0,220	14,72
4	дрібнодисперсні відходи каменюобробного виробництва, 2,5 кг	500	0,250	11,37
5		500	0,250	8,01
6		500	0,250	10,01

Відповідно до табл. 1, використання розчину гідроксиду натрію та рідкого скла дає змогу отримати геополімерні суміші з використанням дрібнодисперсних відходів каменевидобування та каменюобробного виробництва з міцністю при стиску від 10 до 20 МПа. При цьому геополімерні суміші з дрібнодисперсних відходів каменюобробного виробництва мають меншу міцність на стиск [3].

Як показали дослідження, гранулометричний склад відходів впливає на міцність матеріалів. На зниження міцності зразків впливає надлишок води, який потребує суміш при використанні відходів з переважним вмістом дрібних фракцій (50-100 мкм).

Таким чином, використання дрібнодисперсних відходів каменевидобування та каменюобробного виробництва дає змогу отримати нові матеріали та відкриває нові можливості утилізації відходів каменевидобування та каменюобробки у будівельній галузі.

Висновки. За результатами досліджень встановлено:

1. Дрібнодисперсні відходи природного каменю мають сприятливий хімічний склад для лужної активації, зокрема завдяки високому вмісту SiO_2 , що робить їх придатними для використання у геополімерах. Водночас гранулометричні характеристики цих відходів залежать від етапу виробництва та визначають їхню реакційну здатність і вплив на властивості готових матеріалів;
2. Дослідження показали, що геополімерні суміші з використанням дрібнодисперсних відходів демонструють достатній рівень міцності при стиску (10–20 МПа), залежно від гранулометричного складу. Встановлено, що більша частка дрібних фракцій потребує більше води, що знижує міцність матеріалу, однак загалом ці відходи є перспективною сировиною для геополімерів.

Список використаної літератури

- [1] В. І. Шамрай, В. В. Мельник-Шамрай, А. Г. Темченко, А. М. Махно, Р. М. Ігнатюк, «Дослідження якісних властивостей відходів каменевидобування та каменеобробки з метою їх використання як сировини для виготовлення геополімерного бетону», *Технічна інженерія*, вип. 1(91), с. 385–397, 2023. DOI: [10.26642/ten-2023-1\(91\)-385-397](https://doi.org/10.26642/ten-2023-1(91)-385-397).
- [2] В. І. Шамрай, І. В. Леонєць, «Перспективи використання дрібнодисперсних відходів каменедобувного та каменеобробного виробництва у геополімерних сумішах», *Збірник матеріалів XIII Міжнародної науково-практичної конференції «Коштовне та декоративне каміння: актуальні питання гемологічної експертизи, геології, видобутку, обробки і використання»*, 2024.
- [3] V. Shamrai, I. Leonets, V. Melnyk-Shamrai, I. Patseva, and Y. Naumov, “Reuse of stone working enterprise slurry in geopolymer and concrete products,” *Mining of Mineral Deposits*, vol. 18, no. 4, pp. 10–17, 2024. DOI: [10.33271/mining18.04.010](https://doi.org/10.33271/mining18.04.010).

УДК 622.28.044

О.В. Романенко, студент,
І.Г. Сахно, д.т.н., професор,
ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА», Україна

ФРИКЦІЙНИЙ АНКЕР ПІДВИЩЕНОЇ НЕСУЧОЇ ЗДАТНОСТІ

Розглянуто сучасні конструкції анкерного кріплення. Визначено перспективу використання фрикційних анкерів, їх недоліки і переваги. Проаналізовано конструкції фрикційних анкерів, що використовуються сьогодні, та проведено патентний пошук. Запропоновано конструкцію анкерного кріплення фрикційного типу, що забезпечує роботу в піддатливому режимі з високим постійним опором, величина якого регулюється.

Ключові слова: анкер, гірнича виробка, стійкість виробок, несуча здатність.

Modern designs of rock bolts are considered. The prospects for the use of friction bolts, their disadvantages and advantages are determined. The designs of friction bolts used today are analyzed, and a patent search is also conducted. A design of a friction-type bolt is proposed, which provides operation in a compliant mode with high constant resistance, the value of which is adjustable.

Keywords: rock bolt, mine roadway, roadway stability, bearing capacity.

Вступ. Анкери є сучасним видом кріплення, що широко використовуються в геотехнічній інженерії. Різні за конструкцією анкери використовуються для закріплення підземних гірничих виробок шахт, забезпечення стійкості гідротехнічних споруд, підтримання підземних об'єктів цивільної інфраструктури, закріплення схилів та ін.

В останні три десятиліття найбільшої популярності набули сталевополімерні анкери [1] через те, що вони мають високу контрольовану несучу здатність і швидке закріплення. Застосування металевих анкерів з хімічним закріпленням виправдовує себе при кріпленні протяжних гірничих виробок. Однак сьогодні використовуються і анкери інших конструкцій [2-4].

Найменш поширену групу представляють фрикційні анкери, що фіксуються в шпурах силами тертя між стінками шпуру і анкером. Такі анкери мають приблизно постійну робочу характеристику при великих допустимих деформаціях, проте невелику несучу здатність. До найбільш поширених фрикційних анкерів відносяться дві системи Split Set та Swellex (Omega). І в першому і другому випадку анкер це сталева труба спеціального перетину, що випрямляється в шпурі гідравлічно, пневматично або за рахунок власної пружності. Відповідно до випробувань Стилборга і Стжерна [5] для анкерів Split Set несуча здатність становить близько 50 кН при деформаціях більше 120 мм, а для анкерів Swellex – 121 кН при деформаціях 26 мм, а після зрушення на 180 мм 63 кН. Тобто несуча здатність цих анкерів в робочому режимі приблизно в чотири рази менше несучої здатності сталевополімерних анкерів.

Спроби удосконалення фрикційних анкерів ведуться давно. Так відомий спосіб установки фрикційних трубчастих анкерів [6], що включає буріння шпура, силове статичне або динамічне введення в шпур фрикційного анкера у вигляді сталеві труби, що звужується на кінці, у якій виконано розріз по довжині, а діаметр більше ніж діаметр шпуру. Недоліком наведеного способу є недостатнє зусилля закріплення анкера в шпурі. Це пояснюється тим, що зусилля закріплення такого анкера визначається силами пружного відновлення радіально стиснутої труби, встановленої в шпур, що визначають величину сил тертя між породою і тілом анкера. Діапазон регулювання опору анкеру розшаруванню порід вузький і обмежений шириною розрізу та матеріалом трубчастого анкера. Наведені недоліки знижують ефективність зміцнення гірських порід анкерами і викликають необхідність збільшення щільності анкерування.

Відомий також спосіб установки фрикційних трубчастих анкерів [7], що включає буріння шпуру, введення в шпур трубчастого сталевого анкера, прикладання гідравлічного тиску до внутрішньої поверхні анкера для його розширення і притиснення до стінок шпуру. Недоліком наведеного способу є недостатнє зусилля закріплення анкера в шпурі. Це пояснюється тим, що зусилля закріплення такого анкера визначається силами гідравлічного розширення труби, які визначають величину сил тертя між породою і тілом анкера. Гідравлічний вплив обмежений по часу і після скиду внутрішнього тиску величина розширення зменшується, оскільки пружна частина деформацій труби

зникає. Зусилля фіксації фрикційного анкера за інформацією авторів, не перевищує 70 т при внутрішньому гідравлічному тиску 9.5МПа. Регулювання опору анкеру розшаруванню можливо за рахунок зміни гідравлічного тиску, діапазон регулювання обмежений 13-70 т при довжині анкера 2,3-3,0 м. Наведені недоліки знижують ефективність зміцнення гірських порід анкерами і викликають необхідність збільшення щільності анкерування.

Мета та завдання. Метою роботи є розробка нової конструкції анкерного кріплення фрикційного типу, що забезпечує роботу в піддатливому режимі з високим постійним опором, величина якого регулюється. Для досягнення поставленої мети поставлено завдання оптимізації технологічних параметрів кріплення для забезпечення цільових робочих характеристик.

Матеріали та результати досліджень. На кафедрі гірничої справи Технічного університету «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА» у межах дослідження було розроблено конструкцію фрикційного анкера підвищеної несучої здатності з керованим опором.

Розроблений анкер уявляє собою сталеву трубу з подовжнім розрізом по довжині в середину якого вводиться розширюване тіло. Як розширюване тіло використовують щонайменше одну гнучку еластичну оболонку з сумішшю, що розширюється в процесі гідратаційного твердіння зі створенням тисків не менше ніж 25 МПа в умовах обмежених деформацій; при цьому оболонки з сумішшю ущільнюються всередині трубчастого анкера після установки і залишають всередині анкера після розширення, а величину притиснення анкера до стінок шпуру регулюють кількістю і розмірами оболонок, а також властивостями суміші, що розширюється в процесі гідратаційного твердіння. Конструкція запропонованого анкера наведена на рис. 1.

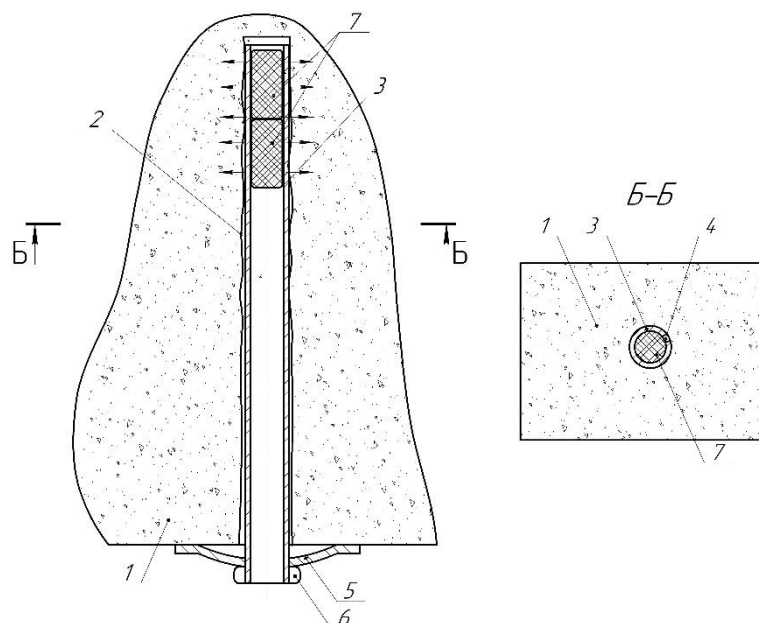


Рисунок 1 – Фрикційний анкер підвищеної несучої здатності: 1 – породний масив; 2 – шпур; 3 – трубчастий анкер; 4 – подовжній розріз в анкері; 5 – опорна плита; 6 – стопорне кільце; 7 – оболонки з сумішшю, що розширюється в процесі гідратаційного твердіння

Використання в якості розширюваного тіла не менше ніж однієї гнучкої еластичної оболонки з сумішшю, що розширюється в процесі гідратаційного твердіння зі створенням тисків не менше ніж 25 МПа в умовах обмежених деформацій, і залишення їх всередині анкера після розширення, призводить до притиснення сумішшю, що розширюється, трубчастого анкера до стінок шпуру з високим опором, який не знижується з часом, що забезпечує роботу анкера в піддатливому режимі з постійним опором після твердіння суміші, що розширюється. Якщо тиск розширення сумішей, що використовуються як твердіючий розчин, в умовах обмежених деформацій менше 25 МПа, то фактичний тиск всередині трубчастого анкера після його притиснення до стінок шпуру буде менше на 20-60% внаслідок заповнення зазорів, деформацій труби і породи під час притиснення до неї анкера. Це знижує робочий опір кріплення і, як наслідок, ефективність наведеного способу установки анкерів.

Ущільнення оболонок з сумішшю, що розширюється в процесі гідратаційного твердіння всередині трубчастого анкера після їх установки, призводить до заповнення порожнин і зазорів між тілом, що розширюється і трубчастим анкером до початку процесу розширення. Це сприяє зменшенню коефіцієнта об'ємного розширення суміші в процесі гідратації і, відповідно, збільшенню тиску розширення і, як наслідок, підвищенню робочого опору кріплення і ефективності наведеного способу установки анкерів.

Регулювання величини притиснення анкера до стінок шпуру за рахунок варіювання кількістю і розмірами оболонок, а також параметрами суміші, що розширюється в процесі гідратаційного твердіння дозволяє керувати режимом роботи кріплення в різних геомеханічних умовах, а також узгоджувати режим роботи фрикційних анкерів з іншими системами кріплення, що використовують разом з анкерами. Це підвищує ефективність способу установки анкерів при зміцненні гірських порід і сприяє підвищенню стійкості гірничих виробок, що підтримуються за допомогою фрикційних анкерів або комбінованого кріплення, в складі якого використовують фрикційні анкери. Збільшення кількості оболонок з сумішшю, що розширюється в процесі гідратаційного твердіння підвищує робочий опір кріплення при визначених деформаціях. Збільшення тиску розширення твердуючої суміші, шляхом варіювання її властивостей також призводить до підвищення робочого опору кріплення при визначених деформаціях.

Зменшення загальної довжини оболонок з сумішшю, що розширюється в процесі гідратаційного твердіння менше ніж 5 діаметрів шпуру призводить до зменшення зусилля притиснення трубчастого анкера до шпуру і, як наслідок, зниження ефективності наведеного способу установки анкерів. Використання оболонок з полімерного матеріалу для суміші, що розширюється, у вигляді циліндричних капсул з діаметром менше ніж внутрішній діаметр трубчастого анкера на 3-5 мм сприяє швидкому і зручному монтажу системи кріплення. При різниці діаметра капсули і внутрішнього діаметра анкера менше ніж 3 мм під час встановлення капсул і їх просовування всередині анкера виникають затримки через застрявання капсул, також можливі пошкодження цілісності оболонок під

час їх установки. Це призводить до затримок в установці кріплення і зменшення його ефективності. При збільшенні різниці діаметра капсули і внутрішнього діаметра анкера більше ніж 5 мм питома вага оболонки в шпурі після ущільнення капсул збільшується, а суміші, що розширюється, зменшується. Це призводить до зменшення тиску розширення суміші і притиснення анкера до стінок шпуру. Як наслідок, знижується робочий опір кріплення і ефективність наведеного способу установки анкерів.

Висновки. Використання запропонованого фрикційного анкера забезпечує постійний керований режим піддатливої роботи кріплення, що дозволяє ефективно зміцнити гірські породи і підвищити стійкість гірничої виробки, що підтримується за допомогою фрикційних анкерів або комбінованого кріплення в складі якого використовуються фрикційні анкери.

Список використаної літератури

- [1] Sakhno, I., Sakhno, S., Kurdiunow, D., Shvets, I. Studies of new nonadhesive anchoring. Mining of Mineral Deposits. 2018. 12(2), 85-94.
- [2] He, M., Gong, W., Wang, J., Qi, P., Tao, Z., Du, S., & Peng, Y. Development of a novel energy-absorbing bolt with extraordinarily large elongation and constant resistance. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2014. (67), 29-42.
- [3] Korzeniowski, W., Skrzypkowski, K., Zagórski, K. Reinforcement of underground excavation with expansion shell rock bolt equipped with deformable component. Studia Geotechnica et Mechanica. 2017. 39(1), 39-52.
- [4] Li, C., Håkansson, U. Performance of the Swellex bolt in hard and soft rocks. Rock Support and Reinforcement Practice in Mining. 2018. 103-108.
- [5] Li, C.C., Stjern, G., & Myrvang, A. A review on the performance of conventional and energy-absorbing rockbolts. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. 2014. 6(4), 315-327.
- [6] Scott, J. A new innovation in rock support – friction rock stabilizers. Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum. 1980. 73, 65 – 69.
- [7] Patent № 63142198A 2, MPK F16B13/1 Fixing method for steel pipe lock bolts / Kenju K., Daigo M., Hirohisa I. (Japan). – JP28723586A; Priority 1986-12-02, Publication. 1988-06-14.

УДК 622.235

М.І. Бельтек, аспірант,
О.В. Ган, к.т.н., ст. викладач
О.О. Фролов, д.т.н, професор.

*Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Україна*

ВПЛИВ ТРИЩИНУВАТОСТІ ГІРСЬКОГО МАСИВУ НА ЕФЕКТИВНІСТЬ ЙОГО РУЙНУВАННЯ ВИБУХОМ

*За результатами моделювання в ANSYS AUTODYN вибуху свердловинного заряду
Анемікс 70 в гранітах Пинязевицького родовища отримані епюри руйнувань гірського масиву*

з різним значенням коефіцієнту зниження міцності. Отримана графічна залежність максимального радіусу зони руйнування від коефіцієнту зниження міцності.

Ключові слова: гірський масив, вибух, ANSYS AUTODYN, модуль тріщинуватості, циліндричний заряд, радіус зони руйнування.

By results of modeling in ANSYS AUTODYN of explosion of borehole charge Anemix 70 in granites the epiphyses of destruction of rock massif with different value of coefficient of strength reduction are received. The graphical dependence of the maximum radius of the fracture zone on the strength reduction factor is constructed.

Key words: rock massif, explosion, ANSYS AUTODYN, fracture modulus, cylindrical charge, radius of fracture zone.

Вступ. Скельні гірські масиви в переважній більшості є тріщинуватими. Цілком природно, що при вибуху вони розвалюються за вже наявними тріщинами і лише обмежений об'єм масиву, який безпосередньо прилягає до заряду, піддається руйнуванню на шматки, менші за природні окремістості. Тому загальна ефективність вибуху залежить як від характеристик вибухової речовини (ВР) і природних фізико-механічних властивостей порід міцності, так і від ступеня порушеності гірського масиву тріщинами [1]. У зв'язку з цим, до промислового руйнування тріщинуватих скельних масивів вибухом циліндричних зарядів завжди була прикута значна увага науковців, а виявлення закономірностей зміни параметрів зон дроблення для різних гірничо-геологічних умов становила важливу наукову та інженерно-технічну задачу.

Аналіз наукових досліджень з проблем руйнування тріщинуватих гірських масивів показав різноманітність підходів щодо врахування показників тріщинуватості у розрахунках параметрів вибухових робіт або характеристик, які впливають на результати вибуху. Це пов'язано, на думку авторів, з існуванням значної кількості факторів, які потрібно враховувати.

Мета та завдання. Мета представлених наукових досліджень полягає у встановленні впливу тріщинуватості скельного масиву на ефективність його вибухового руйнування, а саме на максимальний радіус зони вибухового дроблення. Завданням роботи є виявити закономірності між ступенем тріщинуватості та результатами дроблення скельного масиву шляхом моделювання в ANSYS AUTODYN для певних гірничо-технологічних умов

Матеріали та результати досліджень. Існуючі сучасні пакети прикладних програм надають можливість для комп'ютерного моделювання процесу руйнування скельних гірських порід вибухом подовженого заряду ВР. Це дозволяє виявити закономірності і оцінити характер руйнування залежно від властивостей гірського масиву та характеристик застосовуваних ВР. Одним з таких програмних продуктів є ANSYS AUTODYN, використання якого дозволяє достовірно передбачати поведінку об'єкту дослідження на всіх етапах дії вибуху. Також, як підтверджує накопичений досвід застосування цього продукту, він найповніше відображає фізику досліджуваного процесу.

Однак проблема полягає в тому, що достовірно змодельовати процес вибухового руйнування тріщинуватого гірському масиву надзвичайно складно,

оскільки практично неможливо виявити просторове розташування усіх тріщин та їх параметри в реальному масиві. У зв'язку з цим, врахування впливу ступеню тріщинуватості скельного масиву на параметри зони руйнування при вибуховій дії свердловинного заряду ВР, зокрема на максимальний радіус дроблення, пропонується здійснити через показник зниження міцності скельного масиву, який безпосередньо пов'язаний з тріщинуватістю [2]:

$$K_{\text{сп}} = 1 - 0,2021K_T + 0,0203K_T^2 - 0,0007K_T^3, \quad (1)$$

де $K_{\text{сп}}$ – коефіцієнт зниження міцності масиву; K_T – модуль тріщинуватості.

Таким чином, при введенні в ANSYS AUTODYN вихідних характеристик гірської породи, ми маємо можливість через коефіцієнт зниження міцності $K_{\text{сп}}$ задавати фактичну міцність досліджуваного гірського масиву, а чисельні значення $K_{\text{сп}}$ визначати модулем тріщинуватості.

В якості об'єкта досліджень обрано гірський масив Пинязевицького родовища гранітів, який руйнується вибуховою речовиною Анемікс 70. Діаметр свердловинного заряду становить 200 мм, загальна довжина модельованої свердловини дорівнює 3,0 м, а довжина заряду – 2,0 м, довжина забивки – 1,0 м.

Фізико-механічні характеристики граніту Пинязевицького кар'єру в лабораторному зразку наступні: об'ємна вага породи – 2600 т/м³; швидкість поширення повздовжніх хвиль напружень – 2920 м/с; модуль пружності – $1,7 \cdot 10^{10}$ Па; модуль пружності – $1,7 \cdot 10^7$ кПа; критичне значення напруження руйнування на стиснення – $1,6 \cdot 10^8$ Па; критичне значення напруження руйнування на розтягнення – $1,6 \cdot 10^7$ Па; критичне значення напруження руйнування на зсув – $3,04 \cdot 10^7$ Па; коефіцієнт Пуасона – 0,19.

Моделювання дії вибуху свердловинного заряду ВР спочатку виконано для ідеального масиву, тобто при $K_{\text{сп}} = 1,0$, а потім – для масивів гірських порід нижчими за міцністю, тобто зі значеннями $K_{\text{сп}} = 0,9$ і менше, а саме від ідеального за міцністю граніту до максимально структурно ослабленого гірського масиву (рис. 1) [2].

Аналіз епюр руйнувань показує суттєве збільшення розмірів зони руйнування максимально структурно ослабленого гірського масиву (рис. 1, *i*) у порівнянні з зоною руйнування гранітів лабораторного зразка (рис. 1, *a*). Зокрема, максимальне значення радіусу зони руйнування ідеального гірського масиву ($K_{\text{сп}}=1,0$) в 2,15 рази менше, ніж значення найслабшого масиву ($K_{\text{сп}}=0,1$) (табл. 1).

Таблиця 1 – Максимальні значення радіусів зон руйнування гірського масиву R_{max} залежно від коефіцієнта зниження міцності $K_{\text{сп}}$

$K_{\text{сп}}$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
$R_{\text{max}}, \text{ м}$	3,91	3,44	3,03	2,70	2,45	2,27	2,12	2,0	1,90	1,82

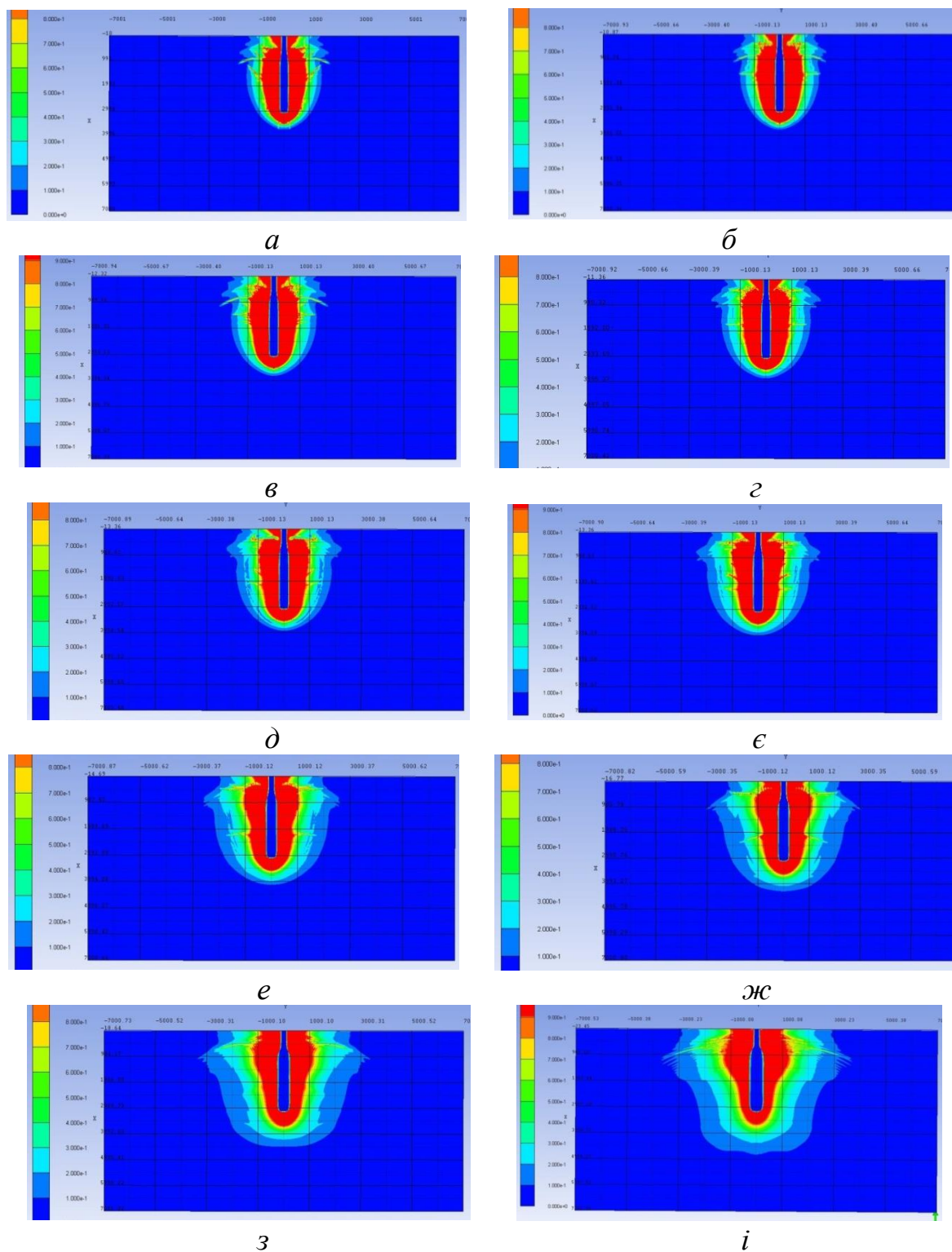


Рисунок 1 – Епюри руйнувань гірського масиву при різних значеннях $K_{сп}$:
 $a - 1,0$; $б - 0,9$; $в - 0,8$; $г - 0,7$; $д - 0,6$; $е - 0,5$; $е - 0,4$; $ж - 0,3$; $з - 0,2$; $і - 0,1$

Відповідно до наведених значень, побудовано графік залежності максимального значення радіуса зони руйнування R_{max} від коефіцієнту зниження міцності $K_{сп}$ гірського масиву Пинязевицького родовища гранітів (рис. 2).

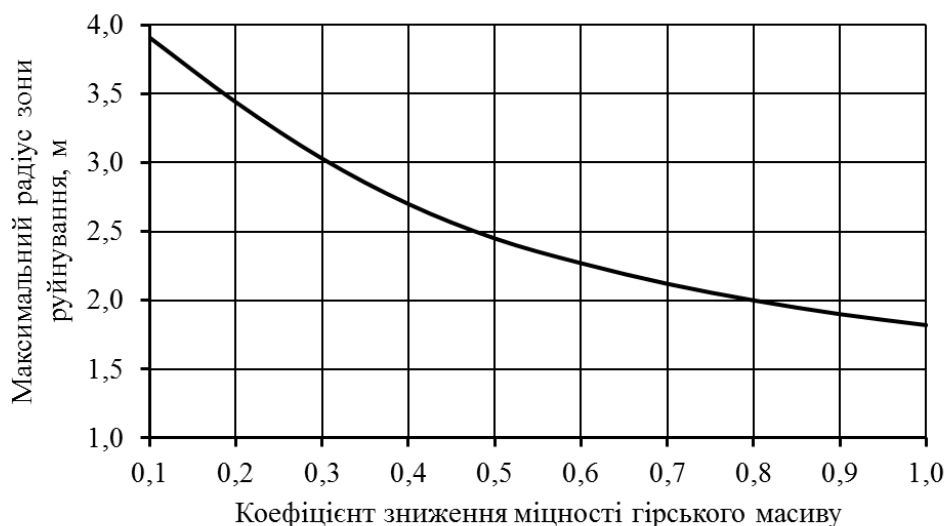


Рисунок 2 – Значення максимального радіуса зони руйнування R_{max} від коефіцієнту зниження міцності $K_{сп}$ гірського масиву

Представлена на рис. 2 графічна залежність апроксимується наступним чином:

$$R_{max} = -1,9483K_{сп}^3 + 5,7488 K_{сп}^2 - 6,492 K_{сп} + 4,5107. \quad (2)$$

Як було зазначено вище, коефіцієнт зниження міцності $K_{сп}$ узагальнив в собі дослідження вітчизняних та закордонних вчених щодо впливу тріщинуватості на загальну міцність гірського масиву, а визначення його рекомендовано виконувати за формулою (1), виходячи зі значення модуля тріщинуватості K_T . Отже, якщо у (2) замість $K_{сп}$ підставити формулу (1), то отримаємо залежність максимального значення радіусу зони руйнування R_{max} від модуля тріщинуватості.

В табл. 2 представлені розрахункові значення цієї залежності, на підставі якої побудована графічна залежність (рис. 3).

Таблиця 2 – Значення максимальних радіусів руйнування гірського масиву при різному модулі тріщинуватості

K_T	0	1	2	3	4	5	6	7
$R_{max}, м^3$	1,82	1,98	2,15	2,34	2,52	2,68	2,81	2,89
K_T	8	9	10	11	12	13	14	15
$R_{max}, м^3$	2,94	2,97	3,00	3,02	3,07	3,16	3,30	3,55

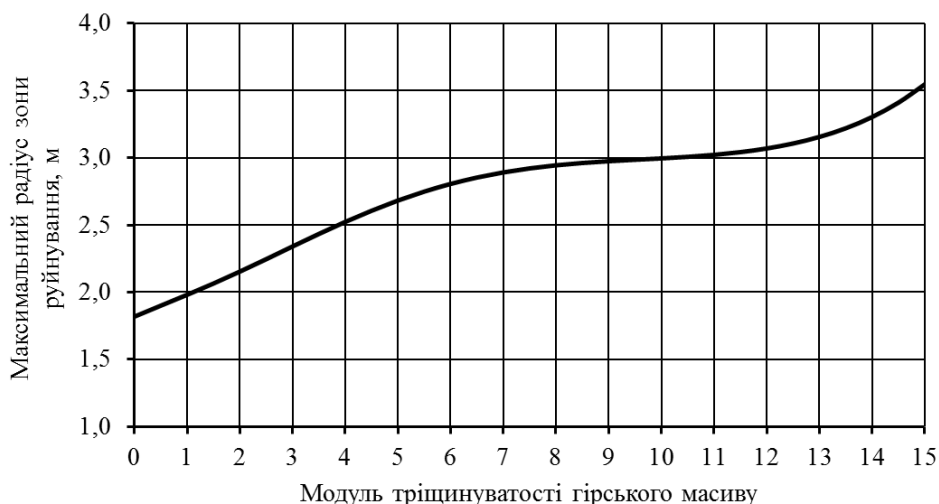


Рисунок 3 – Графічна залежність максимального радіуса зони руйнування R_{max} від модуля тріщинуватості K_T для умов Пинязевицького родовища гранітів

Графічна залежність рис. 3 найбільш достовірно описується аналітично наступним поліномом:

$$R_{max} = 0,0002 K_T^4 - 0,0043 K_T^3 + 0,0234 K_T^2 + 0,1406 K_T + 1,8182. \quad (3)$$

Висновки. При моделюванні в ANSYS AUTODYN отримані епюри руйнувань гірського масиву з різним значенням коефіцієнту зниження міцності $K_{сп}$. Відповідно до представлених даних побудована графічна залежність радіусу зони руйнування R_{max} від коефіцієнту зниження міцності $K_{сп}$.

Встановлено, що максимальний радіус зони руйнування ідеального масиву ($K_{сп}=1,0$) в 2,15 рази менше за радіус руйнування найслабшого масиву ($K_{сп}=0,1$).

Використовуючи аналітичний вираз з визначення коефіцієнту $K_{сп}$ залежно від модуля тріщинуватості K_T , отримані розрахункові дані максимальних радіусів зон руйнування R_{max} при різних значеннях K_T , за якими побудована відповідна графічна залежність. Отримано, що для монолітного масиву максимальне значення радіусу зони руйнування становить 1,82 м, а для сильнотріщинуватого ($K_T=10$) – $R_{max}=3,0$ м, тобто зростає у 1,65 рази.

Список використаної літератури

[1] О.О. Фролов, В.Т. Моденко «Сучасний стан досліджень механізму руйнування тріщинуватих скельних гірських масивів вибухом». *Матеріали II Міжнародної науково-технічної інтернет-конференції «Інноваційний розвиток гірничодобувної галузі»*, ДВНЗ «КНУ», с.17–18, 2017.

<https://www.knu.edu.ua/storage/files/2/Наука/Конференції/розвиток%202017/tezu.pdf>

[2] М.І. Бельтек, О.В. Ган, О.О. Фролов, «Моделювання процесу вибухового руйнування гірських масивів різної міцності в ANSYS AUTODYN». *Збірник наукових праць НГУ*, №78, с.18-29, 2024.

<https://doi.org/10.33271/crpnmu/78.018>

УДК 622.7+628.4

Т.А. Олійник, д.т.н., професор

Н.В. Кушнірук, к.т.н., доцент

Криворізький національний університет, Кривий Ріг, Україна

К.А. Левченко, к.т.н., доцент

ТОВ «Технічний університет «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА», м.Запоріжжя, Україна

ВІДХОДИ ГІРНИЧО-МЕТАЛУРГІЙНОГО КОМПЛЕКСУ ЯК РЕЗЕРВ ПРОМИСЛОВОГО ВИРОБНИЦТВА: СТАН І ПЕРСПЕКТИВИ

Розглянуто перспективи використання відходів гірничо-металургійного комплексу як додаткового джерела мінеральної сировини. Наведено результати досліджень матеріалів ПівдГЗК, запропоновано технологічні рішення для їх переробки та окреслено основні виклики.

Ключові слова: *промислові відходи, вторинна сировина, переробка, екологічна безпека.*

The prospects for using industrial waste from the mining and metallurgical complex as an additional source of mineral raw materials are considered. The results of studies on materials from the Southern Mining and Processing Plant are presented, technological solutions for their processing are proposed, and the main challenges are outlined.

Keywords: *industrial waste, secondary raw materials, processing, environmental safety.*

Вступ. Проблема раціонального використання мінерально-сировинних ресурсів на сучасному етапі розвитку національної економіки є надзвичайно актуальною. Зростання світової економіки та збільшення обсягів споживання ресурсів призводять до виснаження природних запасів і посилення негативного впливу на довкілля. У зв'язку з цим важливим напрямом є залучення до виробництва техногенних родовищ — відходів поточного виробництва або раніше накопичених, що можуть розглядатися як джерело додаткової сировини.

Науковці та фахівці у сфері природокористування дедалі більше уваги приділяють вивченню можливостей вторинного використання техногенних утворень [1]. Зокрема, наголошується, що експлуатація техногенних родовищ є одним зі шляхів підвищення ефективності виробничої діяльності та зниження екологічних ризиків [2]. У контексті післявоєнного відновлення економіки України та переходу до циркулярної економіки актуальним стає запровадження системного підходу до управління промисловими відходами, що підтверджується результатами сучасних досліджень [3,4]. Також вказується на необхідність впровадження екологічно безпечних методів утилізації техногенної сировини та розробки відповідного правового механізму [5].

Всупереч наявності певного досвіду в переробленні промислових відходів, значна кількість техногенних ресурсів залишаються неутілізовані. Це зумовлює потребу в поглибленому вивченні складу, властивостей і потенціалу таких матеріалів, а також у розробці нових технологічних рішень для їх ефективного залучення у виробництво.

Мета та завдання. Метою дослідження є оцінка можливостей повторного використання техногенної сировини Південного гірничозбагачувального комбінату та розробка технологічних рішень щодо її ефективної переробки.

Основні завдання:

- дослідити мінералогічний склад заскладованих «хвости» мокрої магнітної сепарації та розкритих порід;
- розробити технологічну схему отримання нових видів товарної продукції;
- оцінити ефективність запропонованих технологій;
- визначити ключові виклики та перспективи використання техногенної сировини.

Матеріали та результати досліджень. У межах дослідження було проаналізовано декілька типів техногенної сировини, зокрема заскладовані відходи мокрої магнітної сепарації магнетитових кварцитів на Південному гірничо-збагачувальному комбінаті. Результати вивчення їхнього мінералогічного складу показали, що основним компонентом є кварц (приблизно 64%), залізовмісні мінерали становлять близько 30%, решта – інші мінерали [5].

Первинна спроба використання цієї сировини була пов'язана з отриманням залізорудного концентрату. Однак через невеликий вихід кінцевого продукту (до 10%) та високу собівартість у порівнянні з природними джерелами, цей напрям виявився економічно недоцільним. У результаті увагу було зосереджено на альтернативному підході – вилученні кварцових "легких пісків", які можуть слугувати наповнювачами при виробництві бетонів.

Технологічна схема переробки включає послідовні операції грохочення з відсівом фракції понад 1 мм, гідрокласифікацію подрешітного продукту за граничним зерном 0,05 мм та магнітну сепарацію у слабкому та сильному магнітних полях. Очікуваний вихід легких кварцових пісків становить близько 5 %. Ефективність процесу за критерієм Хенкока-Луйкена при збагаченні на залізо склала 3,06 %, що є недостатнім для металургійного використання. Водночас при оцінці ефективності процесу з погляду отримання кварцового продукту значення досягає 96,94 %, що свідчить про високий потенціал цього напрямку переробки.

Ще одним об'єктом дослідження стали розкриті породи, заскладовані у відвалах Скелеватського магнетитового родовища. Проведені хімічні та мінералогічні аналізи підтвердили доцільність їх використання як сировини для виробництва будівельного щебеню. У межах дослідження було розроблено технологічну схему, яка дозволяє перетворити ці відходи на товарну продукцію з будівельним призначенням.

Вказані дослідницькі роботи проводилися відповідно до завдань Міської екологічної програми на 2016-2025 роки м. Кривий Ріг. Особливу увагу в межах цієї програми приділяється питанням поводження з промисловими відходами, охорони навколишнього природного середовища та раціонального використання надр із врахуванням усіх наявних корисних компонентів.

Попри наявний потенціал, використання техногенних відходів супроводжується низкою проблем:

- висока собівартість транспортування та переробки;
- варіативність і нестабільна якість сировини;
- недосконалість правового регулювання.

З метою подолання цих бар'єрів доцільно:

- розробляти нові, економічно ефективні технології переробки;
- впроваджувати стандарти складування та первинного сортування відходів;
- удосконалювати законодавчу базу у сфері поводження з техногенними ресурсами;
- посилювати фінансування наукових досліджень у цій сфері.

Висновки. Використання техногенної сировини є перспективним напрямом, що сприяє зниженню екологічного навантаження, збереженню природних ресурсів та розвитку інноваційної промисловості. Досвід Південного гірничо-збагачувального комбінату переконливо демонструє, що за наявності відповідних технологічних рішень відходи можуть перетворюватися на цінну товарну продукцію. Водночас для повноцінної реалізації потенціалу техногенних родовищ необхідно подолати низку бар'єрів економічного, технологічного та правового характеру.

У зв'язку з цим доцільним є запровадження державних програм підтримки підприємств, що займаються переробкою техногенних ресурсів, а також стимулювання наукових досліджень, спрямованих на удосконалення відповідних технологій. Окрім того, важливо сприяти розвитку нормативно-правової бази, яка забезпечить комплексний підхід до використання техногенних родовищ, з урахуванням усіх наявних корисних компонентів.

Список використаної літератури

- [1] Лежнін К. В. Екологічно безпечні методи утилізації промислових відходів в Україні. Наукові записки Львівського університету бізнесу та права. 2024. № 42. С. 393–399.
- [2] Григорак М., Захарченко О., Гармаш О., Трушкіна Н., Лунов Л. Інфраструктурне забезпечення управління промисловими відходами в контексті стратегії відновлення національної економіки України. Інтелектуалізація логістики та управління ланцюгами постачання. 2022. Т. 15. С. 19–35.
- [3] Shpak N., Kuzmin O., Melnyk O., Ruda M., Sroka W. Implementation of a Circular Economy in Ukraine: The Context of European Integration. Resources. 2020. Vol. 9, No. 8. Article 96. DOI: <https://doi.org/10.3390/resources9080096MDPI>
- [4] Kozlovskaya I., Shtal T., Kovalchuk O., Kovalchuk Y. Industrial waste management on example of Ukraine in the light of European integration. Technology Audit and Production Reserves. 2021. No. 2(58). P. 6–9. DOI: <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2021.246399>
- [5] Кушнірук Н. В. Комплексне використання мінеральної сировини родовищ ПрАТ «ПівнігЗК» / Н. В. Кушнірук // Збагачення корисних копалин. – 2016. – № 64(105). – С. 64–70.

УДК 622.271

А.О. Остапчук, аспірант,
О.О. Фролов, д.т.н, професор,
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Україна

ДОСЛІДЖЕННЯ СТІЙКОСТІ БОРТА КАР'ЄРА ПРИ ВИДОБУТКУ ПРИБОРТОВИХ ЗАПАСІВ НЕПЕРЕКРИСТАЛІЗОВАНИХ ВАПНЯКІВ

Встановлена можливість виймання прибортових запасів неперекристалізованих вапняків Гуменецького родовища шнековою гірничо-видобувною системою. За результатами чисельного моделювання в PLAXIS побудовано графічну залежність зміни значень вертикальних осідань поверхні гірського масиву від відстані між виробками в борту кар'єра та встановлена відповідна аналітична залежність.

Ключові слова: прибортові запаси вапняку, кар'єр, моделювання, шнековий видобувний комплекс, вертикальне осідання поверхні.

The possibility of excavation of instrumental reserves of non-transcrystallized limestone of Gumenets deposit by auger mining system has been established. By results of numerical modeling in PLAXIS the graphical dependence of change of values of vertical precipitation of a rock mass surface on distance between workings in a side of a quarry is constructed and the corresponding analytical dependence is established.

Key words: instrumental limestone reserves, quarry, modeling, auger mining complex, vertical surface settlement.

Вступ. Після відпрацювання родовищ корисних копалин в межах ліцензійної площі, за граничними контурами кар'єрів залишаються значні запаси, які можна доопрацювати підземним або комбінованим способом. Однак при цьому можуть виникнути складнощі при проектуванні технології і послідуочій виїмці прибортових запасів, оскільки їхнє відпрацювання безсумнівно викликає порушення стійкості бортів кар'єрів. Тому вибір і обґрунтування технології виймання корисних копалин в бортах кар'єру є дуже важливим завданням, яке повинне забезпечувати ефективність та безпечність видобутку.

Слід зазначити, що в Україні ще немає достатнього досвіду у розробці відкритих родовищ в умовах підземних робіт. Використання наявних світових технологій розробки запасів прибортової зони в єдиному технологічному комплексі розробки корисних копалин залишаються не повністю реалізованими. У зв'язку з цим існують певні складнощі у розв'язанні геомеханічних проблем під час відпрацювання прибортових запасів кар'єрів, зокрема, у необхідності забезпечення стійкості бортів кар'єрів.

Світовий досвід використання комплексів безлюдної виїмки корисних копалин на кар'єрах показав, що шнекові гірничо-видобувні системи забезпечують більш високу стабільність гірничих виробок та стійкість підробленого борта кар'єру [1].

Напружений стан підробленого борту кар'єра у дуже складній формі залежить від багатьох факторів, у тому числі від розмірів і кількості підземних виробок. Принципову послідовність формування і розвитку напруженого стану гірського масиву дозволяють виявити сучасні комп'ютерні моделі [2].

В Україні існує значна кількість кар'єрів, в яких можливе виймання прибортових запасів корисних копалин. До них належать кар'єри з видобутку бурого вугілля, марганцевих руд, гіпсу, вапняку, горючих сланців, каоліну та ін. Тому геомеханічне обґрунтування можливості використання технології безлюдної виїмки корисних копалин в таких кар'єрах є актуальним.

Мета та завдання. З урахуванням вищенаведеної актуальності досліджень мета публікації полягає у дослідженні стійкості борта кар'єра при видобутку прибортових запасів неперекристалізованих вапняків Гуменецького родовища. Завданням досліджень є встановлення можливості розробки вапняку у борті кар'єра.

Матеріали та результати досліджень. Для виявлення можливості можливості підземної розробки прибортових запасів неперекристалізованих вапняків виконаємо моделювання поведінки борта кар'єра у програмному комплексі PLAXIS та визначимо величину вертикального осідання на поверхні борта в місці проведення видобувних робіт [2, 3].

Основні фізико-механічні властивості неперекристалізованих вапняків, які прийняті для розрахунків, наступні: середня об'ємна маса – 23 кН/м^3 ; модуль пружності (Юнга) – $2,23 \cdot 10^7 \text{ кН/м}^2$; коефіцієнт Пуасона – 0,3; щеплення породи – 200 кН/м^2 ; кут внутрішнього тертя – 31° .

Приймаємо тривимірну модель частини борта досліджуваного кар'єру висотою 30 м, шириною 25 м та глибиною 40 м.

Моделювання поведінки борта кар'єру під час виймання вапняку комплексом типу Highwall зі шнековим виконавчим органом діаметром 2,0 м виконано на глибину 40 м. При встановленні величини вертикального осідання гірського масиву, відстані між виймальними отворами приймалися наступні: 2,5; 2,0; 1,5; 1,0 та 0,5 м (рис. 1).

Вертикальне осідання поверхні борта кар'єру для зазначених відстаней між пройденими шнековими отворами наведено в табл. 1.

Таблиця 1 – Вертикальне зміщення поверхні борта кар'єру залежно від відстані між отворами

Відстань між виймальними отворами, м	2,5	2,0	1,5	1,0	0,5
Вертикального осідання поверхні борта, 10^{-3} м	0,02948	0,03156	0,03431	0,03846	0,05443

За наведеними вище табличними даними побудована графічна залежність зміни значень вертикальних осідань поверхні гірського масиву від відстані між

шнековими отворами в борту кар'єра Гуменецького родовища вапняків (рис. 2). Аналітично, цю залежність можна представити поліномом 3-го порядку:

$$\eta = 0,0849 - 0,0074d^3 + 0,041d^2 - 0,0802d, \quad (1)$$

де η – вертикальне осідання поверхні гірського масиву в місці прибортової розробки неперекристалізованих вапняків, 10^{-3} м; d – відстань між шнековими отворами (гірничими виробками), пройденими в борту кар'єра, м.

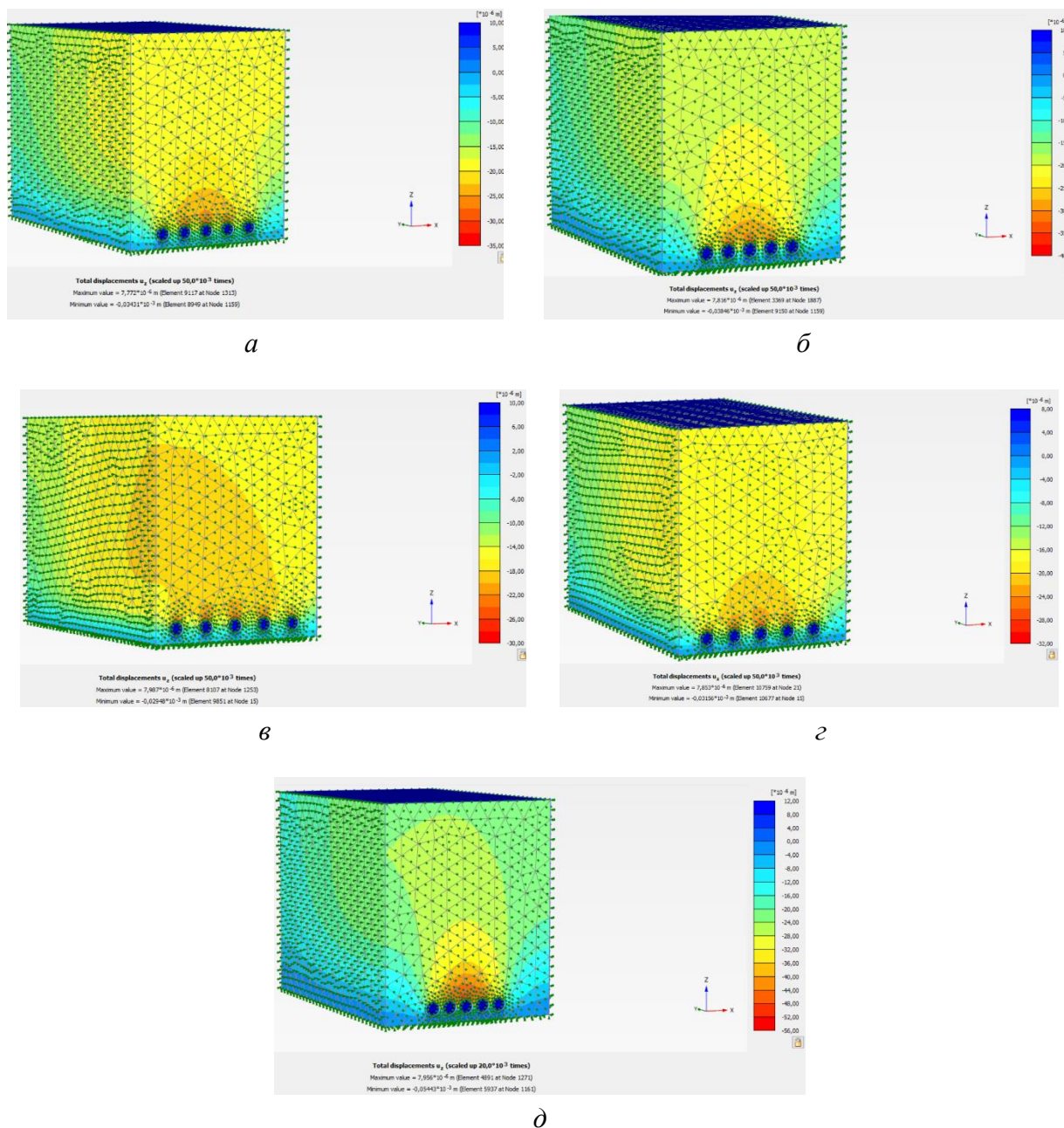


Рисунок 1 – Результати моделювання поведінки гірського масиву в борту кар'єру після виймання прибортових запасів шнековим виробками на відстанях:

a – 2,5 м; $б$ – 2,0 м; $в$ – 1,5 м; $г$ – 1,0 м; $д$ – 0,5 м

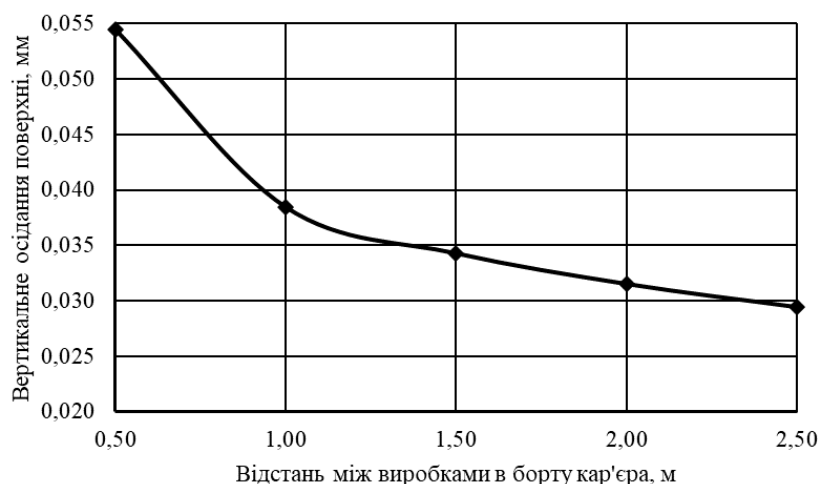


Рисунок 2 – Залежність величини зміни вертикальних осідань на поверхні гірського масиву від відстані між шнековими отворами в борту кар'єра

Отже, результати моделювання поведінки прибортового масиву показують, що, при будь-яких досліджуваних значеннях відстані між шнековими виробками, осідання земної поверхні майже не відбувається, а пройдені виробки є стійкими.

Висновки. Відповідно до проекту розробки Гуменецького родовища встановлена можливість виймання прибортових запасів неперекристалізованих вапняків шнековою гірничо-видобувною системою, яка забезпечує більш високу стабільність гірничих виробок та стійкість підробленого борта кар'єру.

Чисельне моделювання поведінки борта під час і після виймання вапняку комплексом зі шнековим виконавчим органом діаметром 2,0 м на глибину 40 м показало, що, при відстанях між виймальними отворами від 2,5 до 0,5 м, значення вертикальних осідань поверхні є незначними і змінюються в межах від 0,0295 до 0,0544 мм, тобто перевищення припустимого осідання в 15 мм не зафіксовано.

За результатами моделювання побудовано графік зміни чисельних значень вертикальних осідань масиву від відстані між отворами в борту кар'єра та отримана відповідна аналітична залежність.

Список використаної літератури

[1] А. О. Остапчук, І. Д. Литвинчук, О. О. Фролов, «Дослідження впливу параметрів виймання на стійкість гірських масивів при розробці прибортових запасів на кар'єрах», *Технічна інженерія*, № 2(92), с. 245-251, 2023.

[https://doi.org/10.26642/ten-2023-2\(92\)-245-251](https://doi.org/10.26642/ten-2023-2(92)-245-251)

[2] О.О. Фролов, І.К. Бабичев, І.В. Стецьків, О.М. Клеванин, «Моделювання пружно-пластичного деформування бортів кар'єру під час виймання прибортових запасів вугілля», *Вісник ЖДТУ*, №3(74), с. 148-154, 2015.

[3] І.В. Стецьків «Обґрунтування параметрів виймання запасів корисних копалин в бортах кар'єрів при розробці пластових родовищ»; магістерська дисертація, НТУУ «КПІ», 138 с, 2016.

УДК 622.2

В.В. Коробійчук, д.т.н, проф.

М.В. Качуровський, студент

В.О. Соколовський, студент

Державний університет «Житомирська політехніка»

ВПЛИВ ТЕХНОЛОГІЇ ВІДПРАЦЮВАННЯ РОЗВАЛУ ГІРСЬКОЇ ПОРОДИ НА РОЗМІРИ ТА ФОРМУ РОЗВАЛУ НЕГАБАРИТНОГО МАТЕРІАЛУ

Досліджено вплив технології відпрацювання гірської породи на форму та розміри розвалу негабаритного матеріалу. Проаналізовано роботу екскаватора ЕКГ-5, методи вибухової підготовки та геологічні фактори для оптимізації видобутку і підвищення продуктивності.

Ключові слова: відпрацювання гірської породи, негабаритний матеріал, екскаватор ЕКГ-5, вибухова підготовка, форма розвалу, розмір розвалу, видобуток

The study analyzes the impact of rock excavation technology on the shape and size of oversized material dumps. The operation of the EKG-5 excavator, blasting methods, and geological factors are examined to optimize extraction processes and improve productivity.

Key words: rock excavation, oversized material, EKG-5 excavator, blasting preparation, dump shape, dump size, mining

Вступ. Видобуток гірської породи супроводжується утворенням негабаритного матеріалу – великих шматків породи, які суттєво ускладнюють процес навантаження, транспортування та подальшої обробки. Неефективне управління розміром і формою цього матеріалу призводить до збільшення витрат часу та ресурсів на гірничі роботи, а також зниження продуктивності гірничодобувного комплексу [1–5].

Важливу роль у формуванні параметрів розвалу гірської породи відіграє технологія її відпрацювання, зокрема вибір та умови роботи екскаваторної техніки. Екскаватор ЕКГ-5, який широко використовується у багатьох кар'єрах, має певні технічні обмеження, що безпосередньо впливають на розмір та форму розвалу, а отже — на кількість і розмір негабаритних шматків.

Дослідження впливу технологічних факторів, таких як особливості роботи екскаватора, геологічні характеристики масиву та методи вибухової підготовки, є актуальним для оптимізації процесу відпрацювання гірської породи. Це дозволяє не лише зменшити вихід великих фракцій, а й підвищити загальну ефективність видобутку.

Метою даної роботи є комплексний аналіз впливу технології відпрацювання на розміри та форму розвалу негабаритного матеріалу з урахуванням технічних і геологічних чинників. Отримані результати можуть стати основою для практичних рекомендацій щодо покращення технологічних процесів у гірничодобувній галузі.

Матеріал і результати досліджень. В Україні найпоширенішим екскаватором для відпрацювання кар'єрів залишається екскаватор ЕКГ-5. Цей екскаватор оснащений ковшем об'ємом 5 м³ і призначений для виїмки гірської породи різної міцності та ступеня розробленості. Конструкція ЕКГ-5 характеризується відносною простотою і надійністю, що забезпечує високу продуктивність при роботі з великими обсягами матеріалу. Водночас технічні особливості машини, такі як обмежена маневреність через канатний механізм управління ковшем та відносно менша сила копання порівняно з сучасними гідравлічними екскаваторами, накладають певні обмеження на її ефективність. Це особливо позначається при взаємодії екскаватора з розвалом породи, де існують великі, негабаритні фрагменти, які перевищують габарити ковша і не можуть бути вилучені без додаткових операцій.

Розміри та форма негабаритних шматків гірської породи, що утворюються в процесі розвалу, є складним комплексом характеристик, які визначаються взаємодією геологічних, технологічних та технічних факторів. Головними факторами, що впливають на утворення негабаритного матеріалу, є:

- Міцність, тріщинуватість, щільність та інші фізико-механічні характеристики породи визначають її здатність до руйнування і дроблення при вибухових роботах. Так, тверді породи, як граніт або кварцити, через свою високу міцність і невелику кількість природних тріщин часто утворюють великі уламки — негабарити, які важко подрібнюються. Навпаки, слабкіші породи мають тенденцію до утворення більш дрібних фракцій, що полегшує їх обробку;
- Планування вибухових робіт включає правильний вибір розташування свердловин, їх глибини, набивку та енергію вибуху. Від точності цих параметрів залежить ефективність дроблення гірської породи. Неправильно розміщені або недостатньо підготовлені свердловини можуть спричинити нерівномірний розподіл енергії вибуху, що веде до утворення великої кількості негабаритних шматків, особливо в межах ближнього до масиву розвалу. Також надмірна щільність набивки вибухових свердловин збільшує товщину верхнього шару грубих фрагментів, які накривають розвал і ускладнюють подальше вилучення породи;
- Характеристики екскаватора, зокрема сила копання, об'єм ковша, радіус дії та маневреність, безпосередньо впливають на здатність ефективно вилучати негабаритний матеріал із розвалу. Для екскаватора ЕКГ-5, через канатний механізм, силові показники обмежені, що ускладнює вилучення великих шматків гірської породи без їх попереднього дроблення або додаткової механічної обробки. Через це на кар'єрах, де застосовується ЕКГ-5, часто виникає необхідність у організації вторинного дроблення або додаткових технологічних заходів для підвищення продуктивності.

Дослідження розвалу гірської породи свідчать про певні закономірності у формуванні негабаритного матеріалу. Найбільші шматки, як правило, утворюються на межі між розвалом і непорушеним масивом, де концентрація напружень максимальна і розрив породи відбувається нерівномірно. Ця зона

часто характеризується появою так званої «лінії найменшого опору», вздовж якої утворюються великі фрагменти породи, що складно відокремити та вилучити.

Грубіші фракції негабариту формують покрив, який накриває верхню частину розвалу. При цьому збільшення щільності набивки вибухових свердловин значно посилює товщину цього покривного шару, що ускладнює доступ екскаватора до нижчих шарів масиву.

Окрему увагу слід звернути на перший ряд свердловин, який має особливе значення в технології вибухової підготовки. Через більшу лінію найменшого опору підшви породи саме в цій зоні відбувається найбільш інтенсивне формування великих негабаритних шматків. Це призводить до накопичення матеріалу, який перевищує габарити ковша екскаватора, що ускладнює його вилучення та знижує ефективність робіт.

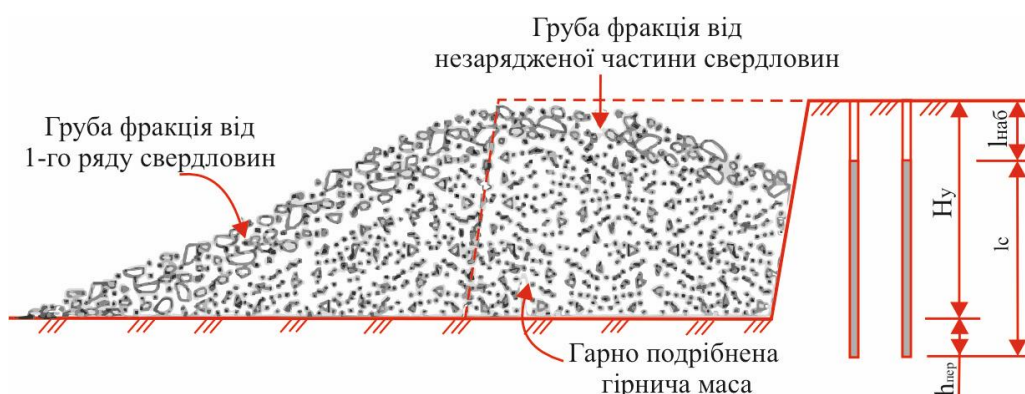


Рисунок 1 – Схема розподілу негабаритних шматків

Форма розвалу гірської породи безпосередньо залежить від обраної схеми виїмки та способу відпрацювання, які застосовуються під час роботи екскаватора ЕКГ-5. Через обмеження маневреності та специфіку роботи канатного механізму важливо забезпечити оптимальне позиціонування машини на робочому майданчику. Неправильне розташування екскаватора може призвести до нерівномірного формування розвалу, зокрема до скупчення великих негабаритних фрагментів у нижніх шарах розвалу. Це, в свою чергу, значно ускладнює подальшу виїмку матеріалу, збільшує час циклу роботи і знижує продуктивність.

Для уникнення таких проблем оптимальною є схема руху екскаватора, що передбачає послідовну обробку породи шарами, що сприяє формуванню більш рівномірного та структурованого розвалу. Такий підхід дозволяє контролювати як глибину, так і ширину розвалу, знижуючи ризик накопичення негабаритів у важкодоступних ділянках.

Вплив технології екскавації на форму і розміри розвалу можна проілюструвати на прикладі двох основних схем роботи ЕКГ-5: торцевого вибою та панельного відпрацювання (рис. 2 та рис. 3). Торцевий вибій передбачає послідовне оброблення розвалу, починаючи з його торцевої частини, що дає змогу більш ретельно контролювати глибину виїмки. Панельний метод, у свою чергу, включає розробку масиву вузькими або широкими заходками — вузькі заходки орієнтовані на оптимізацію руху автомобільного транспорту та скорочення часу циклу роботи екскаватора за рахунок зменшення кута його повороту. Однак зменшення ширини заходок збільшує їх кількість, що призводить до підвищення загального часу відпрацювання розвалу.

Типова форма розвалу і орієнтовні розміри, що утворюються при роботі екскаватора, відображені на розрізі А-А (рис. 2). Загальна ширина розвалу зазвичай варіюється від 45 до 75 метрів, а глибина і структура залежать від обраної схеми і параметрів відпрацювання.

Зазвичай розвал відбувається в кілька етапів — два, три або чотири — залежно від ширини торцевого вибою та розмірів масиву (рис. 2). Найчастіше застосовується триетапна схема, де обсяг розпушеної породи на першому етапі складає від 12 % до 18 % від загального обсягу. Другий і третій етапи розподіляють основну частку матеріалу, відповідно від 37 % до 43 % та від 42 % до 49 %. Такий розподіл обсягу породи за етапами дозволяє більш ефективно управляти розвалом, забезпечуючи поступове і рівномірне відпрацювання масиву.

Дані щодо гранулометричного складу підірваної гірничої маси наведені у табл. 1. Для визначення виходу негабаритних фрагментів одночасно застосовувався фотопланометричний метод, що дозволив провести кількісний аналіз розподілу фракцій за розміром. Результати цього аналізу свідчать про коливання виходу негабаритних шматків у межах від 4,5 % до 13 %, що залежить від особливостей вибухової підготовки та технології відпрацювання.

У всіх трьох блоках досліджуваної гірської маси найбільшу питому вагу займають дрібні та середні фракції розміром від 0 до 90 см. Зокрема, фракції 0–20 см і 21–40 см домінують у кожному блоці і сумарно складають близько 60–70 % від загальної маси. Це свідчить про те, що основна частина породи при вибуховій підготовці руйнується на досить дрібні шматки, які легко піддаються навантаженню і транспортуванню. Фракції понад 90 см (91–140 см, 140–170 см, 170–250 см) складають меншу частку – зазвичай від 4 % до 15 % залежно від блоку. Хоча їх питома вага невелика, ці великі шматки відіграють важливу роль у технологічному процесі, оскільки їх обробка вимагає додаткових зусиль та часу. Найбільші фракції (140–250 см) особливо ускладнюють роботу екскаватора через обмежені розміри ковша і силу копання.

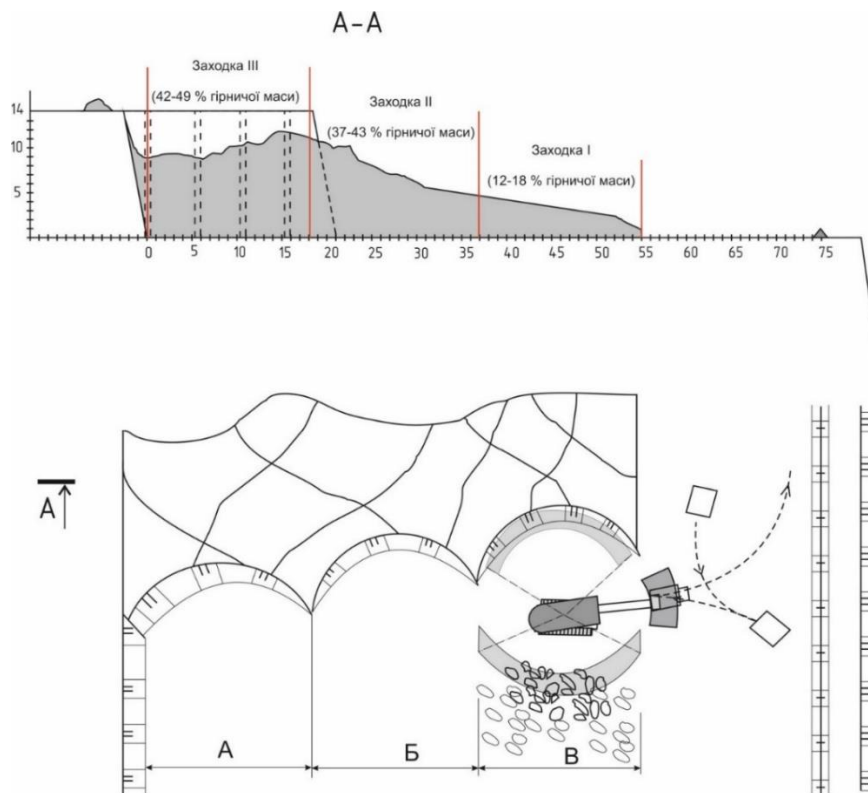


Рисунок 2 – Торцева заходка екскаватора при відпрацюванні розвалу гірської породи

Блок 1 характеризується більшою питомою вагою середніх фракцій (21–40 см і 61–90 см), що може свідчити про середню міцність породи і середній рівень вибухової підготовки. Блоки 2 і 3 мають більшу частку дрібних фракцій (0–20 см), що може вказувати на більш ефективне дроблення породи або меншу міцність гірської маси. Вихід великих фракцій (понад 140 см) у всіх блоках залишається на низькому рівні, але є більш помітним у блоці 1, що може свідчити про локальні особливості структури масиву або недостатню вибухову підготовку. Вихід негабариту у межах 4,5–13 % означає, що значна частина матеріалу потребує додаткової обробки – дроблення, розрізання або спеціальної механічної обробки.

Таблиця 1– Дані фракційного складу (%) здійснені фотопланометричним методом

№ блока	0–20 см	21–40 см	41–60 см	61–90 см	91–140 см	140–170 см	170–250 см
1	15,1	36,2	15,9	23,9	4,3	3,7	0,9
2	31,4	32,2	15,5	11,5	5,6	3,1	0,7
3	29,7	29,5	20,8	12,5	4,1	2,2	1,2

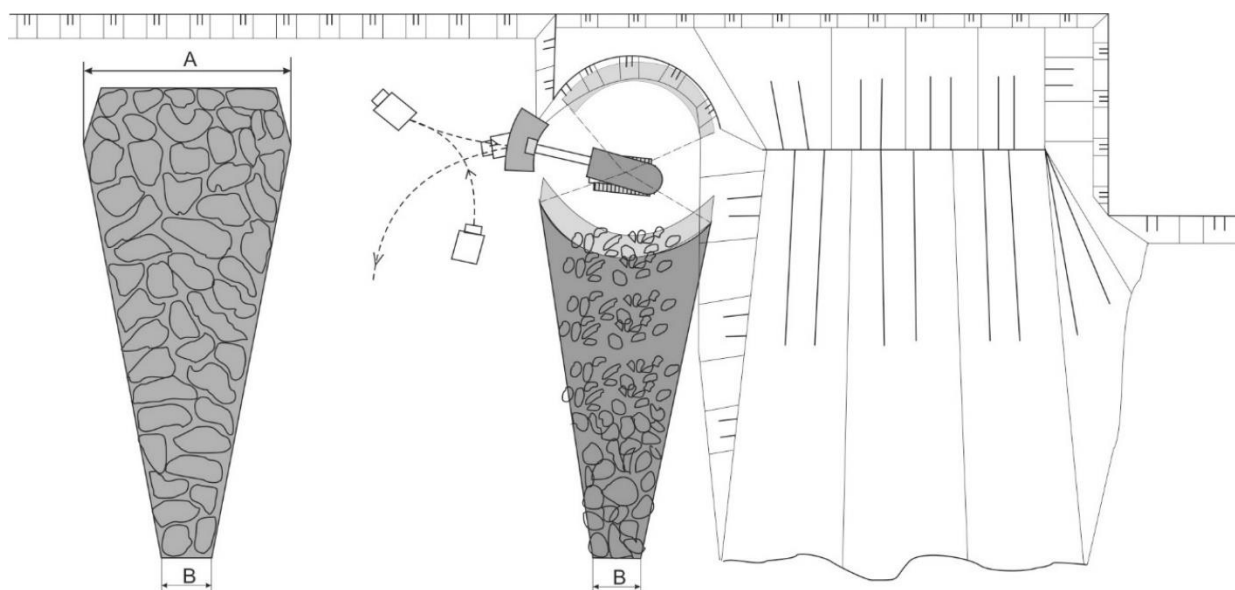


Рисунок 3 – Панельна схема відпрацювання розвалу гірської породи

У малих за розмірами кар'єрах відпрацювання гірської маси зазвичай здійснюється панельним способом. Негабаритні шматки при цьому укладаються у вигляді навалів безпосередньо поблизу екскаватора, що можна спостерігати, зокрема, на прикладі ТОВ «Труд» (рис. 4). Такий спосіб накопичення дозволяє зменшити відстань переміщення великих фрагментів породи і полегшити їх подальшу обробку.

При відпрацюванні вибою гірничої маси як торцевими заходками, так і панельним методом, негабаритні шматки можуть збиратися в один великий навал за допомогою бульдозера, який розташований неподалік від місця роботи екскаватора (рис. 5). Це забезпечує більш компактне розміщення зазначеного матеріалу та оптимізує організацію технологічного процесу на робочому майданчику.

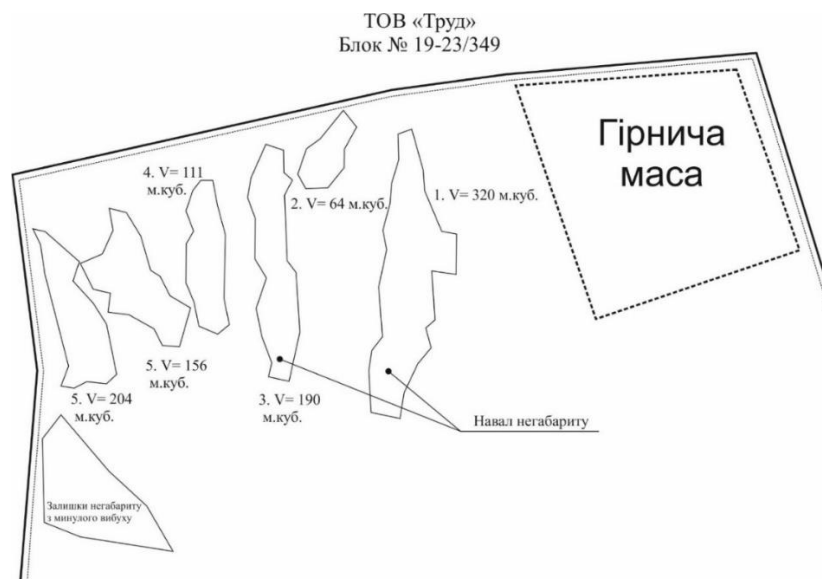


Рисунок 4 – Схема розміщення негабаритних шматків, при відпрацюванні вибою панельним способом

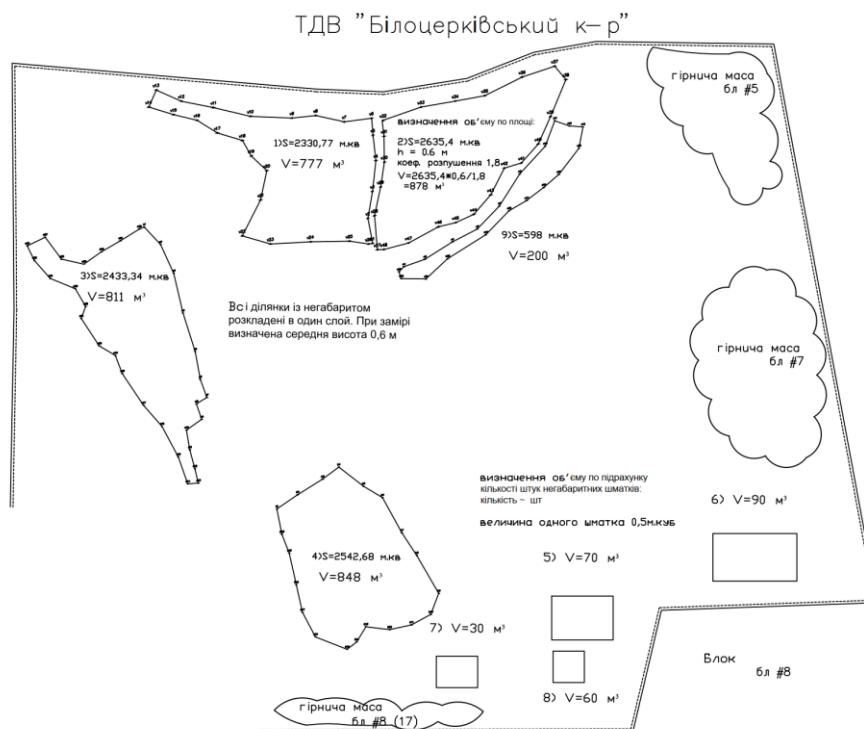


Рисунок 5 – Схема розміщення негабаритних шматків в одному навалі, шляхом переміщення бульдозером

Відповідно до отриманих даних, ширина розвалу негабаритних шматків, розташованих в один шар, коливається в межах, наведених на рис. 6. Ці значення залежать від типу відпрацювання та геометрії розвалу, а також від технічних характеристик екскаватора й способів накопичення матеріалу.

Рис. 6 показує залежність ширини розвалу негабаритних шматків гірської породи, розташованих в один шар, від ширини заходки екскаватора. На графіку ілюстровано, як зміна параметрів технології відпрацювання, зокрема ширини заходки (робочої ділянки екскаватора), впливає на геометричні характеристики розвалу.

З аналізу випливає, що ширина розвалу негабаритних матеріалів прямо залежить від ширини заходки екскаватора: збільшення ширини заходки призводить до зростання загальної ширини розвалу. Це пов'язано з тим, що ширша заходка дозволяє охопити більшу площу розробки за один цикл, що, відповідно, формує більш широкий розвал.

Цей показник є важливим для планування технологічного процесу, адже ширина розвалу впливає на умови вилучення породи, розміщення техніки та подальшу обробку матеріалу. Оптимальний вибір ширини заходки допомагає забезпечити рівномірне розміщення негабаритних шматків, що спрощує доступ екскаватора і зменшує ризик скупчення великих уламків у важкодоступних місцях.

Отже, рисунок 6 підтверджує, що технологічний параметр – ширина заходки екскаватора – є ключовим фактором, що визначає розмір і форму розвалу негабаритного матеріалу, а правильне його регулювання сприяє підвищенню ефективності відпрацювання гірської породи.

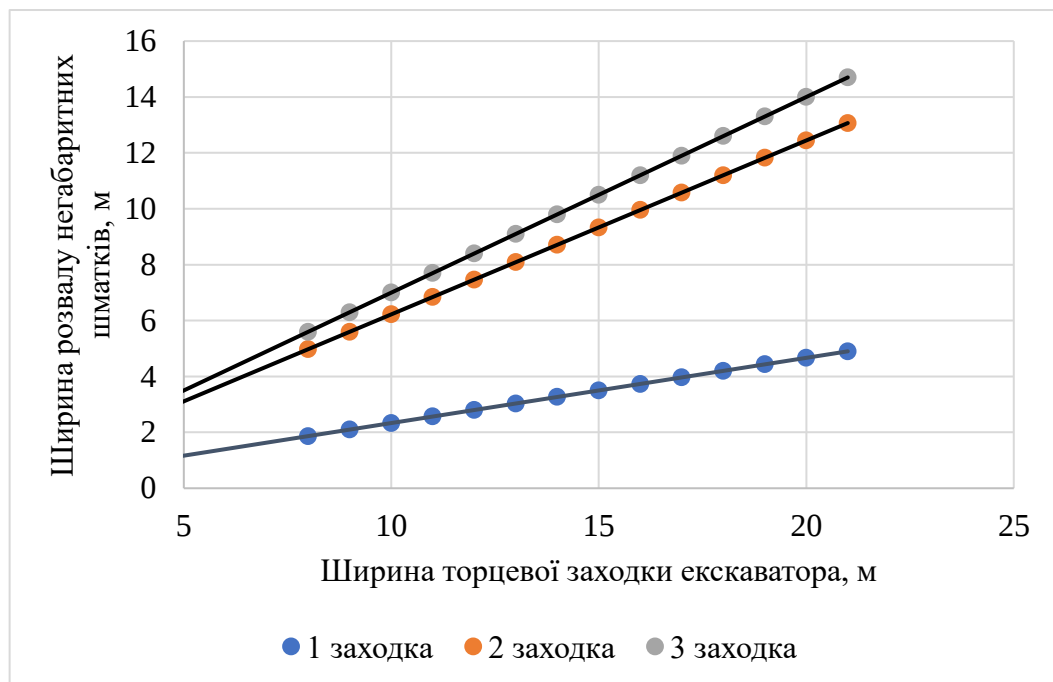


Рисунок 6 – Показники ширини розвалу гірської породи від ширини заходки екскаватора

Панельний метод відпрацювання широко застосовується на великих, просторих робочих майданчиках або при видобутку найнижчого горизонту кар'єру, де умови дозволяють екскаватору здійснювати послідовне і поступове

переміщення вздовж вибою. На відміну від торцевого методу, панельне відпрацювання забезпечує більш рівномірний розподіл навантаження на обладнання і дозволяє краще контролювати форму розвалу гірської породи.

Як видно з рис. 3, форма розвалу при застосуванні панельного методу має форму трапеції, при цьому ширина розвалу змінюється залежно від глибини просування екскаватора вглиб вибою. Важливо зазначити, що радіус вибою, тобто глибина самого вибою, не суттєво впливає на ширину розвалу негабариту, що свідчить про те, що цей параметр визначається в першу чергу параметрами заходки екскаватора і схемою його руху.

Показники ширини розвалу гірської породи у залежності від ширини заходки екскаватора при панельному відпрацюванні наведені на рис. 7. Ці дані ілюструють, що збільшення ширини заходки сприяє зростанню загальної ширини розвалу, що має важливе значення для планування робіт, зокрема для вибору оптимальної схеми відпрацювання з урахуванням типу використовуваної техніки та особливостей гірничого масиву.

Узагальнюючи, панельний метод дозволяє ефективно управляти формуванням розвалу, знижуючи вихід великих негабаритних фрагментів і покращуючи умови для подальшої виїмки породи екскаватором ЕКГ-5. Це забезпечує зменшення часу циклу роботи і підвищення загальної продуктивності виробництва, що є критично важливим для економічної ефективності гірничодобувних підприємств.

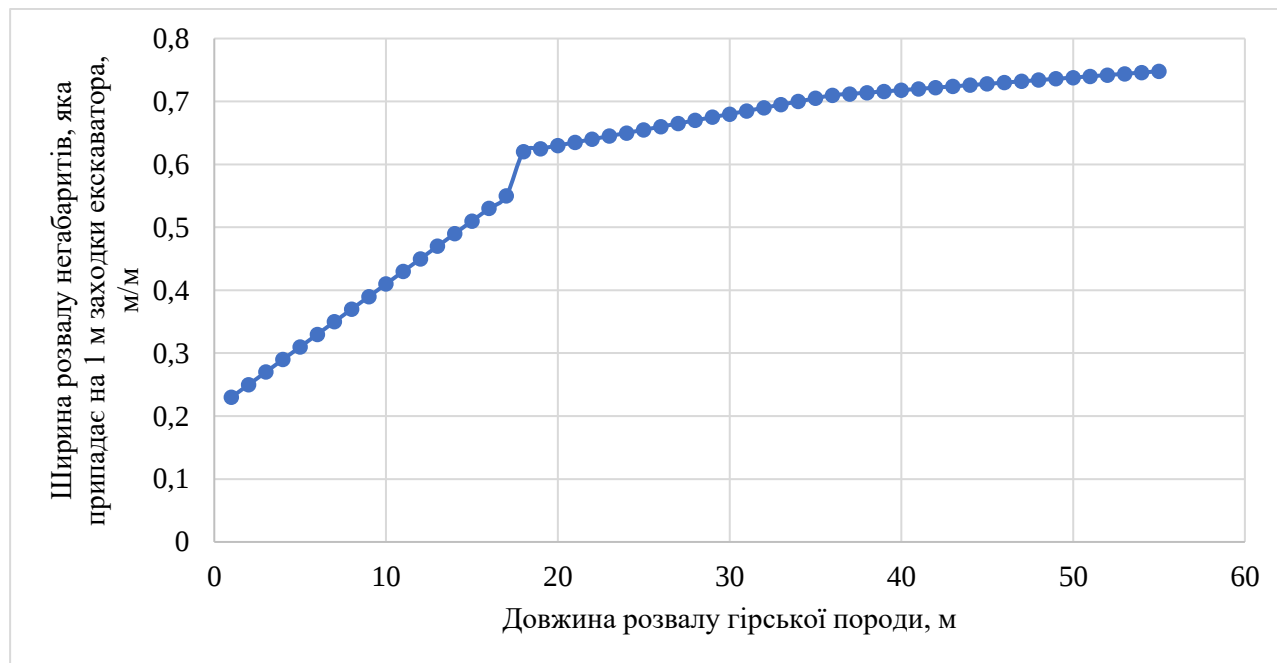


Рисунок 7 – Залежність ширини розвалу негабаритних шматків гірської породи, які припадають на 1 м ширини заходки від руху вибою екскаватора у глиб розвалу гірської породи

З графіка на рис. 7 видно, що ширина розвалу змінюється залежно від конкретного положення заходки екскаватора вздовж вибою. Це свідчить про те, що не лише ширина заходки, але й її розташування мають значення для формування розвалу. Форма розвалу при цьому набуває трапецієподібного вигляду, де ширина розвалу варіюється у міру просування екскаватора вглиб вибою.

Відповідно, графік на рис. 7 підтверджує, що планування роботи екскаватора має враховувати не тільки розмір заходки, а й її положення, щоб досягти оптимальної форми розвалу та ефективного управління негабаритним матеріалом. Це особливо актуально при використанні панельного методу відпрацювання, де поступовий рух екскаватора вздовж вибою визначає геометрію розвалу.

Висновки:

- Вихід негабаритних шматків гірської породи становить 4,5–13 %, що значно ускладнює їх вилучення.
- До 70 % матеріалу має розмір до 40 см, що сприяє швидкому навантаженню та транспортуванню.
- Ширина розвалу варіюється від 45 до 75 м і прямо залежить від ширини заходки екскаватора.
- Триетапне відпрацювання розподіляє обсяг породи: 12–18 % на першому, 37–43 % на другому, 42–49 % на третьому етапі, що забезпечує ефективний контроль розвалу.

Список використаної літератури

- [1] Ковалевич Л.А., Леонець І.В., Білобров Д.М., Качуровський М.В., Коробійчук В.В. Оцінка експлуатаційних параметрів Белаз-548 в умовах Омелянівського кар'єру. *Технічна інженерія*, № 1 (89), 2022. С 125-131.
- [2] Толкач, О. М., Коробійчук, В. В., Припотень, Ю. К., Панченко, Д. С. Дослідження впливу схеми роботи дробильно-сортувального заводу на кількісно-якісні показники продукції для наповнювачів бетонів. *Технічна інженерія*, 2024, (2(94)). С. 276–282. [https://doi.org/10.26642/ten-2024-2\(94\)-276-282](https://doi.org/10.26642/ten-2024-2(94)-276-282).
- [3] Коробійчук В.В., Підвисоцький В.Т., Шамрай В.І., Качуровський М.В., Соколовський В.О. Вплив технології відпрацювання розвалу гірської породи на розміри та форму розвалу негабариту. *Технічна інженерія*, 2022. Вип. 2(90). С. 147-152.
- [4] Коробійчук В.В., Темченко А.Г., Шамрай В.І., Іськов С.С., Дубінчук Б.В. Супутнє видобування блоків природного каменю в умовах щебеневого кар'єру. *Технічна інженерія*, 2022. Вип. 2 (90). С. 153-160.
- [5] Темченко А.Г., Темченко О.А., Коробійчук В.В., Шевчук Н.А., Піскун І.А.. Оцінка енергоефективності збагачуваності залізорудної сировини в умовах формування екоіндустріальних парків. *Технічна інженерія*, 2022. № 2 (90). С 170-182.

УДК 622.271

Д.А. Вилобков, студент,
О.О. Фролов, д.т.н, проф.
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Україна

АНАЛІЗ ТА ВИБІР СПОСОБІВ СПОРУДЖЕННЯ ГІРНИЧИХ ВИРОБОК ВЕЛИКОГО ПЕРЕРІЗУ В МІЦНИХ ПОРОДАХ

Встановлено, що під час вибору способу спорудження підземних виробок великого перерізу в міцних породах слід враховувати розміри споруди, інженерно-геологічні умови, призначення виробки, умови будівництва. Найважливішими критеріями щодо вибору способу спорудження є мінімальна вартість робіт та досягнуті показники продуктивності праці, а також швидкості спорудження виробки.

Ключові слова: гірничі виробки, великий переріз, спосіб проходки, вибій, гірський масив.

It has been established that when choosing the method of construction of large cross-section underground excavations in strong rocks it is necessary to take into account the size of the structure, engineering-geological conditions, purpose of excavation, construction conditions. The most important criteria for the choice of the construction method are the minimum cost of works and the achieved indicators of labor productivity, as well as the speed of excavation construction.

Key words: mine workings, large cross-section, sinking method, face, rock mass.

Вступ. У даний час у багатьох сферах промисловості значного поширення набуло розміщення в підземних виробках великого перерізу певних промислових об'єктів, зокрема, конвеєрних ліній, сховищ різного призначення, гаражів, складів тощо. Підземне розміщення цих об'єктів за сприятливих гірничо-геологічних умов є більш економічним і доцільним, ніж будівництво їх на поверхні.

Технологія спорудження підземних гірничих виробок великого перерізу має певну специфіку порівняно з виробками звичайного перерізу. Проходка їх є трудомістким процесом, який характеризується складністю виконання проектних та будівельних робіт. Технічний прогрес, повна механізація гірничо-прохідницьких робіт сприяють виникненню нових, більш ефективних способів спорудження виробок великого перерізу, а також спричиняють необхідність удосконалення вже відомих.

На сьогоднішній день застосовуються декілька технологій проходки виробок великого перерізу. Однак вони не завжди можуть бути найбільш ефективним варіантом щодо швидкості спорудження, безпеки виконання робіт та витрат на будівництво. Тому обґрунтування найефективніших технологічної схеми проходки та способу спорудження підземних виробок великого поперечного перерізу є актуальною інженерно-науковою задачею.

Мета та завдання. Зважаючи на вищезазначене, метою представлених досліджень є встановлення сфери застосування аналізованих способів

спорудження гірничих виробок великого перерізу в міцних породах. Завданням досліджень є визначення критеріїв вибору ефективного способу спорудження цих виробок.

Матеріали та результати досліджень. Основними способами спорудження виробки великого перерізу в міцних породах є наступні:

- суцільним вибоєм;
- з розподілом вибою на уступи;
- за допомогою направляючої штольні.

Також можливі їх комбінації та різноманітні варіанти.

Розглянемо більш детально кожен з основних зазначених способів.

Спорудження виробок суцільним вибоєм (рис. 1). Існують два види цього способу: спорудження виробок суцільним вибоєм на повний профіль і спорудження виробок суцільним вибоєм з уступним його профілем [3].



Рисунок 1 – Спорудження виробки суцільним вибоєм на повний переріз

Сутність способу *спорудження виробок суцільним вибоєм на повний профіль* полягає в тому, що вертикальну площину вибою обурюють повністю і після цього підривають, унаслідок чого, вибій посувається на одну заходку повним перерізом. Спосіб характеризується наступними перевагами:

- широкий фронт робіт, що дає змогу застосовувати потужне, високопродуктивне обладнання і досягати високих швидкостей спорудження тунелю;
- потужне, високопродуктивне прохідницьке обладнання, що створює сприятливі умови для використання глибоких шпурів, що сприяє досягненню високих техніко-економічних показників;
- проста організація робіт, що дає змогу дотримуватися циклічності робіт;
- менший обсяг допоміжних операцій, що значно здешевлює будівництво.

Спосіб спорудження виробок на повний профіль можна застосовувати лише в міцних монолітних або слаботріщинуватих породах. Він набув широкого поширення останнім часом у зв'язку з удосконаленням засобів механізації прохідницьких робіт. Нині більшість залізничних, автодорожніх і гідротехнічних тунелів перерізом до 90 м² у міцних породах споруджують на повний профіль.

Спорудження виробок суцільним вибоєм з уступним його профілем характеризується тим, що вибій зазвичай поділяють за висотою на дві частини (рис. 2). Співвідношення частин за висотою зазвичай приймається 1:1 [3]. Просування виробки проводиться шляхом одночасного підривання усіх шпурів верхньої частини і нижньої частин.

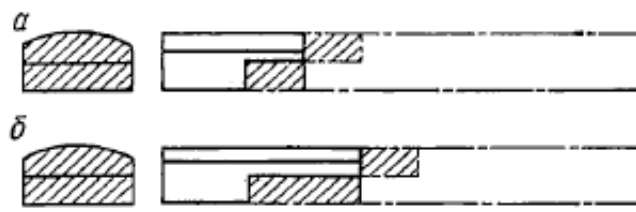


Рисунок 2 – Спорудження виробки суцільним вибоєм з уступним профілем

Найпоширеніший варіант, коли верхня частина вибою випереджає нижню (рис. 2, *а*). Верхню частину виробки в цьому разі обурюють бурильники, які перебувають на майданчику нижнього уступу. Нижню частину вибою обурюють із підосви виробки. Глибину шпурів приймають такою, щоб величина посування як у верхній, так і в нижній частині виробки була однаковою.

З урахуванням ефективнішої роботи шпурів нижнього уступу доцільно у верхній частині виробки робити два вибухи, у той час як у нижньому уступі робити один (рис. 2, *б*). Відповідно глибину шпурів нижнього уступу слід приймати в 2 рази більшою за глибину шпурів верхньої частини виробки [3].

До переваг цього способу спорудження належить відсутність потреби в важкому буровому обладнанні, можливість поєднання обурювання верхнього вибою з навантаженням породи, а також швидкого переходу до іншого способу у разі зустрічі слабких порід. Недоліками методу є неможливість використання потужного прохідницького обладнання, значна частка ручної праці і, як наслідок, низькі швидкості спорудження виробки.

Спосіб доцільно застосовувати під час спорудження виробок обмеженої довжини, коли не вигідно застосовувати великогабаритне бурове обладнання.

При спорудженні виробок із поділом вибою на уступи виділяють три основні види цього способу: спорудження виробок способом нижнього уступу; спорудження виробок способом верхнього уступу; спорудження виробок способом бічного уступу [3].

Сутність способу спорудження виробок способом нижнього уступу полягає в тому, що насамперед на всю довжину виробки або ділянки виробки проходять верхню частину перерізу, після чого розробляють нижній уступ. Співвідношення між площами уступів залежить від прийнятого гірничо-прохідницького обладнання та стійкості гірських порід [3].

Розробка верхньої частини виробки не відрізняється від спорудження виробки на повний профіль суцільним вибоєм. Для забезпечення робіт із розробки нижнього уступу споруджують або пандус із невеликим ухилом, або спеціальний під'їзний тунель, підосва якого збігається з підосвою виробки.

До переваг способу можна віднести: можливість спорудження виробки в породах, що потребують несучого кріплення, оскільки закріплюють склепіння безпосередньо після проведення верхньої частини перерізу; відсутність громіздкого бурового обладнання; можливість швидкого переходу до інших способів спорудження виробки

До недоліків способу належать: необхідність виконання двох самостійних прохідницьких циклів – для верхньої та окремо для нижньої частин тунелю, унаслідок чого збільшуються строки будівництва порівняно зі спорудженням виробки на повний переріз; необхідність влаштування доріг і комунікацій на обох горизонтах; наявність різнотипного устаткування.

Зазначений спосіб найдоцільніше застосовувати для спорудження виробок великої висоти і значної протяжності. Також він особливо ефективний у породах, що потребують кріплення покрівлі у гірничих виробках [3].

Спорудження виробок способом верхнього уступу. Сутність цього способу спорудження виробок полягає в тому, що спочатку на всю довжину виробки (ділянки виробки) проходять нижню частину перерізу, а потім розробляють верхній уступ. Співвідношення площ уступів приймають $S_H:S_B = 1:(1...1,5)$ [3].

Нижню частину перерізу розробляють способом суцільного вибою. Верхню частину тунелю обурюють або з відвалу породи, або з підосви виробки.

Перевагами цього способу є: відсутність потреби у важкому буровому устаткуванні; можливість отримання достовірних геологічних даних під час розробки нижньої частини; низька вартість вибухових робіт під час розробки верхньої частини перерізу внаслідок наявності другої оголеної поверхні; можливість поєднання навантаження породи з бурінням шпурів під час розробки верхнього уступу; ефективне відведення води у разі великого притоку.

До недоліків цього способу виконання робіт необхідно віднести: необхідність виконання двох самостійних прохідницьких циклів і пов'язані з цим більші втрати часу; небезпечність робіт під час буріння шпурів з відвалу породи; застосування способу лише в певних геологічних умовах.

Спорудження виробок способом верхнього уступу доцільно застосовувати під час будівництва виробок значної висоти та обмеженої довжини в міцних породах, що не потребують кріплення, коли економічно не вигідно застосовувати велике бурове устаткування [3].

Спорудження виробок способом бічного уступу. Сутність цього способу полягає в тому, що вибій виробки, що споруджується, поділять вертикальною площиною на дві або більше частин, причому кожен бічну частину розробляють способом суцільного вибою (рис. 3). Розробку однієї бічної частини перерізу можна починати після закінчення іншої, але частіше буває так, що роботи в обох частинах перерізу здійснюють одночасно, з відставанням однієї частини від іншої на декілька метрів або десятків метрів.

До переваг способу бічного уступу слід віднести відсутність необхідності громіздкого бурового устаткування під час спорудження виробок.

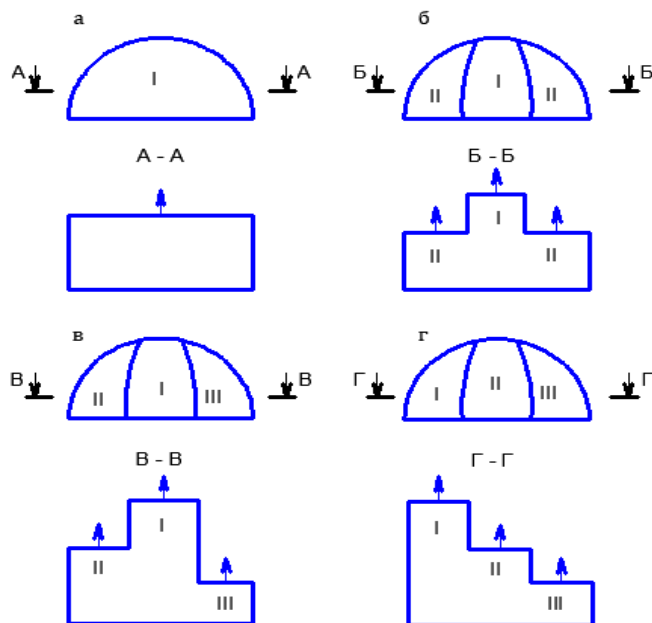


Рисунок 3 – Схеми розкриття камерних виробок: а – на повний переріз; б, в, г – з боковими уступами; I, II, III – черговість розробки уступів

Недоліком цього способу є необхідність виконання двох і більше прохідницьких циклів; обмеженість і складність дотримання циклічності робіт; складність суміщення основних операцій прохідницького циклу при одночасному веденні прохідницьких робіт у двох вибоях.

Спосіб бічного уступу найдоцільніше застосовувати під час спорудження виробок великої ширини, коли поділ перерізу на декілька бічних частин надасть змогу значно спростити виконання прохідницьких робіт [3].

Спорудження гірничих виробок за допомогою направляючої штольні з подальшим розширенням її до проектних розмірів може відбуватися за двома варіантами: з направляючою штольнею, що розташовується в центральній частині перерізу (рис. 4, а); з направляючою штольнею, що розташовується в нижній (або верхній) частині перерізу (рис. 4, б, в) [3].

Сутність способу спорудження виробок за допомогою направляючої штольні, розташованої в центральній частині перерізу, полягає в тому, що спочатку на всю довжину виробки або ділянки виробки в центрі її проводять штольню, після чого розширюють її до проектних розмірів гірничої виробки.

Направляючу штольню проводять з метою отримання даних про властивості порід, вміст ґрунтових вод, величину гірського тиску тощо.

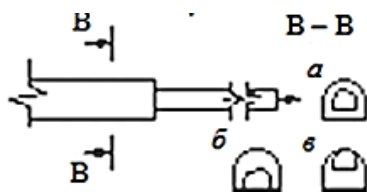


Рисунок 4 – Схеми спорудження виробок за допомогою направляючої штольні

Проведення направляючої штольні є коштовним технологічним процесом і тому розміри її приймаються мінімальними. Однак переріз її має бути таким, щоб він давав змогу розміщувати в ній обладнання і транспорт. Зазвичай площу перерізу штольні приймають 6-8 м². Розширення направляючої штольні до проектних розмірів виробки здійснюють буропідливним способом [3].

Застосування розглянутого способу для спорудження виробок великого перерізу має наступні переваги: можливість забезпечення надійної геологічної розвідки; гарну вентиляцію вибоїв, що є надзвичайно важливим під час спорудження виробок великої довжини; можливість одержання більших швидкостей спорудження виробки; повне поєднання процесів буріння шпурів та завантаження породи при розширенні штольні; можливості підривання за один цикл більших об'ємів гірської породи в штольні [3].

До недоліків способу належать: більша трудомісткість спорудження виробки внаслідок необхідності ведення робіт одразу в декількох вибоях; необхідність використання різнотипного устаткування; складність дотримання проектного контуру виробки; багаторазове перекладання комунікацій.

Спорудження виробок за допомогою направляючої штольні, розміщеної в центральній частині перерізу, найдоцільніше застосовувати під час спорудження виробок великої довжини в міцних породах, які не потребують зведення тимчасового кріплення.

Спорудження виробок за допомогою направляючої штольні, що розташовується в нижній частині перерізу. Цей спосіб виконання робіт відрізняється від розглянутого тим, що направляючу штольню розташовують у нижній частині перерізу виробки. Як показує практика, співвідношення площ перерізів напрямної штольні та власне виробки приймається 0,3...0,4:1 [3].

Роботи з розширення направляючої штольні можна проводити як після закінчення проведення її на всю довжину виробки, так і одночасно з її проведенням. Перевагами даного способу є можливість надійної геологічної розвідки; можливість застосування в породах зі змінними фізико-механічними властивостями; більшу ефективність буропідливних робіт у вибої розширення; відсутність потреби перекладати рейкових шляхів та пов'язаних з цим економії коштів порівняно з розташуванням направляючої штольні в центрі перерізу.

До недоліків методу відносять: більшу трудомісткість спорудження виробок; складність ув'язування основних операцій прохідницьких циклів під час проведення та розширення штольні; тривалі строки спорудження виробки під час розширення після закінчення проведення направляючої штольні.

Розглянутий спосіб найраціональніше застосовувати під час спорудження виробок у породах, що потребують детальної геологічної розвідки [3].

Висновки. Отже, під час вибору способу спорудження виробок великого перерізу в міцних породах слід враховувати фактори, що впливають на нього, а саме розміри перерізу, інженерно-геологічні умови, призначення виробки, умови будівництва тощо [1]. Надати однозначне рішення можна лише в дуже рідкісних випадках. Для більшості ж виробок, зокрема для спорудження транспортних

тунелів перерізом $S=40-100 \text{ м}^2$, для гідротехнічних тунелів до 300 м^2 у міцних породах (для виробок, де ширина та висота порівнянні), вибір найефективнішого способу видається нелегким завданням. Найважливішими критеріями ефективності способу є мінімальна вартість спорудження та досягнуті показники продуктивності праці, швидкості спорудження виробки тощо.

Аналізуючи переваги та недоліки кожного способу, можна дійти висновку, що здебільшого для спорудження вищевказаних гірничих виробок обирати доводиться між способом спорудження виробок суцільним вибоєм і способом спорудження виробок із поділом вибою на уступи. Спосіб спорудження виробок за допомогою направляючої штольні в сучасних умовах можна вважати вимушеним варіантом, який використовують тільки за необхідності надійної геологічної розвідки траси тунелю. Цілком очевидно, що подальший розвиток засобів горизонтального буріння обмежить застосування цього способу.

Список використаної літератури

[1] В.І. Петренко. «Розробка та обрунтування параметрів нових технологій проходки виробок великого перерізу в складних інженерно-геологічних умовах»; автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 05.15.04 "Шахтне та підземне будівництво". – Дніпропетровськ, 2000. – 17 с.

[2] Н.А. Євпак, Н.С. Сагало, О.О. Фролов. «Основні технологічні схеми та способи проходки підземних гірничих виробок великого перерізу». *Тези II Всеукраїнської науково-практичної конференції «Сучасні проблеми гірництва та будівництва»*, 21 листопада 2024 року, Житомирська політехніка, 2024.

[3] Н.А. Євпак «Спорудження похилої галереї підземного рудного комплексу з вибором технологічної схеми»; магістерська дисертація, КПІ ім. Ігоря Сікорського, –104 с., 2024.

УДК 622.23.05

Д. В. Литвинчук, студент,
А. С. Гаращук, студентка,
М. І. Сергієнко, ст. викладач,
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Україна

ЗАСТОСУВАННЯ НОВІТНЬОЇ БУРОВОЇ ТЕХНІКИ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ БУРОВИБУХОВИХ РОБІТ НА ГЕОТЕХНІЧНИХ ОБ'ЄКТАХ УКРАЇНИ

У статті проаналізовано техніко-економічні показники новітніх бурових верстатів, зокрема Atlas Copco та Atlas COPROD[®], які демонструють значне зростання продуктивності та зниження витрат на буріння. В роботі наведені результати розрахунків економічного ефекту від впровадження інноваційної бурової техніки, а також запропоновано оптимальні технологічні підходи до буріння в складних геологічних умовах.

Ключові слова: буровибухові роботи, бурова техніка, геотехнічні об'єкти, продуктивність, енергоефективність, Atlas Copco, економічна ефективність.

The article analyses the technical and economic performance of modern drilling rigs, such as Atlas Copco and Atlas COPROD®, which demonstrate significant increases in productivity and reduced drilling costs. Economic calculations of environmental and production benefits from the implementation of innovative drilling technologies are provided. Optimal approaches to drilling in complex geological conditions are proposed.

Keywords: *drilling and blasting, drilling equipment, geotechnical sites, productivity, energy efficiency, Atlas Copco, economic efficiency.*

Вступ. У гірничій та геотехнічній практиці буровибухові роботи залишаються незамінним інструментом під час руйнування міцних гірських порід. Вони широко застосовуються в інженерно-геологічному будівництві, кар'єрних розробках, будівництві метро, дорожніх тунелів, меліоративних та інших об'єктів інфраструктури. Попри широке впровадження, на більшості об'єктів України спостерігається низький рівень ефективності буріння, обумовлений застарілою технікою, низькою стійкістю інструменту та значними витратами на виконання робіт.

Метою роботи є оцінка ефективності застосування новітньої бурової техніки для покращення показників буровибухових робіт на геотехнічних об'єктах України. Для досягнення мети передбачено виконання низки завдань, зокрема аналіз технічного стану бурових верстатів, що наразі експлуатуються в Україні, а також визначення основних недоліків традиційного обладнання.

Матеріали і результати досліджень. Одним з основних технологічних процесів геотехнічних робіт: видобутку корисних копалин, будівництва підземних споруд та інфраструктури, автошляхів, метро, меліорації – є буровибухові роботи, які виконують функцію руйнування, або попереднього розпушування середньої міцності та міцних гірських порід. Великі витрати і низька ефективність бурових робіт на геотехнічних об'єктах України пояснюються переважним застосуванням ресурсоємних бурових станків та низькоефективного породоруйнівного інструменту. За останні роки продуктивність бурових верстатів стабілізувалася, але умови гірського виробництва різко ускладнилися. Відбувається безперервне збільшення витрат на буріння, які в міцних породах досягають 30-35 % від загальних витрат на проведення гірничих робіт [1-4]. Враховуючи широкий діапазон основних фізико-механічних характеристик гірських порід і в першу чергу їх міцність – проблема правильного вибору та ефективного застосування бурової техніки при виконанні буровибухових робіт на геотехнічних об'єктах виходить на перший план. Враховуючи інтенсифікацію і необхідність різкого зростання продуктивності геотехнічних об'єктів в післявоєнний період – ця проблема є самою актуальною і виходить на перше місце серед інших галузей в країні.

Як в світовій практиці, так і в Україні на підприємствах геотехнічних виробництв широке застосування отримав буровибуховий спосіб руйнування гірських порід. Буровими станками самих різноманітних конструкцій як вітчизняного так і зарубіжних виробництв проводять буріння вертикальних і похилих свердловин діаметром $d_c = 100 \dots 500$ мм. і різною глибиною в породах з

коефіцієнтом міцності $f = 6 \dots 18$. Основними недоліками станків на геотехнічних об'єктах України є недостатня продуктивність та висока вартість буріння, велика маса і мала стійкість породоруйнівного інструменту в важкобуримих породах, високий рівень шуму, вібрації та викиди пилу що приводить до значного забруднення навколишнього середовища і впливу на здоров'я працюючого персоналу, аварійність, складність обслуговування, невисока швидкість пересування та маневреність.

Розробка нових, високоефективних вибухових речовин дала можливість застосування бурової техніки для буріння свердловин зі зменшенням діаметрів до 100...180 мм, що значно підвищує продуктивність та значно зменшує енергоємність процесу.

Одним з перспективних та ефективних напрямків бурових робіт є застосування бурових верстатів з ударно-обертальним способом руйнування гірських порід. При ударно-обертальному способі буріння руйнування породи проводиться за рахунок впливу ударних навантажень при невисоких осьових тисках і частотах обертання, у зв'язку з чим верстати мають значно меншу в порівнянні з шарошечними масу.

Розробка новітніх бурових станків заснована на використанні більш ефективних принципів руйнування міцних та надміцних гірських порід за допомогою ударних навантажень безпосередньо на породоруйнівний інструмент. На рис. 1 наведені основні способи руйнування гірських порід.

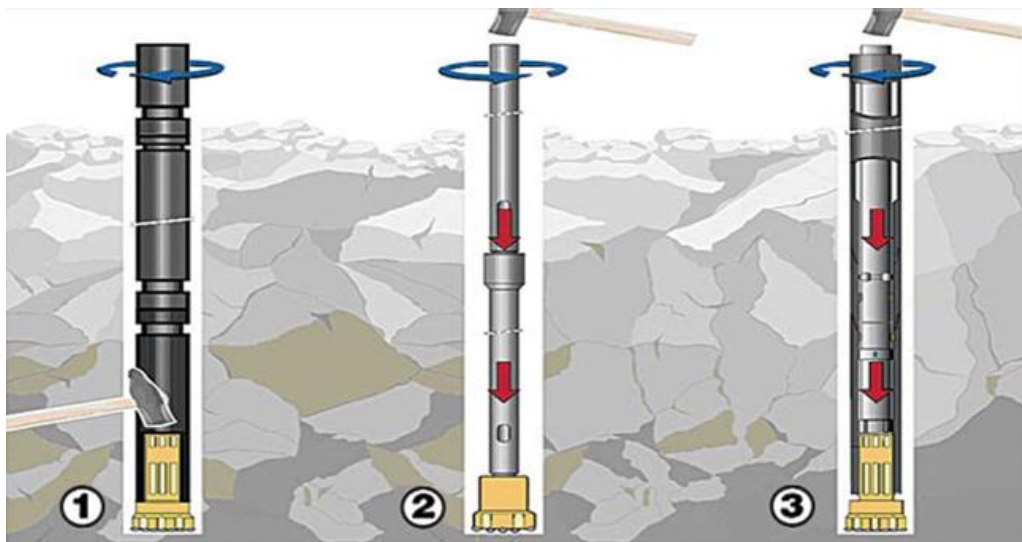


Рисунок 1 – Основні способи та принципи руйнування гірських порід в новітніх бурових машинах: 1 – заглибним пневмоударником; 2 – перфораторного типу; 3 – із зовнішнім гідроударником

Проведений аналіз досліджень ефективності застосування бурових станків Atlas Copco як з заглибними пневмоударниками, так і новітніх бурових станків Atlas COPROD® з винесеними гідроударниками на зарубіжних кар'єрах та

кар'єрах України показують їх високу продуктивність та ефективність роботи, що свідчить про їх перспективне застосування (рис. 2).

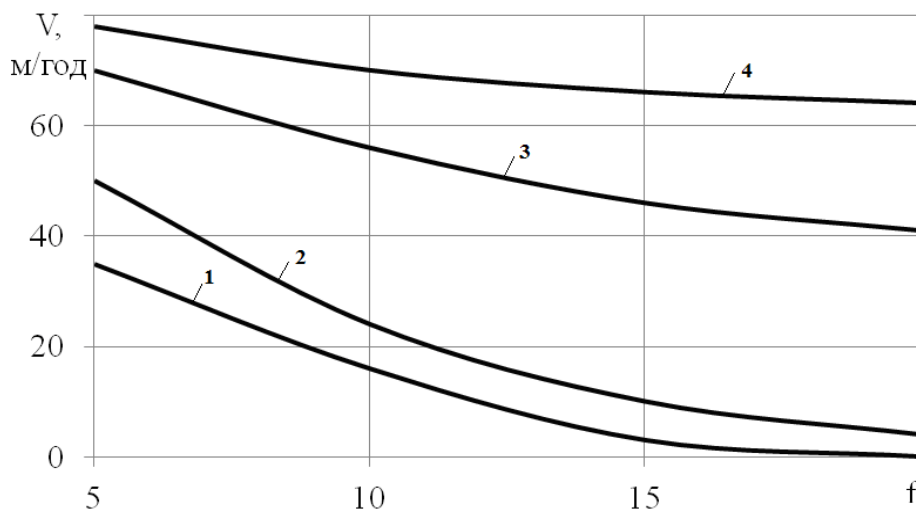


Рисунок 2 – Залежність механічної швидкості буріння від категорії порід по буримості станків: 1 – СБУ; 2 – СБШ; 3 – Atlas Copco; 4 – Atlas COPROD®

Еколого-технічний ефект від впровадження новітньої бурової техніки розраховується по двом основним критеріям: кількості пилу, який виділяється при бурінні свердловин, який є основним забруднювачем навколишнього середовища, що завдає великі збитки та штрафні санкції гірничому підприємству; продуктивності роботи нової бурової техніки.

На рис. 3 наведено залежність викидів пилу від типу бурового станка.

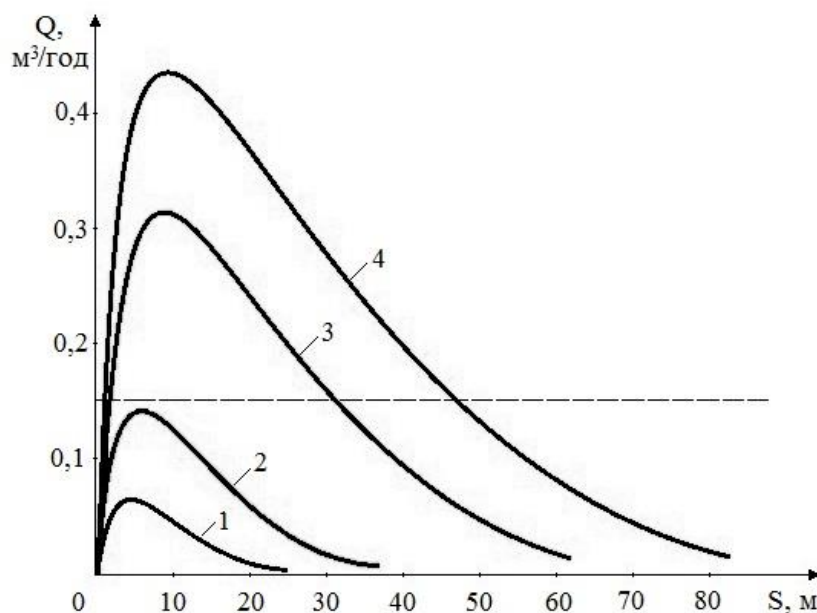


Рисунок 3 – Залежність викидів пилу від типу бурового станка: 1 – Atlas Copco; 2 – Atlas COPROD®; 3 – СБУ; 4 – СБШ

Економічний результат природоохоронних заходів від впровадження новітньої бурової техніки розраховується як:

$$P = U_{\text{пр}} + \Delta D, \quad (1)$$

де $U_{\text{пр}}$ – величина попереднього економічного збитку; ΔD – річний приріст доходу внаслідок поліпшення виробничих досягнень.

Результати експлуатації верстатів «Atlas Corco» і «Atlas COPROD®» підтвердили їх ефективність при бурінні свердловин при різних показниках міцності гірських порід. Так, на кар'єрах України середньомісячна продуктивність верстатів ROC-L8 в 2021 році становила 5750 п.м., станків Atlas COPROD® PV-70 – 7150 п.м., що на 30–40 % вище в порівнянні з верстатами СБУ-125 (3850 п.м.). Продуктивність верстата СБШ-250МН склала 4800 п.м. в місяць. Собівартість буріння верстатом ROC-860НС склала 5,3 \$ США / п.м., що менше на 25,2% собівартості буріння верстатом СБУ-125 (5,9 \$ США / п.м.) та на 24,5% (6,2 \$ США / п.м) буріння верстатом СБШ-250МН.

Проведений аналіз досліджень ефективності застосування бурових станків Atlas Corco як з заглибними пневмоударниками, так і новітніх бурових станків Atlas COPROD® з винесеними гідроударниками на зарубіжних кар'єрах та кар'єрах України показують їх високу продуктивність та ефективність роботи.

Висновки. Застосування новітніх бурових станків типу Atlas Corco та COPROD® дозволяє суттєво підвищити ефективність буріння, особливо в умовах складного геологічного розрізу, що є характерним для багатьох геотехнічних об'єктів України. Проведені розрахунки підтверджують значний економічний ефект від модернізації бурової техніки, що робить доцільним її широке впровадження. Особливо перспективною є ударно-обертальна технологія буріння, яка забезпечує високу продуктивність та надійність процесу. Важливо також, що впровадження сучасної техніки супроводжується покращенням умов праці для персоналу та зменшенням негативного впливу на навколишнє середовище. Розроблені техніко-економічні моделі дають можливість обґрунтовано планувати інвестиції в оновлення парку бурової техніки, сприяючи підвищенню загальної ефективності буровибухових робіт.

Список використаної літератури

- [1] <http://www.atlas.corco>. Бурові станки “Atlas Corco” для відкритих гірничих робіт. Сайт компанії “Atlas Corco”, 2024 р.
- [2] Возний В.Р. Основи гірничого виробництва // В.Р. Возний, Р.С.Я ремійчукю - К.: Кондор, 2006. - 376 с. Кириченко М.Т. Основи гірничого виробництва/М.Т. Кириченко, .Х. Кузьменко.– Житомир, 2003. – 340 с.
- [3] Кравець В.Г. Основи технології видобування корисних копалин / В.Г. Кравець, М.Т. Кириченко, О.О. Фролов, В.В. Вапнічна. – К.: Політехніка, 2009. – 98 с.
- [4] Фролов О. О., Литвинчук І. Д. (2018). Техніко-економічне обґрунтування вибору діаметру свердловинного заряду для проведення буропідричних робіт на кар'єрах. Вісник ЖДТУ. Серія "Технічні науки", 2(82), С. 277-281. [https://doi.org/10.26642/tn-2018-2\(82\)-277](https://doi.org/10.26642/tn-2018-2(82)-277)

УДК 622.831

С.В. Сахно, к.т.н., доцент,
ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА», м. Запоріжжя
Л.С. Завгородня, головний технолог,
ПРАТ «ШАХТОУПРАВЛІННЯ «ПОКРОВСЬКЕ», м. Покровськ
О.С. Булич, магістр, інженер,
О.Л. Кирсанов, аспірант
ДВНЗ «Донецький національний технічний університет, м. Дрогобич, Україна

ОЦІНКА АСИМЕТРИЧНОСТІ І НЕОДНОРІДНОСТІ ВТРАТИ СТІЙКОСТІ КОНВЕЄРНИХ ШТРЕКІВ ПРАТ «ШАХТОУПРАВЛІННЯ «ПОКРОВСЬКЕ» НА ВСІХ ЕТАПАХ ЖИТТЄВОГО ЦИКЛУ

У результаті польових досліджень та теоретичних розрахунків встановлено: неоднорідність вертикальної і горизонтальної конвергенції по трасі виробки; перевищення відхилення вертикальної конвергенції від середнього значення по відношенню до статистичної похибки; локальне руйнування кріплення виробки і деформування порід, що потребують додаткового ресурсу кріплення.

Ключові слова: гірничі виробки, стійкість виробок, деформація штреку, асиметрія деформації, геонапруження.

As a result of field studies and theoretical calculations, heterogeneity of vertical and horizontal convergence along the working route, excess of deviation of vertical convergence from the average value in relation to statistical error, local destruction of working fastening and deformation of rocks requiring additional resource of fastening were established.

Keywords: mine workings, working stability, deformation of roadway, deformation asymmetry, geostress.

Вступ. Однією з найбільш гострих проблем вугільних шахт України і світу є порушення експлуатаційного стану гірничих виробок, адже від 19 до 23% з них знаходяться в незадовільному стані [1]. При чому значну частку серед виробок, де виконуються ремонтні роботи, складають дільничні виробки з строком служби до 3 років, 90 % деформації дільничних виробок пов'язані зі знаходженням в зоні впливу лави. Це створює перешкоди ритмічному вуглевидобутку та обмежує видобуток по фактору вентиляції [2].

Хоча в умовах ПРАТ ш/у «Покровське» рамні кріплення в комбінації з дворівневими анкерними системами є одним з варіантів традиційного кріплення це не забезпечувало вирішення проблеми стійкості штреків. Отже, дослідження особливостей деформування підготовчих виробок є актуальною проблемою, вирішення якої сприятиме підвищенню операційної ефективності підприємства.

Мета та завдання. Метою дослідження є вивчення особливостей деформування підготовчих гірничих виробок на всіх етапах їх експлуатації на прикладі ПРАТ ш/у «Покровське». Задачею дослідження є моніторинг конвергенції підготовчої виробки і визначення особливостей втрати її стабільності на різних етапах життєвого циклу.

Матеріали та результати досліджень. Дослідження проводилось з застосуванням методу інструментальних спостережень, методу візуальних спостережень і фотофіксації, аналізу і синтезу.

Дослідження було проведено на ділянці 4 південної лави блоку 7 ПРАТ «Шахтоуправління Покровське», положення якої наведено на рисунку 1. Виміри проводились в 4 південному конвеєрному штреці блоку 7.

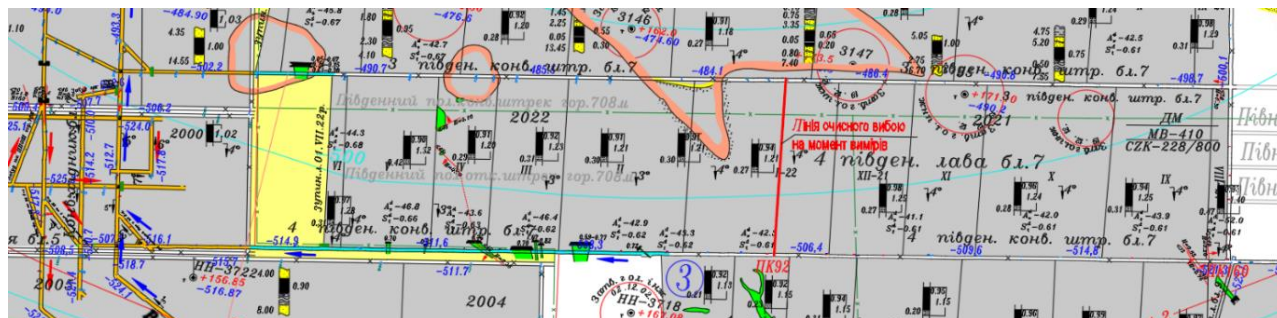


Рисунок 1 – Викопіювання з плану гірничих виробок по ділянці 4 південної лави блоку 7.

Проектні перетини виробки, яка була закріплена кріпленням КШПУ-17,7, при проведенні і перед зоною випереджаючого опорного тиску наведені на рис. 2.

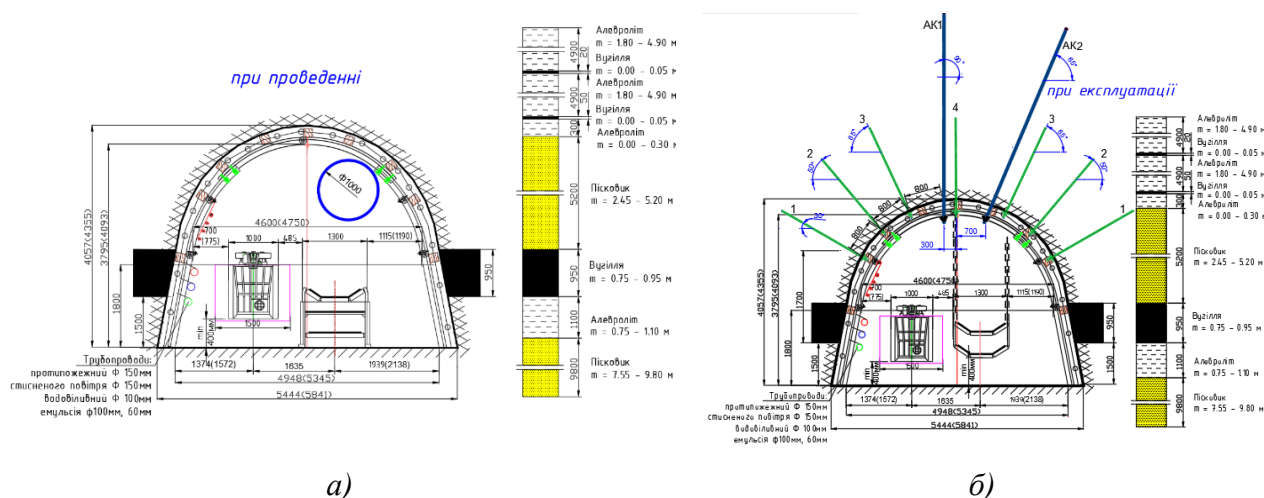


Рисунок 2 – Проектні перетини 4-го південного конвеєрного штрека блоку №7: а – на етапі проведення; б – перед зоною опорного тиску

Комбіноване багаторівневе кріплення забезпечувало в цілому задовільний загальний стан виробки, що зображено на рисунку 3. Штрек, проведений в масиві, деформується симетрично. В зоні опорного тиску спостерігається відхилення подовжньої осі штрека від вертикального положення в бік недоторканого масиву. Виміри параметрів виробки проводились експрес-методом по довжині штрека. Виміри повторювались тричі з часовим періодом 3 доби.



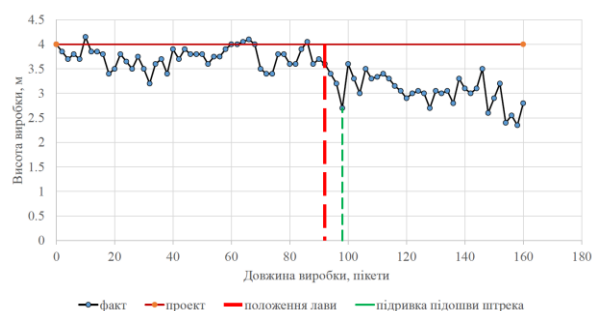
а)



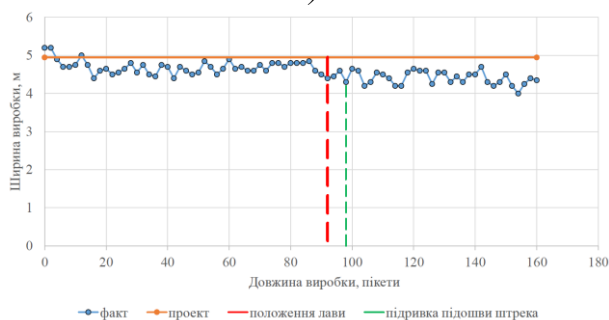
б)

Рисунок 3 – Загальний вигляд конвеєрного штреку: а – поза зоною впливу лави; б – в зоні впливу лаву

Середнє значення вимірних значень висоти і ширини виробки наведено на рис. 4. Аналіз результатів проведених вимірювань (рис. 4) вказує, що коливання висоти виробки більше ніж коливання ширини. Після підризки загальна тенденція до зменшення висоти продовжується (рис. 4). Навіть поза зоною впливу очисного вибою (ПК0-82) зміна ширини виробки варіюється в межах 5% від середнього значення, а висота виробки відхиляється від середнього до 16,3% (рис. 5).



а)



б)

Рисунок 4 – Графіки зміни висоти (а) і ширини виробки (б) по трасі конвеєрного штрека

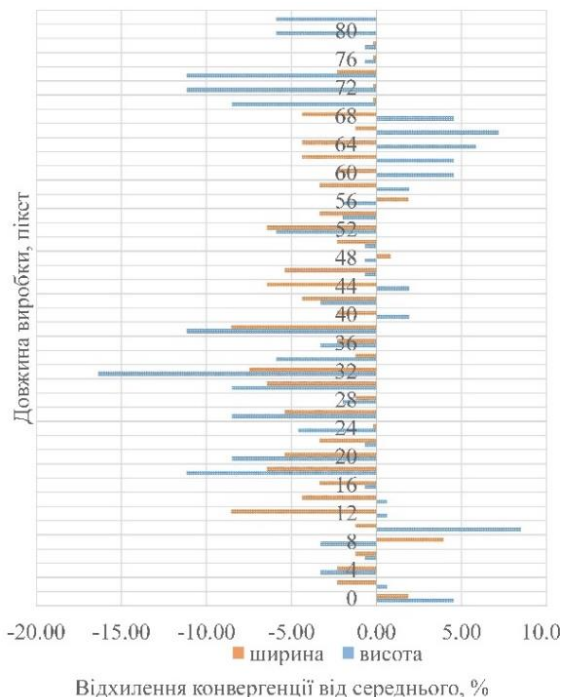


Рисунок 5 – Відхилення вертикальної і горизонтальної конвергенції конвеєрного штрека від середнього значення

Таким чином при загальній задовільній стійкості конвеєрного штреку по його трасі зустрічаються локальні зони руйнування кріплення, асиметричного

деформування тощо. Ще на етапі проведення виробки спостерігається деформація елементів кріплення і розриви затяжки (рис. 6).



Рисунок 6 – Локальна деформація конвеєрного штреку на етапі проведення.

На етапі підтримання штрека перед лавою також спостерігаються кручення рам, руйнування верхняків, розриви замків і виражена асиметрія деформацій (рис. 7).



Рисунок 7 – Локальна деформація конвеєрного штреку на етапі підтримання в зоні опорного тиску перед очисним вибоєм.



Рисунок 8 – Локальна деформація конвеєрного штреку на етапі підтримання за очисним вибоєм.

При підтриманні виробки за лавою основною причиною деформування є неоднорідність умов підтримання, і на відміну від попередніх стадій коливання вертикальної конвергенції тут не так сильне. На рис. 8 наведено загальний вигляд виробки, що підтримується за лавою.

Вертикальна конвергенція відхиляється до 16% від середнього значення і неодноразово повторюється по трасі штреку, отже цей процес не випадковий. Необхідно проводити систематичний моніторинг стану підготовчих виробок, який дозволить встановлювати місця потенційних небезпек.

Висновки. В результаті досліджень були визначені особливості деформування підготовчих виробок на всіх етапах їх життєвого циклу, загальний характер вертикальної і горизонтальної конвергенції, встановлено, що подовжня і поперечні асиметрії деформацій штреку є причиною локальної втрати стійкості

і не може бути спрогнозована і розрахована традиційними методами. Майбутні дослідження будуть зосереджені на розробці способів боротьби з локальними асиметричними деформаціями підготовчих виробок.

Список використаної літератури

[1] Sakhno I., Sakhno S. Numerical Studies of Floor Heave Control in Deep Mining Roadways with Soft Rocks by the Rock Bolts Reinforcement Technology. *Advances in Civil Engineering*. 2023. Vol. 2023, no. 1. P. 1–23. URL: <https://doi.org/10.1155/2023/2756105>

[2] Numerical studies of floor heave control by the rock bolts reinforcement technology in retained gob-side gateroad / I. Sakhno та ін. *E3S Web of Conferences*. 2024. Vol. 526. P. 01011. URL: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202452601011>.

УДК 622.271

І.Я. Климентова, студентка,
О.О. Фролов, д.т.н, професор,
*Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»*, Україна

ОСОБЛИВОСТІ ПРОЕКТУВАННЯ ТА ПРОКЛАДАННЯ ПІДЗЕМНИХ КОМУНІКАЦІЙ ДЛЯ ВОЛОКОННО-ОПТИЧНИХ ЛІНІЙ ЗВ'ЯЗКУ

Розглянуто особливості проектування та прокладання підземних комунікацій для волоконно-оптичних ліній зв'язку (ВОЛЗ) на прикладі м. Києва. Наведено методи прокладання ВОЛЗ, їх підземна інфраструктура та загальна послідовність робіт. Проаналізовано фактори, що впливають на ефективність виконання робіт.

Ключові слова: волоконно-оптичні лінії зв'язку, підземні комунікації, траншея, кабелі, підземні комунікації.

The article considers the design and installation features of underground communications for fiber-optic communication lines using the city of Kyiv as an example. The methods for installing these lines, their underground infrastructure, and the general sequence of works are presented. The factors influencing the efficiency of the work are analyzed.

Keywords: fiber-optic communication lines, underground communications, trench, cable, underground communications.

Вступ. Швидкий розвиток цифрових технологій та зростаючий попит на високошвидкісну передачу даних призвели до активного розширення волоконно-оптичних ліній зв'язку (ВОЛЗ) як у міських, так і в сільських районах. ВОЛЗ утворюють основу сучасної телекомунікаційної інфраструктури, забезпечуючи високопродуктивну та надійну передачу даних на великі відстані з мінімальними втратами сигналу. Це стимулює активне впровадження волоконно-оптичних ліній зв'язку, що прокладаються під землею. Підземне прокладання ВОЛЗ забезпечує підвищену надійність, зменшення витрат на обслуговування та захист від зовнішніх факторів.

Прокладання ВОЛЗ у міському середовищі вимагає ретельного вибору та проектування підземних споруд, які забезпечують як механічний захист кабелів, так і мінімальне порушення існуючої інфраструктури [1]. На відміну від сільської місцевості, де простір та варіанти трасування є відносно гнучкими, міська забудова вводить численні обмеження, включаючи щільні підземні комунікаційні мережі, дорожній рух та жорсткі вимоги щодо земляних робіт. Тому дослідження особливостей проектування та будівництва підземних комунікацій для ВОЛЗ на сьогоднішній день є безумовно актуальним.

Мета та завдання. Метою представлених досліджень є виявлення особливостей підземних споруд для ВОЛЗ при їхньому проектуванні та прокладанні з урахуванням міської забудови. Завданням досліджень є встановлення факторів для визначення оптимальних конструктивних рішень для прокладання ВОЛЗ.

Матеріали та результати досліджень. На даний час у світі існує декілька основних методів прокладання ВОЛЗ (табл. 1) [1].

Таблиця 1 – Методи прокладання ВОЛЗ

Метод	Опис	Переваги	Недоліки
Прокладання траншеї	Прокладання ВОЛЗ у відкритій траншеї на регламентованій глибині (зазвичай 0,7–1,2 м)	Просте та економічно ефективне	Потребує земляних та відновлювальних робіт
Безтраншейне прокладання	Горизонтально- направлене буріння або мікротунелювання	Мінімізує порушення поверхні	Вища вартість та вимагає спеціалізованого обладнання
Системи кабель-каналів	ВОЛЗ, що прокладаються всередині попередньо встановлених підземних кабельних лотків або коробів	Захищає кабелі від механічних пошкоджень	Потребує планування та точного вирівнювання
Телекомунікаційні тунелі (ТТ)	ВОЛЗ, що встановлюються в існуючих або спеціально побудованих тунелях	Сприяє майбутньому технічному обслуговуванню та модернізації	Високі початкові витрати на будівництво

Залежно від специфіки містобудівного планування та наявності підземних комунікацій в м. Києві при прокладанні ВОЛЗ було використано комбінацію безтраншейного розміщення та траншейних методів.

Стандартна підземна інфраструктура ВОЛЗ включає [3]:

- Волоконно-оптичний кабель: основний компонент, що складається з кількох оптичних волокон;

- Захисна труба: механічний захист від тиску ґрунту та іншого навантаження та проникнення води;
- Розподільна рамка: точка завершення та розподільчий центр;
- Люзи та точки з'єднання: розміщуються кожні 300–500 метрів для доступу для обслуговування.

Глибина прокладання ВОЛЗ становить 0,7–1,2 м, залежно від глибини промерзання та навантаження.

Загальна послідовність робіт для підземної ВОЛЗ включає такі етапи [4]:

1. Геолого-кадастрові дослідження з використанням даних GPR та CADastre;
2. Узгодження та погодження – розробка індивідуального календарного плану (ІКП) та отримання дозволів;
3. Риття траншей або безтраншейне буріння;
4. Прокладання кабелю у внутрішньоканальній зоні (ВКЗ) або трубах;
5. Засипка сигнальною стрічкою та ущільнення;
6. Встановлення оптичного кросового розподільника (ОКР) та кабельного тунелю (КТ);
7. Випробування та документування – підготовка протоколів випробувань електричного контролю (ЕК) та сигналів.

Проектування та будівництво ВОЛЗ у містах ускладнюється високою щільністю інфраструктури. Часто необхідна інтеграція з існуючими інженерними спорудами (ІС), такими як каналізаційні системи або кабельні тунелі. Використання безтраншейних технологій (БТ) особливо важливе для уникнення перешкод для доріг та комунікацій, а для кожного сегмента прокладання необхідне дотримання технологічних норм.

Проектування маршруту ВОЛЗ включає як геометричне планування, так і розрахунки якості сигналу. Одним з найважливіших параметрів є оптичне затухання, яке розраховується за формулою [1]:

$$A_{\text{заг}} = \sum_{i=1}^n (L_i \cdot \alpha_i) + \sum_{j=1}^m (C_j), \quad (1)$$

де $A_{\text{заг}}$ – загальне затухання сигналу, дБ; L_i – довжина сегмента кабелю, км; α_i – коефіцієнт затухання сегмента кабелю, дБ/км; C_j – втрати в роз'ємі або з'єднанні для точки, дБ.

Затухання безпосередньо впливає на максимальну довжину сегмента між оптичними волокнами (ОВ) та потребу в підсиленні сигналу. Для стандартного одномодового оптичного волокна з коефіцієнтом затухання 0,35 дБ/км сегмент довжиною 40 км зазнає втрат сигналу ~14 дБ. Це близько до порогового значення і вимагає використання ретрансляторів.

У Києві та інших великих містах України планування маршруту прокладання ВОЛЗ адаптується до особливостей місцевості за допомогою GPS, генеральних планів міста та цифрового картографування. Зокрема, один з

проектів компанії АТРАКОМ у центрі Києва включав три альтернативні варіанти трасування при прокладанні ліній ВОЛЗ [2], всі з яких візуалізувалися в AutoCAD з детальними поперечними перерізами траншей, один з яких показано на рис. 1.

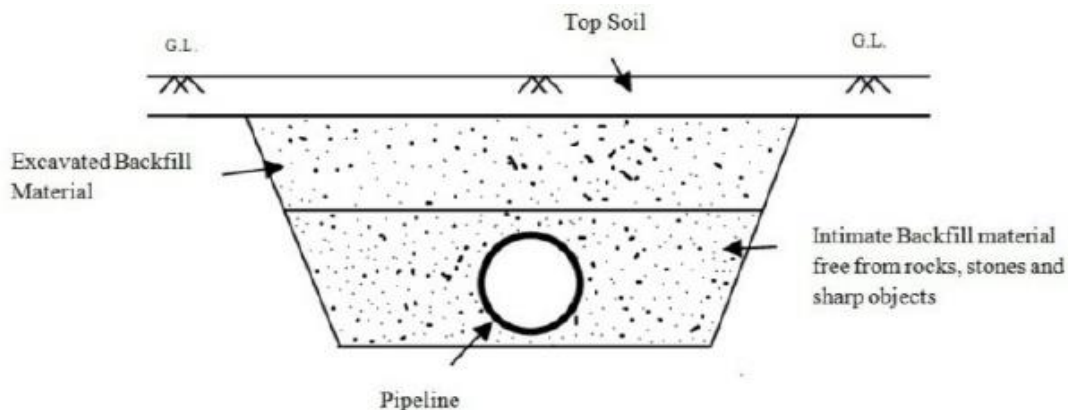


Рисунок 1 – Схематичний поперечний переріз траншеї ВОЛЗ у багатошаровому ґрунті

Стандартні розміри траншеї для прокладання ВОЛЗ залежать від діаметра кабелю, захисного шару та необхідної глибини покриття [5, 6]. Ширина траншеї по дну W та її глибина H розраховують за формулами:

$$W = d + 2c + \Delta w; \quad (2)$$

$$H = h + d + p, \quad (3)$$

де d – зовнішній діаметр кабелю (зазвичай 15-30 мм); c – захисний зазор (або зазор обслуговування) з обох боків кабелю, який забезпечує безпечне розміщення кабелю в траншеї без деформації (5–10 см з кожного боку); Δw – запас по ширині на випадок осипання стінок, установки додаткових елементів (сигнальних стрічок, захисних труб), відхилення при ритті та ін. (зазвичай 100-150 мм); h – мінімальна глибина покриття, залежить від міської зони ($\geq 0,7$ м у зелених зонах, $\geq 1,2$ м під дорогами); p – товщина захисного шару піску/гравію (не менше 100 мм).

Кабелі, прокладені під землею, піддаються статичним та динамічним навантаженням, головним чином від тиску ґрунту та руху транспорту зверху. Для розробки заходів захисту кабелів використовують спрощену формулу для визначення вертикального тиску ґрунту:

$$\sigma_z = \gamma \cdot H, \quad (4)$$

де σ_z – вертикальне напруження на кабель, кПа; γ – питома вага ґрунту, зазвичай 18-22 кН/м³; H – глибина заглиблення, м.

У щільних міських умовах маршрути ВОЛЗ повинні обходити або інтегруватися з існуючими мережами: водопроводами, каналізацією, силовими кабелями та газопроводами. Це часто вимагає:

- вертикального зонування – розміщення ВОЛЗ над або під іншими комунікаціями залежно від класу безпеки та частоти доступу;
- використання неметалевих труб – для запобігання електромагнітним перешкодам поблизу ліній електропередач;
- координації з базами даних містобудування – для уникнення незадокументованих перешкод.

На практиці така координація здійснюється за допомогою інструментів ВІМ (інформаційного моделювання будівель) та ГІС-картографування підземної інфраструктури.

Під час прокладання ВОЛЗ в історичних або густонаселених районах (наприклад, Поділ у Києві) застосовуються додаткові заходи:

1. Мінімізація ширини траншеї та використання міні-HDD, щоб уникнути пошкодження фундаментів та підземних артефактів;
2. Обмеження вібрації та шуму під час будівництва;
3. Графіки робіт у нічний час або позапікові години для зменшення впливу на населення;
4. Технології швидкого відновлення асфальту для відновлення дорожнього покриття протягом 24–48 годин;

Висновки. Таким чином, структурне проектування підземних систем ВОЛЗ у міських зонах вимагає багатофакторного підходу, який повинен включати геотехнічні, структурні, регуляторні та логістичні аспекти. Правильний вибір типу траншеї, захисної обсадної труби та оптимізації маршруту значно знижує як ризик збою обслуговування, так і порушення життя міста. Проектні методи повинні відповідати сучасним європейським та українським стандартам за для забезпечення високої надійності та ремонтпридатності інфраструктури ВОЛЗ.

Список використаної літератури

- [1] Recommendation ITU-T L.110. *Optical fibre cables for direct surface application*, 2017.
- [2] <https://www.itu.int/itu-t/recommendations/rec.aspx?rec=13295>
- [3] Офіційний веб-сайт ATRACOM – <https://www.atracom.ua>
- [4] М. Ю. Ільченко, О. В. Грищенко, *Системи та мережі оптичного зв'язку: навч. посібник*, НТУУ «КПІ», 2016.
- [5] ДБН В.2.5-75:2013, *Каналізація. Зовнішні мережі та споруди. Основні положення проектування*, К.: Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України, 2013.
- [6] І.О. Григор'єв, Г.М. Міхєєнко, *Міські підземні споруди та комунікації*, Київ: Арістей, 2019.

УДК 622.2

T. Kosenko, Senior Lecturer,

E. Shukurlu, PhD student,

*National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute",
Kyiv, Ukraine*

USE OF GIS TECHNOLOGIES FOR GEOSPATIAL ANALYSIS OF GOLD ORE DEPOSITS

У роботі представлено методику аналізу золоторудних родовищ, яка базується на використанні ГІС-технологій. Методика забезпечує високоточне 3D-моделювання просторового розташування корисного компонента, що було продемонстровано на прикладі золоторудного родовища Tulallar. Результатом є оптимізація гірничих робіт, ефективна візуалізація перспективних зон видобутку та мінімізація екологічних ризиків. Запропонований підхід є універсальним і може бути застосований до інших родовищ.

Ключові слова: ГІС-технології, золоторудні родовища, рельєф, тривимірне моделювання, Surfer, концентрація.

This paper presents a methodology for analyzing gold ore deposits based on the use of GIS technologies. The methodology provides high-precision 3D modeling of the spatial location of the mineral component, which was demonstrated on the example of the Tulallar gold deposit. The result is optimization of mining operations, effective visualization of promising mining zones and minimization of environmental risks. The proposed approach is universal and can be applied to other deposits.

Keywords: GIS technologies, gold deposits, relief, three-dimensional modeling, Surfer, concentration.

Introduction. In today's environment of intensified natural resource use and growing requirements for the efficiency of mining operations, the introduction of innovative digital technologies is of particular relevance. Geographic information systems (GIS) are a powerful decision support tool at all stages of deposit development, from exploration to land reclamation. The use of GIS provides a comprehensive spatial analysis of mineral resources, allows creating three-dimensional digital models of deposits and optimizing production planning [1].

Particularly attention is the methodology for spatial analysis of the distribution of gold ore minerals, which is based on the processing of geological data using modern software, in particular Surfer. The creation of 3D models of boreholes taking into account the concentration of gold ore minerals allows not only to improve the accuracy of forecasts regarding the quality and quantity of mineral resources, but also to ensure more efficient management of mining operations.

Thus, the integration of GIS into geological analysis processes contributes to the productivity, economic feasibility and environmental sustainability of mining companies.

The purpose of the work is to improve the methodology for analyzing the spatial location of gold-bearing ores on the example of the Tulallar deposit (Azerbaijan) using

geographic information technologies. The objective of the work is to identify the features of the spatial location of gold in the southern zone of the Tulallar deposit by 3D modeling, and to assess the prospects of the southern zone for further geological exploration and mining operations.

Material and results of the research. The Tulallar gold deposit is located in the northeastern part of the Lesser Caucasus, in the orographically complex high- and mid-mountain belt with absolute elevations ranging from 1200 to 2500 m. The relief of the region is characterized by significant fragmentation due to a dense network of mountain valleys [2]. Within the study area, which is bounded by the points of the reference geodetic network W1-W17 (Fig. 1), geological studies have identified three gold-bearing zones: northern (light blue), central (green) and southern (dark blue).

Despite the similarity of lithological composition, the northern, central and southern parts of the deposit show significant differentiation in the distribution of gold-bearing minerals. The northern area of the deposit is characterized by predominantly poor ores, while the southern area is characterized by the presence of rich ores. The southern area is characterized by the presence of native gold with a wide range of morphological grain types. The granulometric range of native gold is 0.004-0.05 mm [2]. Based on this, it can be said that the southern part is the most promising, so this paper is devoted to the analysis of this particular zone.

During the exploration works, exploratory wells were drilled to determine the concentration of the valuable component, and the concentration was determined along the entire length of the well [2]. The color visualization of the relief map of the southern zone with the inclined wells is shown in Fig. 2.

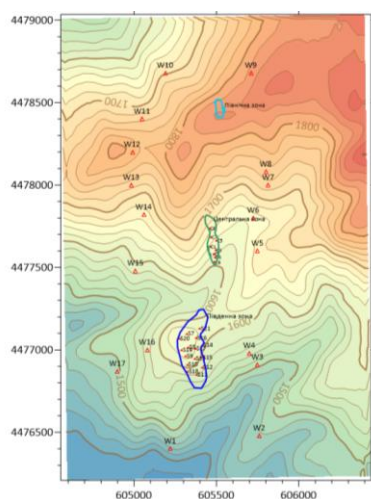


Figure 1 – Contour map of the Tulallar deposit

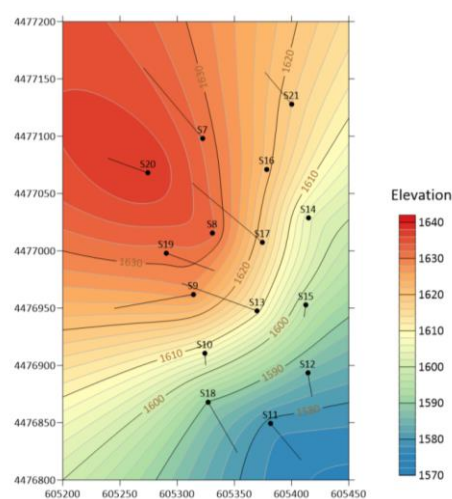


Figure 2 – Contour map of the southern zone

Using the GoldenSoftware Surfer software package, a three-dimensional model of the zones of distribution of gold-bearing ores depending on the concentration of the valuable component was created [3, 4]. To represent point vector data of concentrations in a well, the symbol type used is a sphere. The change in concentration along the length of the well is displayed by changing the color according to the color gradient. The created model provides a highly accurate and detailed image of the spatial

distribution of the valuable component in the geological environment. The 3D model was built using the Drillhole functionality, which involves entering the spatial coordinates of wellheads and values of concentrations of the useful component at different depths (Fig. 3).

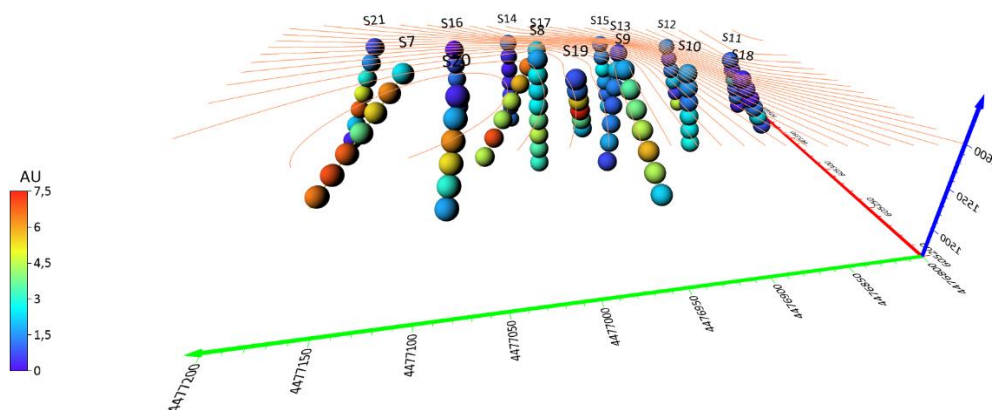


Figure 3 – 3D model of the distribution of the valuable component along the well

According to the modeling results, the wells with the highest concentrations of gold component (S7, S9, S17, S19, S20) were identified, ranging from 3.5-7 g/t. The minimum concentration value of 0.8 g/t was recorded in hole S16. The 3D model also shows that the distribution of gold concentration along the length of the wells is uneven, which is due to geological heterogeneity, variability of mineralogical characteristics of ore bodies and features of hydrothermal mineralization.

The change in concentrations of the valuable component with depth can be traced by plotting the concentration isoline maps. Figure 4 shows the maps of isoconcentrations at 1500 m and 1550 m. A comparative analysis of the maps indicates a higher concentration of minerals at the 1550 m level, which may suggest the localization of the ore body at this depth.

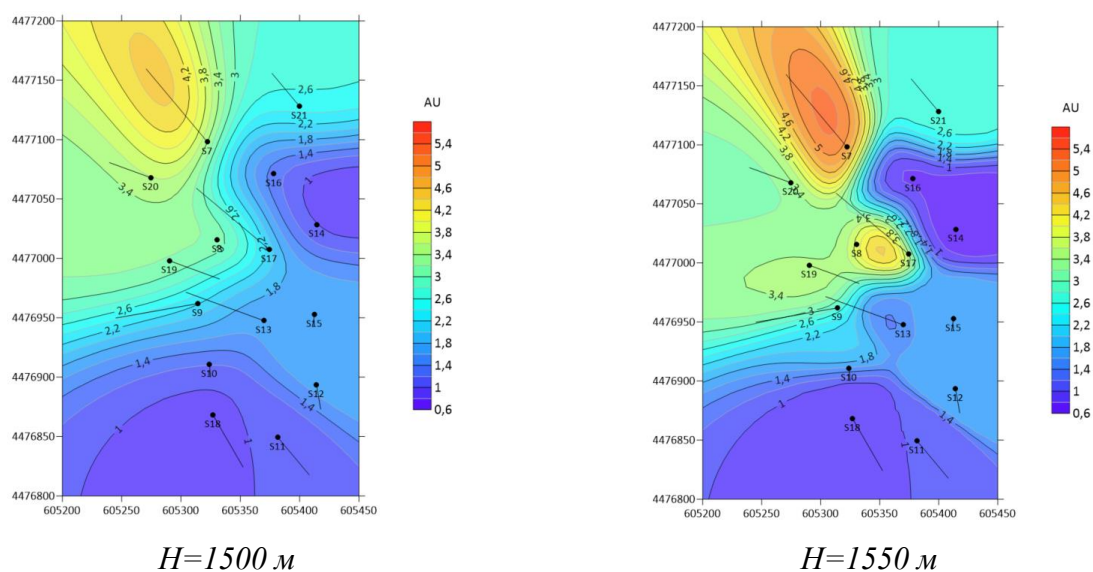


Figure 4 – Map of gold component concentration isolines

Based on the maps of concentration isolines, Surfer creates a three-dimensional image of isosurfaces that reflect the spatial location of a certain concentration of a valuable component. The isosurfaces are formed by interpolating points with the equal concentration in three-dimensional space, which visualizes the distribution of the valuable component within the subsurface.

For complex analysis, Surfer provides the ability to overlay multiple isosurfaces corresponding to different concentrations. The following gold concentrations are used for analysis and illustration: 2 g/t (blue), 3 g/t (green), 5 g/t (red) (Fig. 5). This approach enables the visual assessment of concentration distribution dynamics within a defined volume.

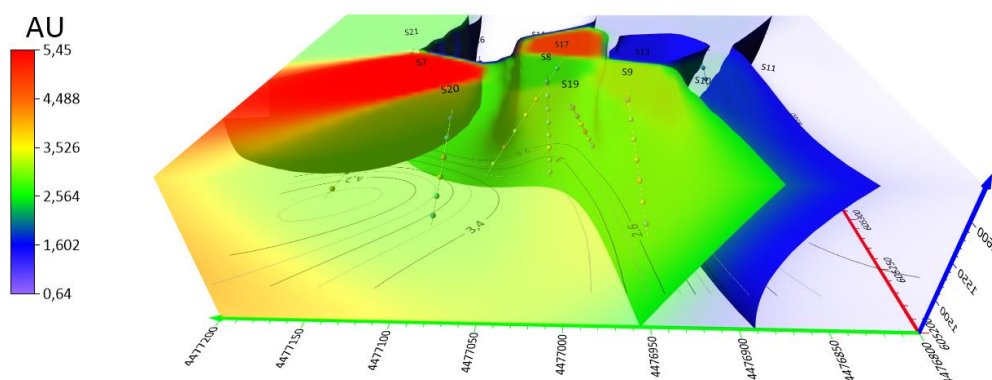


Figure 5 – 3D visualization of the location of zones with different valuable component content

Based on the conducted modeling, it was found that the areas of high gold content are located in the northwestern part of the studied zone, while a significant decrease in concentration is observed in the southeastern direction. This spatial pattern indicates that the northwestern direction is the most promising for further geological exploration and mining operations.

Conclusions:

1. Three-dimensional modeling using the GoldenSoftware Surfer software provided high accuracy of visualization of the spatial distribution of gold-bearing ores. Interpolation of point data of concentrations enabled to create a detailed geological model, which is an effective tool for planning further exploration and mining operations.

2. According to the modeling results, the areas with the highest gold content (up to 7 g/t) are located in the northwestern part of the study area. The uneven distribution of gold content over the depth confirms the complex geological structure and variability of the mineral composition of ore bodies within the zone.

3. The creation of maps of isoconcentrations and isosurfaces in three-dimensional space allowed for the identification of spatial trends in gold content within the deposit. A natural increase in the gold concentration was identified in the northwestern direction of the area, justifying the expediency of concentrating geological exploration and mining operations in this particular sector.

References

- [1] В.Д. Шипулін. Основи ГІС-аналізу : навч. посіб. Харків : Харк. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекет., 2014. 330 с. ISBN 978-966-695-314-1
- [2] Quliyev E.E., İsayev E.N. Tülallar qizil yatağının perspektivliliyi və onun yaxın cinahlarında potensial minerallaşma zonalarına dair qısa icmal. *ANAS Transactions, Earth Sciences*. 2022. № 2, с. 88-97.
- [3] Косенко Т.В., Шукюрлю Е. Перспективи розробки золоторудних родовищ на основі геодезичного моніторингу та ГІС технологій. *Збірник наукових праць НГУ*. 2024. № 79. С. 38–48. URL: <https://doi.org/10.33271/crpnmu/79.038>
- [4] Оцінка фракційності мінералів з використанням геоінформаційних систем в інженерно-геологічних вишукуваннях / Н. В. Зуєвська та ін. *Технічна інженерія*. 2024. № 1(93). С. 332–338. URL: [https://doi.org/10.26642/ten-2024-1\(93\)-332-338](https://doi.org/10.26642/ten-2024-1(93)-332-338) (дата звернення: 20.05.2025).
- [5] Прогнозування зон зі змінними фізико-механічними характеристиками ґрунтових масивів / Н. В. Зуєвська та ін. *Збірник наукових праць НГУ*. 2024. Т. 77. С. 118–125. URL: <https://doi.org/10.33271/crpnmu/77>

УДК 622.23.05

В. В. Вапнічна, к.т.н., доцент

О. О. Безсмертна, студентка

*Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»*

АНАЛІЗ ОСНОВНИХ СХЕМ АРМУВАННЯ ҐРУНТУ: СУЧАСНИЙ СТАН І ПЕРСПЕКТИВИ

Розглянуто армування ґрунтів - один з ключових напрямків геотехнічної інженерії, що дозволяє покращити механічні властивості слабких або нестабільних ґрунтів. Проаналізовано сучасні методи, які включають три основні схеми армування: горизонтальне, вертикальне та об'ємне, крім того геосинтетичні матеріали (геосітки, геотекстиль, застосування анкерного кріплення, габіонів), що значно розширює можливості проєктування в геотехніці. Наведено результати застосування, які сприяють підвищенню надійності та довговічності інженерних споруд, особливо в складних геологічних умовах.

Ключові слова: *армування ґрунтів, горизонтальне армування, вертикальне армування, об'ємне армування, геосинтетичні матеріали, геосітки, геотекстиль, анкерне кріплення, габіони.*

Soil reinforcement is considered as one of the key areas of geotechnical engineering, which allows improving the mechanical properties of weak or unstable soils. Modern methods are analysed, which include three main schemes of reinforcement: horizontal, vertical and volumetric, in addition to geosynthetic materials (geogrids, geotextiles, anchoring, gabions), which significantly expands the design possibilities in geotechnics. The results of the application are presented, which contribute to increasing the reliability and durability of engineering structures, especially in difficult geological conditions.

Keywords: *soil reinforcement, horizontal reinforcement, vertical reinforcement, volumetric reinforcement, geosynthetic materials, geogrids, geotextiles, anchoring, gabions.*

Вступ. У складних умовах, таких як зони ризику підземних рухів або провалів потрібне якісне армування ґрунтів, яке повинно відповідати двом ключовим вимогам: достатня міцність армуючих елементів і максимальна площа контакту з ґрунтом. В залежності від виду армування застосовують різні схеми та армуючі матеріали.

Метою роботи є порівняння використання різних схем армування ґрунтів, що підвищують несучу здатність, стабільність та довговічність основ і конструкцій, які зводяться на слабких або нестійких ґрунтах.

Матеріал і результати досліджень. Армування ґрунтів має широкий спектр застосування: будівництво доріг, залізниць, захист навколишнього середовища, будівництво морських та прибережних споруд, гірничодобувна промисловість, анкерування схилів, укріплення вертикальних стін та інші.

В сучасному будівництві застосовують декілька схем армування ґрунту. Розглянемо та проаналізуємо основні з них. Горизонтальне армування – це розміщення армуючих елементів у горизонтальних шарах в тілі ґрунту або між шарами насипу. Прикладом слугує ділянка швидкісної автомагістралі High Speed 2 (HS2) (рис. 1), де застосовуються георешітки - це плоскі армувальні синтетичні матеріали з комірчастою структурою, що використовуються для зміцнення ґрунту та запобігання його руйнуванню під впливом навантажень [1]. Сітчаста структура забезпечує армування ґрунту [2]. Поєднання ребер і відповідних вузлів в георешітці дозволяє передавати навантаження на структуру георешітки, забезпечуючи при цьому надійне зчеплення армуючих матеріалів через отвори георешітки. Георешітка забезпечує високу жорсткість на розрив з низькою деформацією в поєднанні з відмінною стійкістю до пошкоджень від будівельних робіт або впливу навколишнього середовища [3].



Рисунок 1 – Ділянки швидкісної автомагістралі High Speed 2 (HS2)

На відміну від георешіток, геотекстиль – це напівпроникні текстильні матеріали, що використовуються для покращення характеристик ґрунту. Вони можуть фільтрувати, розділяти, армувати, захищати та дренажувати воду, якщо їх використовувати разом із ґрунтом. Геотекстиль ідеально підходить для широкого спектру інфраструктурних робіт, таких як дороги, сміттєзвалища, порти та інші

цивільні інженерні проекти. Геотекстиль виготовляється з полімерів, таких як поліестер та пропілен. Під час будівництва доріг геотекстиль діє як бар'єр, що запобігає змішуванню різних типів ґрунту, що знаходяться поблизу. Геотекстиль пропускає воду, водночас утримуючи частинки ґрунту. Завдяки своїй пористій структурі вони ефективно запобігають змиванню ґрунту водою. Коли геотекстиль укладається на ґрунт, його міцність і стійкість збільшуються [3]. Під час укладання або ремонту дорожнього покриття між новим і старим шарами асфальту укладають шар нетканого геотекстилю (рис.2).

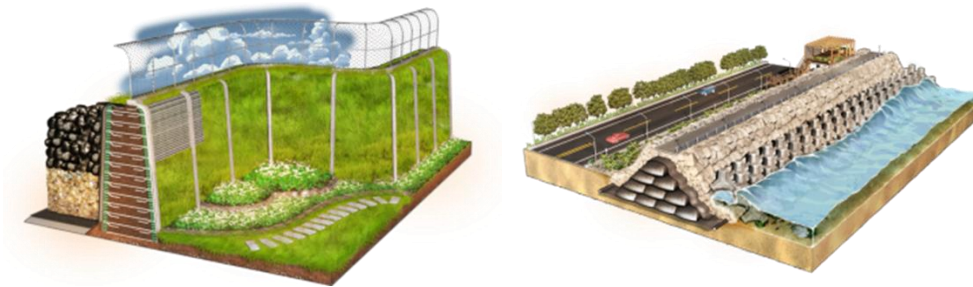


Рисунок 2 – Використання геотекстилю для будівництва звалища та морських стін при горизонтальному армуванні

Наступним розглянемо вертикальне армування - це встановлення арматурних елементів для з'єднання глибоких шарів ґрунту з поверхнею (рис. 3). Таке армування має широкий діапазон застосування:

- Котлован – анкери стабілізують ґрунт під час широких розкопок; тимчасово, доки не будуть зведені постійні споруди.
- Стабілізація схилів – закріплення анкерів під кутом запобігає зсувам та покращує стійкість ґрунту.
- Греблі – вертикальні анкери зменшують просочування води та підвищують стійкість гребель від перекидання.
- Причальні стіни – анкери підтримують причальні стіни та передають зусилля на шпунтові палі.
- Підземні споруди – анкери стабілізують галереї та компенсують ґрунтові сили в шахтах і тунелях.
- Анкерні конструкції – вертикальні анкери покращують зв'язок між фундаментом і ґрунтом і зменшують вплив втоми.
- Фундаменти – анкери дозволяють будувати на ґрунтах з низькою несучою здатністю, передаючи навантаження на стійкі шари.
- Гідростатичні підйомні навантаження – корозійностійкі анкери утримують конструкції під високим тиском води [4].

Об'ємне армування – це комбіноване застосування горизонтального та вертикального армування у тривимірній структурі для просторового зміцнення.

Стіна з габіону – це конструкція у формі коробки, виготовлена з шестигранної оцинкованої дрітної сітки, заповненої міцною гірською породою. Ці конструкції розташовуються рядами або штабелями, утворюючи масивну

гравітаційну конструкцію. Міцність стіни визначається щільністю каменю і власною вагою, яка протидіє впливу тиску землі і гідравлічних навантажень.

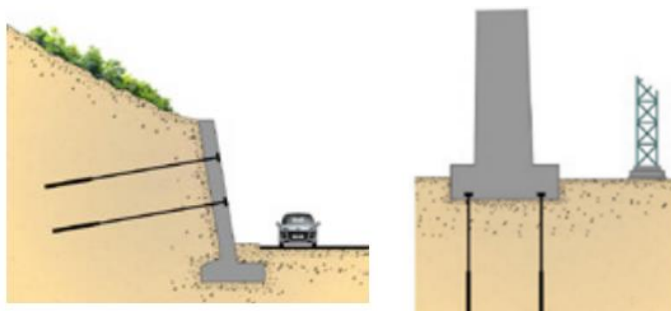


Рисунок 3 – Вертикальне армування при стабілізації схилів та фундаменту

Габіонні конструкції зазвичай використовуються для уповільнення поверхневого стоку, виконуючи при цьому фільтруючу функцію, утримуючи ґрунт. Вони особливо ефективні на нестабільних ґрунтах, схильних до ерозії. Вони також використовуються в місцях, де взаємодія ґрунту і води є проблемою, де сильні течії або турбулентність води можуть спричинити змив ґрунту.

Для захисту військової інфраструктури широке використання отримали габіонні стінки (рис. 4). Вони захищають особовий склад і техніку на базах від уламків, ударних хвиль, мінометного та артилерійського вогню. Їх розміщують навколо казарм та інших об'єктів, де збирається велика кількість людей.



Рисунок 4 – Використання габіонів

У сучасній архітектурі габіонні стіни використовуються як декоративні та функціональні елементи. Вони надають спорудам унікальну фактуру, підкреслюють міцність і додають природної краси [5].

Основні види габіонів:

- Габіони кошики - застосовують в дорожньому та залізничному будівництві.
- Габіонні матраци - захищають береги річок і водотоків від ерозії, сповільнюючи потік води.
- Габіонні мішки - гнучкі циліндричні конструкції для швидкого зведення в надзвичайних ситуаціях - особливо об'єктів, які потребують термінового захисту.

- Габіонна дротяна сітка - призначена для укріплення схилів біля автомобільних доріг та залізниць.

Габіони використовуються в інженерних проєктах і служать різним цілям:

- Підпірні конструкції, такі як підпірні стіни, облицювання та опорні стіни насипів і вирубок.

- Конструкції для запобігання корозії, наприклад, прибережні стіни.

- Циліндричні металеві габіони застосовуються для будівництва гребель або фундаментів.

- Ступінчасті габіони покращують розсіювання енергії в каналах.

- Використання в естетичних цілях.

- Підпірні стінки для дорожнього насипу [6].

Висновки. Порівняння різних методів зміцнення ґрунтів підтверджує їх ефективність у підвищенні несучої здатності, стійкості та довговічності фундаментів і споруд на слабких або нестійких ґрунтах. Зміцнення ґрунтів відіграє важливу роль у широкому спектрі галузей, від автомобільного та залізничного будівництва до гірничодобувної промисловості та інженерного захисту територій. Зважаючи на складні інженерно-геологічні умови багатьох регіонів України, рекомендується активно впроваджувати в будівельну практику сучасні технології зміцнення ґрунтів та геосинтетики, що сприятиме підвищенню надійності інфраструктури та ефективному використанню земельних ресурсів. Георешітка у проєкті HS2 відіграє ключову роль у покращенні продуктивності дорожніх конструкцій, особливо на слабких основах. Її системне включення у всі розглянуті типи покриття демонструє ефективність як інженерного рішення для підвищення надійності, довговічності та економічної доцільності.

Список використаної літератури

[1] Temporary Access Road Optioneering for HS2. Сайт проєкту HS2 Learning Legacy. [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://learninglegacy.hs2.org.uk/document/temporary-access-road-optioneering-for-hs2/>

[2] Biaxial Geogrid – двовісні георешітки. Сайт компанії TeraGeos. [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://terageos.com/products/geogrids/biaxal-geogrid/>

[3] ACEGrid® GG – георешітки для армування ґрунтів. Сайт компанії GeoACE. [Електронний ресурс] –

Режим доступу: <https://www.geoace.com/products/Geogrids/ACEGrid%C2%AE-GG>

[4] Freyssinet. Anchoring Systems for Geotechnical Engineering [Електронний ресурс] // Brochure – Freyssinet. – 2021. – Режим доступу: <https://www.freyssinet.com/wp-content/uploads/2021/08/Brochure-Freyssinet-anchoring-systems-for-geotechnical-engineering-1.pdf>

[5] Gabion – Вікіпедія, вільна енциклопедія. [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://en.wikipedia.org/wiki/Gabion>

[6] Габіони: типи, застосування та переваги. Сайт компанії BudTex. [Електронний ресурс] – Режим доступу: <http://budtex.com.ua/uk/tehnologii/108-gabioni-tipi-zastosuvannya-ta-perevagi.html>

УДК 621.31

Горєв О.В., аспірант,
О. Я. Тверда, д.т.н., професор,
К.К. Ткачук, д.т.н., професор,
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Україна

АНАЛІЗ ФІЗИКО-ХІМІЧНОГО СКЛАДУ ЗАБІЙОК ПРИ ПРОВЕДЕННІ ВИБУХОВИХ РОБІТ НА КАР'ЄРАХ

Досліджено фізико-хімічні властивості традиційних, альтернативних і спеціалізованих забійок у контексті їх ефективності при вибухових роботах на кар'єрах.

Ключові слова: вибухові роботи, забійка, кар'єр, фізико-хімічні властивості, ефективність, свердловинний заряд, продукти вибуху.

Physical and chemical properties of traditional, alternative, and specialized stemming materials were analysed in terms of blasting efficiency in surface mining.

Keywords: blasting, stemming, quarry, properties, efficiency, alternative materials, ecology

Вступ. Забійка відіграє ключову роль у забезпеченні безпеки та ефективності вибухових робіт на кар'єрах. Її головне призначення — ефективне використання енергії вибуху за рахунок запирання газів та покращення дроблення гірських порід. У сучасних умовах зростає інтерес до аналізу не лише традиційних, а й інноваційних матеріалів для забійки з урахуванням їх фізико-хімічних властивостей і впливу на вибухові процеси. Це зумовлено низкою технічних, економічних та екологічних факторів. Зокрема, традиційні сипучі матеріали (буровий шлам, щебінь) часто не забезпечують належного ущільнення, що призводить до часткового витоку вибухових газів, збільшення рівня запиленості та концентрації токсичних компонентів у повітрі (NO_x , CO , CO_2 тверді частинки). Крім того, недостатнє утримання вибухової енергії знижує ефективність дроблення гірської маси, підвищує потребу в повторному бурінні та збільшує загальні витрати на підривні роботи. Удосконалення забійки дозволяє мінімізувати втрати енергії, підвищити якість фрагментації, зменшити рівень шумового забруднення та викиди у навколишнє середовище [1-5].

Мета та завдання. Метою роботи є аналіз фізико-хімічного складу матеріалів, які використовуються або потенційно можуть бути використані як забійки, та оцінка їх впливу на ефективність вибухових робіт. Основними завданнями є: 1) класифікація та характеристика традиційних, альтернативних та спеціалізованих забійок; 2) порівняння їх властивостей та результативності; 3) визначення перспективних напрямів удосконалення забійки.

Матеріали та результати досліджень. До традиційних забійок належать буровий шлам і щебінь. Перший є легкодоступним, але малоефективним через низьку здатність до утримання вибухової енергії [1, 2]. Щебінь забезпечує краще ущільнення та дрібніше дроблення породи [4]. Альтернативні забійки включають гіпсову суміш ($\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$), яка затвердіває в свердловинах, забезпечуючи

кращу герметизацію та зниження витрат на вибухові роботи до 15 % [1-3, 6]. Перспективним є використання неньютонівських рідин, що переходять у твердий стан під зсувним напруженням. Такі забійки ефективно заповнюють простір та зменшують втрати енергії [5].

Серед спеціалізованих забійок варто виокремити пластикові заглушки та воронки. Перші виготовлені з хімічно інертних полімерів, покращують продуктивність вибуху, а викиди пилу зменшуються [7, 8], однак з'являться продукти згорання пластику та його фрагменти. Воронки, встановлені між вибуховою речовиною та забійкою, концентрують енергію у напрямку гірської породи, покращують спрямованість вибухової енергії та зменшують дальність розльоту шматків породи [9]. В таблиці 1 наведено порівняння матеріалів для забійки свердловинного заряду.

Таблиця 1 – Порівняння матеріалів для забійки

Тип матеріалу	Фізичні властивості	Хімічні властивості	Ефективність
Буровий шлам	Сухий, гранульований, дрібні уламки гірської породи	Такий самий склад, як у породи, хімічно інертний	Слабке утримання, низьке використання енергії вибуху, грубе дроблення
Щебінь	Кутчасті, подрібнені частинки гірської породи	Такий самий склад, як у породи, хімічно інертний	Краще ущільнення, дрібніше дроблення, вищі темпи екскавації
Гіпсова забійка	Порошкоподібна, твердне після змішування з водою	Гемігідрат сульфату кальцію ($\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$), хімічно інертний	Знижує витрати на підривні роботи, покращує дроблення, підвищує ефективність
Неньютонівські суміші	В'язкі рідини, що набувають твердоподібного стану під дією зсувного напруження	Екологічно безпечні, хімічно інертні	Зменшують втрати енергії, покращують передачу напруження в породі
Пластикові заглушки	Міцні матеріали, як-от пластик або композитні полімери	Хімічно інертні	Підвищують ефективність вибуху, знижують техногенне навантаження на навколишнє середовище, однак з'являються продукти згорання пластику та його фрагменти
Пластикові воронки	Конусоподібні, виготовлені з міцного пластику	Хімічно інертні	Спрямовують вибухову енергію, зменшують дальність розльоту шматків породи, покращують дроблення, однак з'являються продукти згорання та фрагменти пластику

Аналіз показав, що ефективність забійки залежить не лише від її складу, але і від параметрів свердловинного заряду. Довжина забійки розраховується таким чином, щоб забезпечити утримання вибухових газів у свердловині та спрямування енергії на руйнування породи з урахуванням фізико-механічних властивостей породи, діаметра та глибини свердловини, а також типу вибухової речовини та фізико-хімічного складу забійкового матеріалу [10]. Крім того, використання окремих типів неньютонівських сумішей, розроблених із урахуванням екологічних вимог, може підвищити ефективність вибуху, а також зменшити його вплив на навколишнє середовище, завдяки кращому утриманню вибухових газів і зменшенню газової та пилової емісії.

Висновки. Аналіз показав, що альтернативні та спеціалізовані забійки демонструють вищу ефективність порівняно з традиційними, забезпечуючи ефективніше використання енергії, економію вибухових матеріалів і зниження екологічних ризиків. Вибір забійки має ґрунтуватися на комплексній оцінці її фізико-хімічних характеристик, що дозволяє підвищити результативність буровибухових робіт і зменшити супутні техногенні ефекти.

Список використаної літератури

- [1] H. Cevizci, "Fragmentation, cost and environmental effects of plaster stemming method for blasting at a basalt quarry," *Archives of Mining Sciences*, vol. 59, no. 3, pp. 687–700, 2014, doi: 10.2478/amsc-2014-0058.
- [2] H. Cevizci, "A newly developed plaster stemming method for blasting," *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, vol. 112, no. 12, pp. 1071–1078, Jan. 2012.
- [3] H. Cevizci, "A new stemming application for blasting: a case study," *REM - International Engineering Journal*, vol. 66, no. 4, pp. 513–519, Oct. 2013.
- [4] S. K. Sharma and P. Rai, "Investigation of crushed aggregate as stemming material in bench blasting: a case study," *Geotechnical and Geological Engineering*, vol. 33, pp. 1449–1463, 2015, doi: 10.1007/s10706-015-9911-7.
- [5] L. F. G. Marinho, H. G. Vasconcelos, B. Lusk, and G. A. P. Rapucci, "Achieving effective confinement through utilization of non-Newtonian fluid mixture as stemming structure," *REM - International Engineering Journal*, vol. 70, no. 1, pp. 77–83, Mar. 2017.
- [6] H. Cevizci, "Comparison of the efficiency of plaster stemming and drill cuttings stemming by numerical simulation," *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, vol. 119, no. 5, Jan. 2019.
- [7] A. Ur Rehman, M. Z. Emad, and M. U. Khan, "Improving the environmental and economic aspects of blasting in surface mining by using stemming plugs," *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, vol. 121, no. 7, pp. 369–377, Jul. 2021.
- [8] D. Yang, Y. Zhao, Z. Ning, Z. Lv, and L. Huafeng, "Application and development of an environmentally friendly blast hole plug for underground coal mines," *Shock and Vibration*, vol. 2018, pp. 1–12, Jan. 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1155/2018/5826316>
- [9] A. Bhaskar, A. K. Baranwal, P. Ranjan, T. K. Jena, M. Shkhar, and D. Chakraborty, "Application of plastic funnel in blast hole to improve blasting efficiency of opencast coal mine at West Bokaro," [Journal Name Not Provided], Jan. 2019.
- [10] Z. Zhang, X. Qiu, X. Shi, et al., "Optimization of the matching relationship between the stemming length and minimum burden in cut blasting of large-diameter long-hole stopes," *Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources*, vol. 9, 136, 2023, doi: 10.1007/s40948-023-00674-5.

УДК 622.271

М.В. Дзьоба, аспірант,
О.О. Фролов, д.т.н, професор,
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Україна

РОЗРОБКА ЗАХИСНИХ КОНСТРУКЦІЙ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СТІЙКОСТІ БОРТА КАР'ЄРА ПРИ ДІЇ НА НЬОГО ДОДАТКОВОГО НАВАНТАЖЕННЯ

Представлено результатами моделювання у програмному комплексі Rocscience Slide стану стійкості прибортового масиву суглинків, підсиленого захисною конструкцією з буронабивних паль, при дії зовнішнього додаткового навантаження. Запропоновано підсилюючу конструкцію з двох рядів паль відповідних конструктивних і технологічних параметрів, яка забезпечить виконання нормативного значення коефіцієнту стійкості укосу борта кар'єра.

Ключові слова: гірський масив, зсувні явища, захисні конструкції, борт кар'єру, буронабивні палі, моделювання, коефіцієнт стійкості укосу.

The paper presents the results of modeling in the Rocscience Slide software package of the stability state of the loam side massif reinforced with a protective structure made of bored piles under the influence of an external additional load. A reinforcing structure of two rows of piles with corresponding design and technological parameters is proposed, which will ensure the implementation of the standard value of the quarry slope stability coefficient.

Key words: rock massif, landslide phenomena, protective structures, quarry side, bored piles, modeling, slope stability coefficient.

Вступ. Як відмічають науковці, стійкість укосів уступів та бортів кар'єрів впливають на ефективність відпрацювання родовищ корисних копалин, а також на техніко-економічні показники роботи підприємства в цілому [1]. Тому однією з задач при відробці кар'єрів є встановлення таких параметрів укосів гірських масивів, які забезпечать їх тривалу стійкість при мінімальних обсягах гірничих робіт. При цьому треба враховувати, що завищені кути викликають зсувні явища в укосах кар'єрів, а занижені кути – викликають різке збільшення об'ємів розкриву і призводять до значних прибортових втрат корисних копалин [2].

Тому удосконалення забезпечення стійкості бортів кар'єра є важливою науково-технічною задачею.

Мета та завдання. Метою даної роботи є розробка захисної конструкції для забезпечення стійкості постійного борта кар'єра при дії на нього зовнішнього додаткового навантаження. Завданням досліджень є досягнення нормативного значення коефіцієнту стійкості укосу борта кар'єра.

Матеріали та результати досліджень. Дослідження виконаємо для умов ділянки Жидачівського родовища суглинків. За геологічними даними фізико-механічні характеристики суглинків на родовищі у природному стані наступні:

кут внутрішнього тертя – $\varphi_1 = 18^\circ$; питоме зчеплення пісків у гірському масиві – $c_1 = 29$ кПа; питома вага ґрунту – $\gamma_1 = 19,4$ кН/м³.

Максимальна загальна потужність борта кар'єру може досягати $H=21$ м. Згідно рекомендацій фахівців, природна стійкість борта на досліджуваній ділянці при мінімальних прибортових втратах забезпечується при куті укосу $\alpha=42^\circ$. Це підтверджується також і при моделюванні в Rocscience Slide (рис. 1).

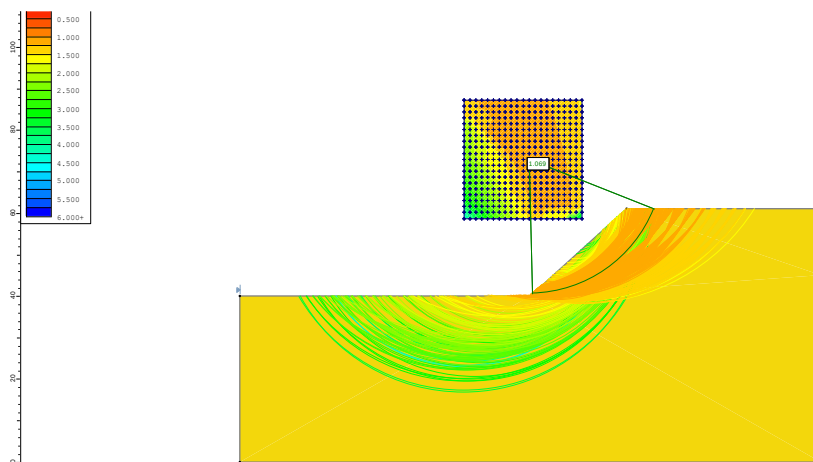


Рисунок 1 – Поверхня мінімального коефіцієнта стійкості прибортового масиву суглинків

Згідно робочого проєкту, в східній та південній частині кар'єру вздовж неробочого борта проходить автомобільна дорога, що є причиною додаткового навантаження на прибортовий масив і може стати причиною зсуву гірничої маси на ділянці (рис. 2) [3]. Максимальне навантаження на поверхню борта кар'єру, яке може діяти від завантажених автосамоскидів, приймаємо $q=100$ кПа.

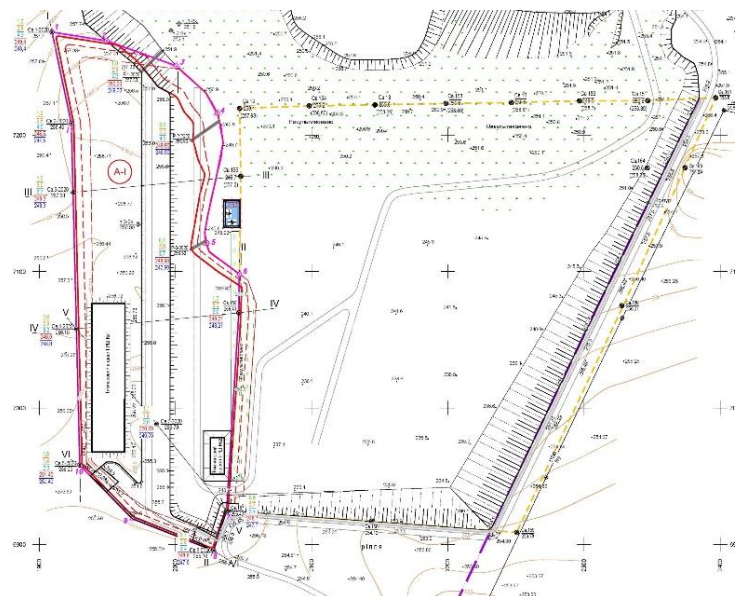


Рисунок 2 – План кар'єру Жидачівського родовища суглинків

На рис. 3 представлено результати моделювання стійкості укосу суглинків при такому навантаженні. Коефіцієнт стійкості становить $k_c=0,911$, тобто неробочий борт став нестійким і виникає небезпека утворення зсувних явищ. Для того, щоб забезпечити стійкість укосу досліджуваної ділянки кар'єру в його кінцевому положенні, запропоновано укріпити борт буронабивними палями, які розташовані в один ряд на відстані 1 м одна від одної [3].

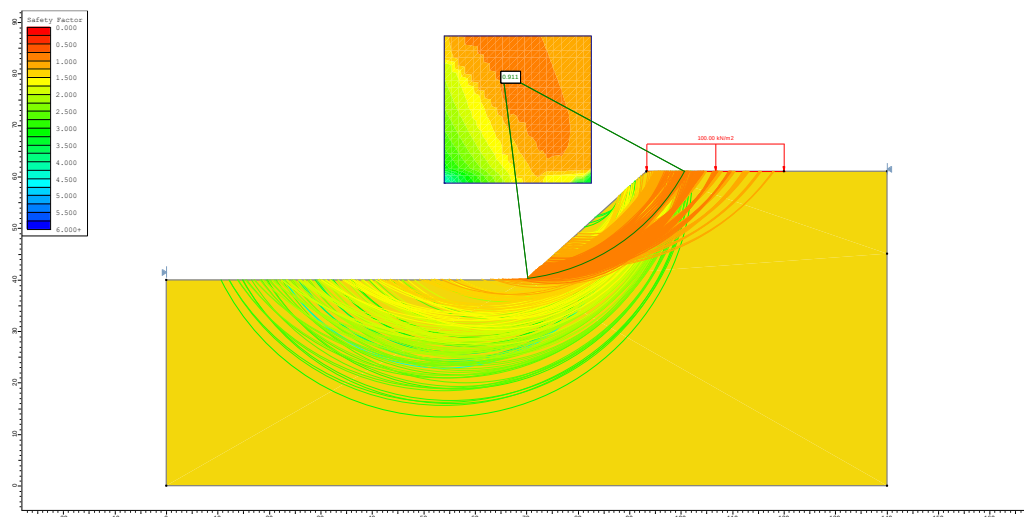


Рисунок 3 – Поверхня ковзання при мінімальному коефіцієнті стійкості в прибортовому масиві

Для розрахунку такої захисної споруди попередньо приймаємо наступні характеристики палі: діаметр палі – $d = 750$ мм; клас бетону – B15; клас арматури – A400; кількість та діаметр арматури – $8\varnothing 18$ мм; товщина захисного шару арматури – $a_s = 50$ мм.

Утримуючу конструкцію з буронабивних паль розташуємо приблизно посередині укосу. Глибина заглиблення палі нижче рівня лінії ковзання, згідно [3], становить 7,5 м.

Результати моделювання стану стійкості укосу борта показали, що мінімальний коефіцієнт стійкості укосу борта кар'єра для даних умов склав $k_c=1,099$, тобто борт став стійким. Однак, згідно нормативних вимог, коефіцієнт стійкості повинен становити $k_c \geq 1,2$. Отже, конструкція з одного ряду буронабивних паль не забезпечує нормативної стійкості. Тому пропонується конструкція з двох рядів паль при відстані між рядами 4,5 м (рис. 4). Довжину паль 1-го ряду рекомендовано обрати 16 м, довжину паль 2-го ряду – 20 м для забезпечення однакового рівня підшви паль.

Як видно з рисунку, коефіцієнт стійкості борта кар'єра з використанням підсилюючої конструкції з двох рядів паль дорівнює $k_c=1,218$, тобто він є більшим, ніж нормативне значення $k_{cn}=1,2$.

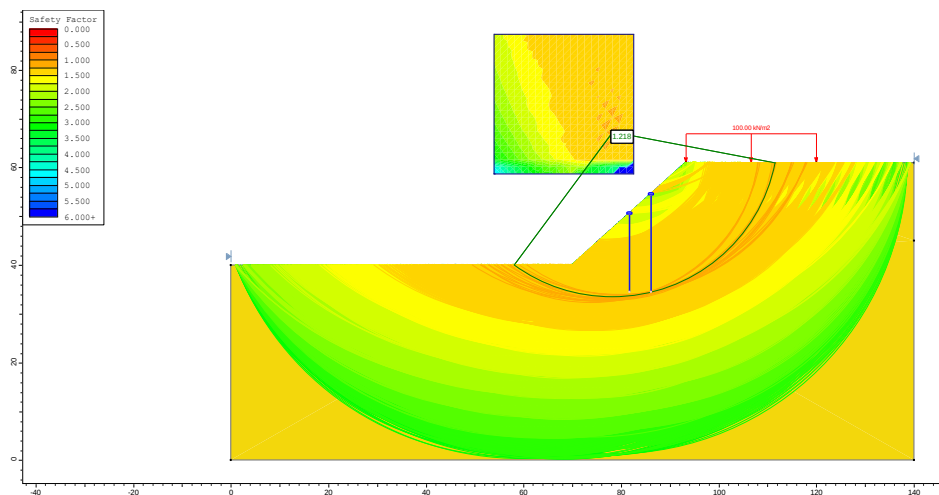


Рисунок 4 – Результати моделювання стану стійкості прибортового масиву суглинків при дії зовнішнього навантаження з двома рядами буронабивних паль

Висновки. За результатами моделювання природного стану прибортового масиву суглинків висотою $H=21$ м та кутом укосу $\alpha=42^\circ$ встановлено, що коефіцієнт стійкості укосу дорівнює $k_c=1,069$. Отже, укіс є відносно стійким.

При додатковому навантаженні $q=100$ кПа від дії автотранспорту коефіцієнт стійкості склав $k_c=0,911$, тобто досліджуваний борт кар'єра став небезпечним.

Для виконання нормативної вимоги щодо стійкості укосів, при якій коефіцієнт стійкості повинен бути $k_c \geq 1,2$, запропоновано підсилюючу конструкцію з двох рядів буронабивних паль, відстань між якими становить 4,5 м, довжина свердловин 1-го ряду – 16 м, 2-го ряду – 20 м. Коефіцієнт стійкості укосу на разі склав $k_c=1,218$.

Отримані результати дозволяють продовжити виконання наукових досліджень в напрямку проєктування захисних конструкцій на уступах та бортах кар'єрів для унеможливлення виникнення зсувних явищ.

Список використаної літератури

[1] М.В. Дзьоба, А.А. Міщенко, О.О. Фролов. «Проблема забезпечення стійкості укосів уступів і бортів кар'єрів». *Тези Всеукраїнської науково-практичної онлайн-конференції аспірантів, молодих учених та студентів, присвяченої Дню науки*, Житомирська політехніка, 154–155, 2023. <https://conf.ztu.edu.ua/wp-content/uploads/2023/06/hirnytstvo.pdf>

[2] M.V. Dzoba, I.D. Lytvynchuk, O.O. Frolov. «Study of the stability of the working bench of quartz sands». *6th International Scientific and Technical Internet Conference "Innovative development of re-source-saving technologies and sustainable use of natural resources"*, Petroșani: UNIVERSITAS Publishing, 151–154. 2023.

https://www.upet.ro/cercetare/manifestari/Ukraine_2023_Book_of_Abstracts.pdf

[3] М.В. Дзьоба, О.О. Фролов. «Забезпечення стійкості укосу гірського масиву при дії на нього додаткового навантаження». *Збірник наукових праць НГУ*, № 79, с. 26-37. 2024. <https://doi.org/10.33271/crpnmu/79.026>

УДК 691.5:666.942

В.І. Шамрай, к.т.н., доцент,

А.В. Шуляк, студент,

Державний університет «Житомирська політехніка», Україна

ВИВЧЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ДРІБНОДИСПЕРСНИХ ВІДХОДІВ ПРИРОДНОГО КАМЕНЮ ЯК ЗАМІННИКА ЦЕМЕНТУ В БЕТОНІ

У роботі досліджено можливість ефективного використання дрібнодисперсних відходів природного каменю, зокрема гранітного шламу, як часткової або повної заміни цементу у бетонних сумішах. Відбір зразків здійснено на підприємстві ТОВ «Омелянівський кар'єр». Встановлено хімічний та гранулометричний склад відходів, проведено їхню лужну активацію 12М NaOH протягом 24 годин. Проведено механічні та фізичні випробування бетонів, зокрема визначено час проходження ультразвуку, міцність на стиск та пористість матеріалу.

Ключові слова: бетон, цементозамінник, гранітний шлам, дрібнодисперсні відходи, пористість, міцність на стиск, ультразвуковий контроль.

This study investigates the potential for effective utilization of fine-grained waste from natural stone processing, particularly granite sludge, as a partial or complete replacement for cement in concrete mixtures. Sample collection was carried out at the "Omelyanivskyi Quarry" enterprise. The chemical and granulometric composition of the waste was determined, followed by alkaline activation in 12M NaOH solution for 24 hours. Mechanical and physical tests were conducted on the samples, including ultrasonic pulse velocity measurements, compressive strength, and porosity assessment.

Keywords: concrete, cement substitute, granite sludge, fine stone waste, porosity, compressive strength, ultrasonic testing.

Вступ. Зростання обсягів відходів каменеобробної промисловості є однією з актуальних екологічних проблем сьогодення. Лише в Україні щороку накопичуються сотні тисяч тон дрібнодисперсних залишків природного каменю, значна частина яких не утилізується та спричиняє забруднення ґрунтів, поверхневих вод і захащення сільськогосподарських угідь. Водночас такі відходи можуть мати значний потенціал повторного використання в будівельній галузі. Одним із перспективних напрямів є їх застосування як часткової або повної заміни цементу в бетонних сумішах, що дозволяє зменшити техногенне навантаження на довкілля та знизити вартість будівельних матеріалів.

Мета та завдання. Метою дослідження є оцінка ефективності використання дрібнодисперсних відходів природного каменю як часткової або повної заміни цементу в бетоні з урахуванням їх впливу на фізико-механічні властивості отриманих матеріалів.

Завдання дослідження:

1. Провести відбір та підготовку зразків дрібнодисперсних відходів природного каменю.

2. Визначити хімічний склад та гранулометричну характеристику досліджуваних відходів.

3. Здійснити лужну активацію відходів у розчині 12М NaOH.

4. Приготувати серії бетонних сумішей із різним вмістом відходів як заміника цементу (0–100%).

5. Провести випробування бетонних зразків з використанням ультразвукових методів, молотка Шмідта та пресу.

6. Оцінити вплив кількості відходів на міцність при стисканні, щільність і пористість бетону.

7. Проаналізувати доцільність та ефективність застосування дрібнодисперсних відходів як альтернативного цементовмісного компонента.

Матеріали та результати досліджень. Методика впровадження дрібнодисперсних відходів природного каменю у бетонні суміші полягає у наступному:

1. Проводився відбір та підготовка зразків дрібнодисперсних відходів природного каменю на ТОВ «Омелянівський кар'єр»;

2. Визначався хімічний та гранулометричний склад дрібнодисперсних відходів природного каменю;

3. Проводилася лужна активація дрібнодисперсних відходів природного каменю у 12М NaOH протягом 1 доби;

4. Проводилось замішування бетону із заміною цементу (від 0 до 100%) на дрібнодисперсні відходи природного каменю (рецептура наведена у табл. 1);

5. Проводилось випробування бетонних зразків з використанням ультразвукового пристрою, молотка Шмідта та пресу.

Таблиця 1 – Рецептuru виготовлення бетонних зразків

Заміна цементу, %	Цемент (кг)	Кам'яний шлам (кг)	Пісок (кг)	Щебінь (кг)	Вода (л)
0	0,84	0	2,25	3,6	0,48
10	0,756	0,084	2,25	3,6	0,48
20	0,672	0,168	2,25	3,6	0,48
30	0,588	0,252	2,25	3,6	0,48
40	0,504	0,336	2,25	3,6	0,48
50	0,42	0,42	2,25	3,6	0,48
60	0,336	0,504	2,25	3,6	0,48
70	0,252	0,588	2,25	3,6	0,48
80	0,168	0,672	2,25	3,6	0,48
90	0,084	0,756	2,25	3,6	0,48
100	0	0,84	2,25	3,6	0,48

Проведений гранулометричний та хімічний аналіз [1] показують, що дрібнодисперсні відходи природного каменю, утворені під час руйнування природного каменю, складається переважно з дрібнодисперсних частинок

розміром від 500 до 1000 мкм. Основним компонентом є діоксид кремнію (SiO_2) — до 70%, що забезпечує високу хімічну стабільність. До складу також входять оксиди алюмінію (Al_2O_3), заліза (Fe_2O_3), калію та натрію, що потенційно сприяють пуцолановим реакціям у цементних системах. Завдяки своїм фізико-хімічним властивостям гранітний шлам може бути використаний як мінеральна добавка або частковий заміник цементу в бетоні.

Внаслідок цього, було досліджено вплив вмісту дрібнодисперсних відходів природного каменю на час проходження ультразвуку та міцність при стисканні матеріалу. Результати експериментальних випробувань показано на рис. 1-2.

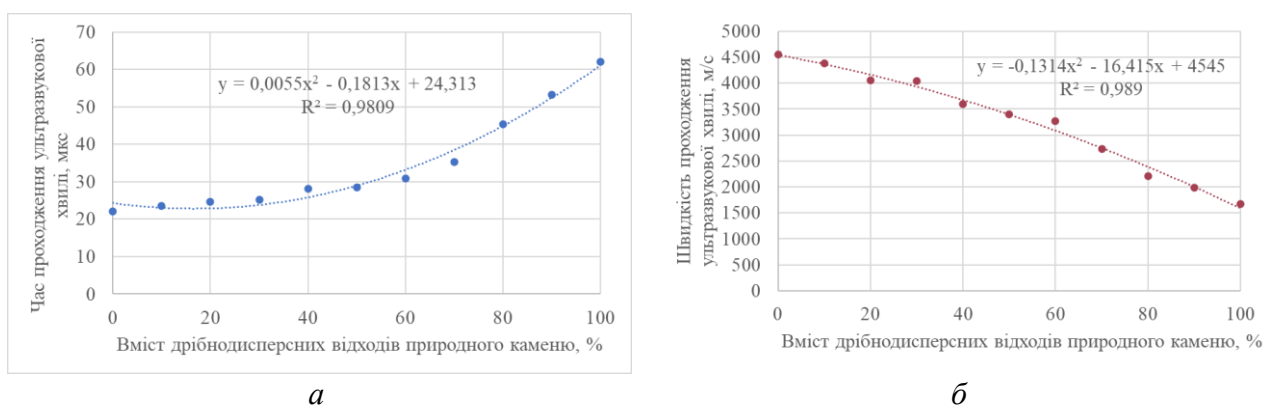


Рисунок 1 – Результати ультразвукового дослідження: *а* – час проходження ультразвукової хвилі; *б* – швидкість проходження ультразвукової хвилі

Відповідно до рис. 1, на початку графіку час проходження ультразвуку незначно зменшується при невеликому вмісті відходів (до 15-20%), потім значно зростає зі збільшенням їхньої кількості. Це вказує на можливі зміни в щільності та структурі матеріалу. Зі збільшенням вмісту дрібнодисперсних відходів природного каменю швидкість ультразвукової хвилі спочатку спадає, ймовірно, через зростання пористості або неоднорідності структури.

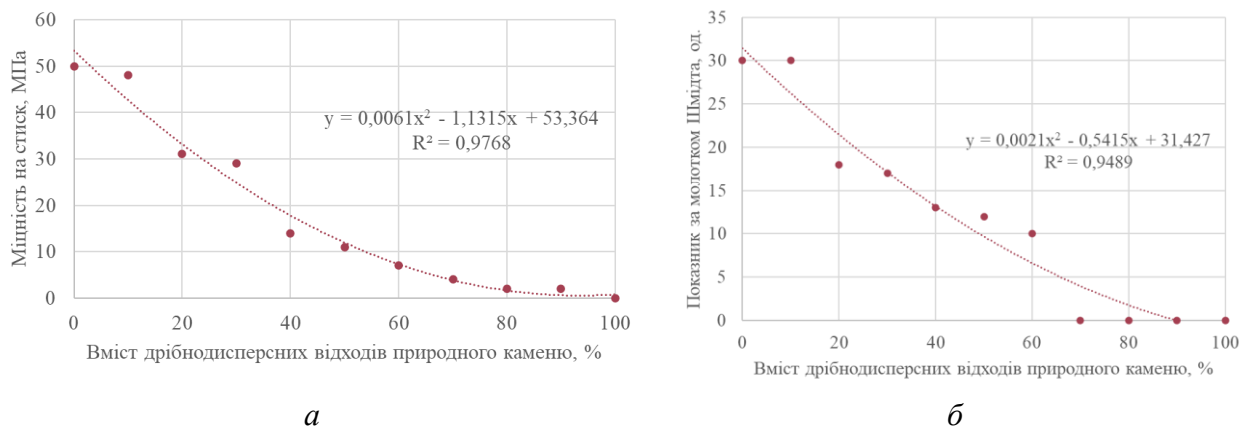


Рисунок 2 – Результати випробування на міцність: *а* – вимірювання границі міцності на стиск за допомогою пресу; *б* – вимірювання міцності за допомогою молотка Шмідта

На рис. 2, а спостерігається значне зниження міцності на стиск зі збільшенням вмісту дрібнодисперсних відходів природного каменю, що добре апроксимується поліноміальною кривою другого ступеня ($R^2=0,9913$). Результати випробування показника міцності за допомогою молотка Шмідта показує аналогічну тенденцію для пористості: зі зростанням вмісту відходів пористість матеріалу також збільшується, що підтверджується високим коефіцієнтом детермінації ($R^2=0,9922$). Обидва графіки вказують на негативний вплив збільшення частки дрібнодисперсних відходів на механічні властивості та структуру матеріалу. Зростання пористості, ймовірно, є однією з основних причин зниження міцності на стиск.

Висновки:

1. Спостерігається нелінійна залежність часу проходження ультразвуку від вмісту дрібнодисперсних відходів.
2. При низькому вмісті відходів (до 15-20%) час проходження ультразвуку дещо зменшується.
3. Подальше збільшення вмісту відходів призводить до зростання часу проходження ультразвукової хвилі.
4. Така динаміка вказує на складний вплив відходів на структуру матеріалу, спочатку сприяючи, а потім перешкоджаючи поширенню ультразвуку.
5. Існує чітка тенденція до зниження міцності при стисканні зі збільшенням вмісту дрібнодисперсних відходів.
6. Зростання частки відходів негативно впливає на здатність матеріалу витримувати навантаження на стискання.
7. Залежність між міцністю та вмістом відходів добре описується поліноміальною кривою другого ступеня з високим коефіцієнтом детермінації.
8. Отримані дані свідчать про погіршення механічних властивостей матеріалу при збільшенні вмісту дрібнодисперсних відходів природного каменю.

Список використаної літератури

- [1] В. І. Шамрай, В. В. Мельник-Шамрай, А. Г. Темченко, А. М. Махно, Р. М. Ігнатюк, «Дослідження якісних властивостей відходів каменевидобування та каменеобробки з метою їх використання як сировини для виготовлення геополімерного бетону», *Технічна інженерія*, вип. 1(91), с. 385–397, 2023. DOI: [10.26642/ten-2023-1\(91\)-385-397](https://doi.org/10.26642/ten-2023-1(91)-385-397).
- [2] В. І. Шамрай, І. В. Леонєць, «Перспективи використання дрібнодисперсних відходів каменедобувного та каменеобробного виробництва у геополімерних сумішах», *Збірник матеріалів XIII Міжнародної науково-практичної конференції «Коштовне та декоративне каміння: актуальні питання геологічної експертизи, геології, видобутку, обробки і використання»*, 2024.
- [3] V. Shamrai, I. Leonets, V. Melnyk-Shamrai, I. Patseva, and Y. Naumov, “Reuse of stone working enterprise slurry in geopolymer and concrete products,” *Mining of Mineral Deposits*, vol. 18, no. 4, pp. 10–17, 2024. doi: [10.33271/mining18.04.010](https://doi.org/10.33271/mining18.04.010).

УДК 504.53.062

І.А. Піскун, аспірант

Д.І. Заліван, студент

Я.О. Наумов, асистент

С.І. Башинський, к.т.н., доцент

Державний університет «Житомирська політехніка»

ДОСЛІДЖЕННЯ ДОЦІЛЬНОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ БІОЧАРУ ЯК ЗАСОБУ ВІДНОВЛЕННЯ РОДЮЧОСТІ ҐРУНТІВ, ПОРУШЕНИХ ВИДОБУТКОМ ТИТАНОВОЇ СИРОВИНИ

Наведено результати дослідження щодо доцільності використання біоچارу як добавки для рекультивації відвалів ільменітових родовищ. Встановлено, що оптимальним з огляду на ефективність і економічну доцільність є застосування 15 % біоچارу або його поєднання з торфом у співвідношенні 5 % + 5 % відповідно, що забезпечує не лише нейтралізацію кислотності, а й створює сприятливі умови для росту рослин піонерів.

Ключові слова: ґрунт, рекультивація, біочар, родовище ільменітів, родючість ґрунтів.

The article presents the results of a study on the feasibility of using biochar as an additive for the reclamation of ilmenite deposit dumps. It has been established that the optimal method, taking into account efficiency and economic feasibility, is the use of 15% biochar or its combination with peat in a ratio of 5% + 5%, respectively, which not only neutralizes acidity, but also creates favorable conditions for the growth of pioneer plants.

Keywords: soil, reclamation, biochar, ilmenite deposit, soil fertility.

Вступ. Видобуток ільменіту в Україні здебільшого відбувається відкритим способом, що спричиняє помітне порушення природних ландшафтів, зменшення площ родючих земель, а також ерозію ґрунтів і порушення водного балансу. Унаслідок таких антропогенних змін нагальною стає потреба у комплексній рекультивації ділянок, яка має на меті відновлення екосистеми та повернення земель до стану, придатного передусім для сільськогосподарського використання, що особливо актуально для України.

Аналіз стану ґрунтів на територіях, що пройшли рекультивацію після видобування ільменіту, засвідчує їхню переважно піщану або супіщану структуру з низькими вологоутримуючими властивостями та обмеженим вмістом поживних речовин. З огляду на це застосування добрив і агротехнічних заходів стає визначальним чинником для прискорення відновлення продуктивності ґрунтів і підвищення їх економічної цінності. Пошук і впровадження нових, більш ефективних методів рекультивації надзвичайно важливі для забезпечення стійкого розвитку гірничої галузі та збереження природних ресурсів. Особливого значення ця проблема набуває в умовах сьогодення, коли через збройний конфлікт країна вже втратила значну частину сільськогосподарських угідь [1].

Метою роботи є комплексне обґрунтування ефективності біоچارу як фіторе mediaційної добавки для відновлення агрохімічних властивостей ґрунтів, порушених гідромеханізованим видобутком ільменіту.

Матеріали та результати досліджень. Відвали гірничих підприємств, що займаються розробкою ільменітових родовищ, формуються переважно з відходів видобутку та збагачення руди. Хімічний склад цих відвалів істотно залежить від мінералогічних особливостей конкретного родовища та застосовуваних технологічних процесів. Як правило, серед основних компонентів присутні оксиди кремнію (SiO_2), алюмінію (Al_2O_3), заліза (Fe_2O_3 та FeO), титану (TiO_2) та інші сполуки в менших кількостях [2].

Для прикладу, Валки-Гацьківське розсипне родовище ільменіту (Іршанська група родовищ в Україні) обране в якості об'єкта дослідження, сформоване переважно алювіальними і елювіальними відкладами різнозернистого піску, суглинків, супісків і вторинних каолінів. Основний рудний мінерал у цих відкладах — ільменіт, зерна якого коливаються за розмірами у діапазоні від 0,1 до 2–3 мм. Вміст ільменіту в розсипах може змінюватися від 15–20 до 200–400 кг/м³, а середній показник становить 60–80 кг/м³. Водночас до уваги слід брати вплив таких чинників, як вивітрювання, гідрологічні умови та ступінь вилугування, адже вони можуть призводити до суттєвих відмінностей у хімічному складі відвалів, тож у кожному конкретному випадку варто проводити детальні аналітичні дослідження.

З огляду на описані мінеральні особливості та потенційну наявність важких металів у таких відвалах, постає питання щодо ефективних способів поліпшення їх фізико-хімічних властивостей і зменшення токсичного впливу на рослини та довкілля. У цьому контексті потенційно вагому роль може відіграти внесення біочару як перспективного матеріалу для рекультивації та відновлення родючості деградованих ґрунтів [3].

Біочар (біовугілля) являє собою пористий матеріал, що отримується методом піролізу органічних решток (деревини, сільськогосподарських відходів чи іншої біомаси) [4]. Серед важливих аспектів дії біочару окрему увагу варто звернути на вплив на кислотно-лужний баланс, адже він частіше за все підвищує або стабілізує показник рН, що є важливим для кислих хвостів з високим вмістом сульфідів, здатних утворювати сірчану кислоту при окисненні. З урахуванням того, що у хвостосховищах, де відбувається видобуток ільменіту гідромеханізованим способом, рН часто зміщується в кислу зону (аж до значень нижче 5), внесення біочару сприяє його поступовій нейтралізації.

Ефективна витрата біочару залежатиме від типу ґрунту в який він вноситься. Для забруднених ґрунтів (з оксидами металів чи важкими металами) рекомендується додавання біочару у кількості 5–15% за масою залежно від рівня забруднення. У випадку піщаних, або малородючих ґрунтів це значення становить 5–8% за масою, що дозволяє покращити утримання води та поживних речовин. Для легких ґрунтів (з низькою структурою) достатньо 3–5% за масою, що дозволить забезпечити покращення структури та зменшення ущільнення.

Для підтвердження доцільності застосування біочару з метою відновлення порушених гірничими роботами площ було проведено емпіричне дослідження, яке дозволить зробити прогноз стосовно ефективності запропонованих рішень за

умов рекультивації ільменітових родовищ. В ході виконання дослідження в межах рекультивованих водогосподарським методом ільменітових родовищ було відібрано 4 зразки ґрунту по 2 кг кожен.

Кожну первинну пробу ґрунту було квартовано, унаслідок чого одержано чотири лабораторні зразки масою по 0,5 кг. До трьох з них було додано біочар у дозах 5, 10 та 15 % за масою. Четвертий зразок, з огляду на потенційну синергетичну дію органічних компонентів, збагачено комплексною добавкою, яка містила 5 % біочару та 5 % верхового торфу, хімічно та фізично спорідненого з біочаром і здатного посилювати сорбційно-буферні властивості суміші.

Після ретельного перемішування добавок із субстратом визначено початкову кислотність (рН) кожного зразка, а подальший моніторинг цього показника здійснювали з інтервалом 14 діб упродовж періоду у 42 дні.

Таким чином було зібрано початкові дані, що дозволили кількісно оцінити швидкість та амплітуду нейтралізації кислотності під впливом різних доз біочару та його комбінації з торфом.

Часові криві рН для чотирьох місць відбору проб (рис. 1) демонструють одноманітну тенденцію підвищення кислотно-лужного показника, яке зберігає зростаючий характер. Найбільший ефект спостерігається у випадку внесення 15 % біочару, середнє зростання рН становить $\approx 0,3$ од. Доза 10 % забезпечує дещо меншу нейтралізацію ($\approx +1,5$ од.), так само як і 5 % біочару (окрім 4-ї проби).

Комбінована добавка «5 % біочару + 5 % торфу» також демонструє приріст рН, подібний до додавання 15 % біочару, перевищуючи його на окремих часових відрізках. Це свідчить про синергетичний ефект, коли торф, збагачений гуміновими кислотами, підсилює катіонообмінну ємність та сприяє додатковій буферизації, дозволяючи зменшити витрати біочару без втрати ефективності.

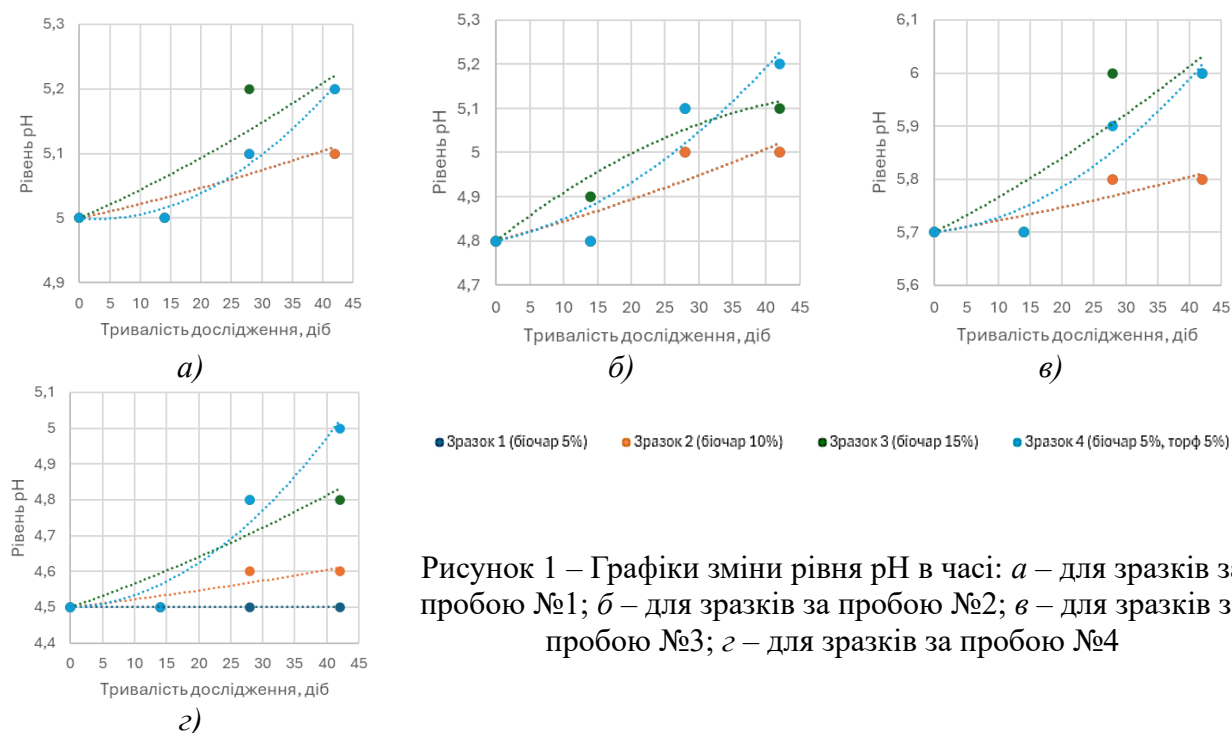


Рисунок 1 – Графіки зміни рівня рН в часі: а – для зразків за пробою №1; б – для зразків за пробою №2; в – для зразків за пробою №3; г – для зразків за пробою №4

Проведене дослідження було спрямоване на удосконалення методів сільськогосподарської рекультивації відвалів та хвостосховищ, утворених унаслідок гірничих робіт з видобування ільменіту. Експериментально доведено, що внесення біочару істотно покращує агрохімічний стан деградованих субстратів, оскільки вже на четвертому тижні після застосування спостерігалось підвищення показника рН, причому найбільша нейтралізація кислотності відбулася у варіантах із 15 % біочару та з комплексною добавкою 5 % біочару + 5 % торфу. У першому випадку рН зсунувся у бік нейтральних значень, що свідчить про високу буферну здатність карбонізованої біомаси, а у другому, помітний приріст рН може бути пояснений збагаченням ґрунту гумусом завдяки торфу, що потенційно підвищує його родючість.

Висновки. Отже, результати дослідження підтверджують доцільність використання біочару як добавки для рекультивації відвалів ільменітових родовищ. Оптимальним з огляду на ефективність і економічну доцільність є застосування 15 % біочару або його поєднання з торфом у співвідношенні 5 % + 5 % відповідно, що забезпечує не лише нейтралізацію кислотності, а й створює сприятливі умови для росту рослин-піонерів. Подальше масштабування цієї технології, доповнене висаджуванням невибагливих бобових культур (зокрема люпину), здатне пришвидшити формування гумусового горизонту, покращити водний режим і сприяти стійкому відновленню родючості порушених земель. Впровадження таких підходів відповідає стратегії сталого розвитку й екологічної реабілітації промислових ландшафтів України.

Список використаних джерел

[1] Іванов Є. А., Біланюк В. І. Проблеми рекультивації і ревіталізації земель, порушених гірничими роботами. Матеріали четвертої міжнародної науково-практичної конференції "Надрокористування в Україні. Перспективи інвестування", Трускавець, Україна, 6–10 листопада, 2017, С. 262–270.

[2] Смірнов А., Богданова М., Венглівська В. Мінералогічні особливості та умови формування ільменітових руд Валки-Гацківського родовища. Вісник Львівського університету. Серія геологічна. 2016, Вип. 30, С. 63-69.

[3] Крюченко Н.О., Язвинська М.В., Жовинський Е.Я. Еколого-геохімічна оцінка поверхневих відкладів території Іршанського родовища ільменіту. Scientific Journal «ScienceRise», 2015, Вип. 3, № 1(8), С. 25-28.

URL: <https://doi.org/10.15587/2313-8416.2015.38728>

[4] Заліван Д.І., Піскун І.А. Мультидисциплінарний підхід до рекультивації порушених гірничими виробками площ на прикладі ільменітових кар'єрів. Тези ІІ Всеукраїнської науково-практичної конференції «Сучасні проблеми гірництва та будівництва» 21 листопада 2024 року. Житомир: «Житомирська політехніка», 2024, С. 30-31.

Електронне видання

Матеріали
міжнародної науково-технічної конференції
«Сучасний стан і перспективи розвитку геотехнічної інженерії»

Комп'ютерна верстка: Ган О.В., Фролов О.О.

Наукові публікації подано в авторській редакції. За їх зміст, можливі помилки, підбір списку літератури та коректність посилань несуть відповідальність автори

Підписано у світ 22.07.2025

ФОП Цибульська В.О.

Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи
до Державного реєстру видавців, виготовлювачів і
розповсюджувачів видавничої продукції
ДК №6562 від 03.01.2019

ISBN 978-617-8324-55-1



Усі права застережено!

Будь-яку частину цього видання забороняється у будь-якій формі перекладати (зберігати у пошукових системах) та передавати будь-яким способом (фотокопіювальним, електронним або іншим) без письмової згоди власника авторських прав.