UDC 553.94:550.42

Kozii Ye.S., Candidate of Geological Sciences,
Senior Research Fellow of Laboratory of Studies of Structural Changes Rocks
M.S. Poliakov Institute of Geotechnical Mechanics of the NAS of Ukraine,
Dnipro, Simferopolska st., 2a, Ukraine
Senior Research Fellow of Department of Mining Engineering and Education
Dnipro University of Technology,
Dnipro, Dmytra Yavornytskoho ave. 19, Ukraine
Associate Professor of Department of Mining Engineering
LLC «Technical University "Metinvest Polytechnic"»
Zaporizhzhia, Southern Highway 80, Ukraine

MOLYBDENUM (MO) IN COAL OF WESTERN DONBAS

Molybdenum belongs to the rare refractory elements [1], which determines its primary industrial value: the ability to operate under critical temperatures and loads where other metals lose their properties.

Molybdenum is included in the list of minerals of national importance, approved by the Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine dated December 12, 1994, No. 827 (as amended on May 23, 2025). This confirms the strategic status of this metal for the economy of Ukraine and establishes the necessary foundation for its further study as a byproduct component of coal deposits. The extraction of molybdenum from coal and its combustion products is a pressing task that aligns with state priorities in the field of subsoil use.

Due to its unique physicochemical properties and high catalytic activity, molybdenum has become an indispensable critical metal on a global scale. It has found widespread application not only in the steel, defense, nuclear, machinery, and aerospace industries but also as an effective catalyst in oil refining, coal liquefaction, acrylic acid production, and carbon nanotube synthesis [2]. Molybdenum serves as a component for strengthening alloys (steel and cast iron). Furthermore, molybdenum chemical compounds are essential in the manufacture of paints, technical lubricants, and the acceleration of chemical reactions [3].

The gradual depletion of limited molybdenum reserves due to large-scale exploitation is driving increased global competition for this strategically important element [2]. Furthermore, a steadily high global consumption of molybdenum is projected, driven by the active development of renewable energy infrastructure and corresponding government investments [3].

The Chinese government's implementation of export controls on molybdenum powders in February 2025 [3] served as a critical signal for the global market, highlighting the vulnerability of modern technological supply chains to monopoly suppliers. Since molybdenum is an indispensable component in many industries, any supply restrictions pose a threat to the national security and economic stability of the United States and EU countries. Such instances bring the issue of raw material sovereignty to the forefront, forcing nations to invest in developing their own alternative sources of critical metals. In this context, the concept of extracting critical components from unconventional sources, particularly from coal and its combustion products, takes on particular importance.

Determining the molybdenum content, as with other associated elements in the feed coal, is essential, as their concentration, distribution, and behavior during and after combustion largely depend on the content and distribution of trace elements within the fuel [4].

Average molybdenum content in the coal seams of the Western Donbas varies between 0.1 and 2.3 g/t. Its maximum concentrations reach up to 20 g/t, which, according to modern estimates, exceeds the average crustal abundance (clarke) for the upper continental crust by approximately 18 times [5]. On average, about 80% of molybdenum is recovered in the light fraction (Fig. 1).

Molybdenum is frequently encountered in the coal seams of the Western Donbas, with its occurrence coefficient reaching up to 100%, dominating the distribution structure (Fig. 2). Most coal seams contain this element, which serves as a strong argument for the industrial significance of the Western Donbas deposits as a potential source of molybdenum. This high occurrence ensures the predictability of extraction and the stability of the valuable component's content in the coal delivered to processing plants. Instances of its absence or low concentration are rare, which simplifies the technological planning for its byproduct recovery.

The extraction of molybdenum from coal and its combustion products opens up prospects for implementing circular economy technologies, where the recovery of valuable byproduct components becomes an integral part of the rational use of coal resources and the strengthening of the state's industrial potential.

The extraction of associated elements, including molybdenum, from coal and its combustion products is a strategically justified step based on the utilization of existing industrial infrastructure and established raw material flows. Given the significant resource potential of the Western Donbas coal seams, integrating the recovery of valuable metals into the technological cycle of coal mining will allow the transformation of the traditional energy sector into a source of critical raw materials for high-tech industries.

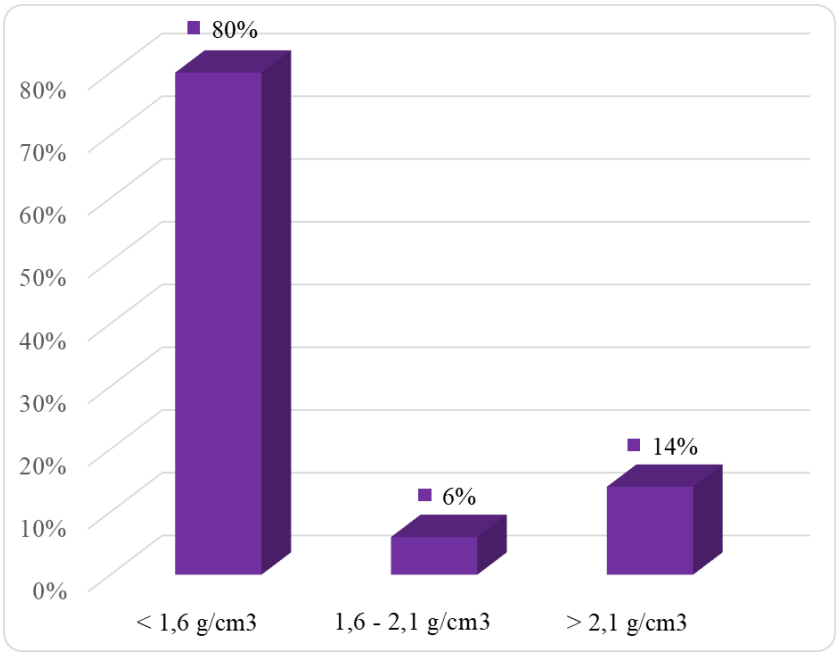


Fig. 1. Average molybdenum recovery from coal fractions of various densities in the Western Donbas, %

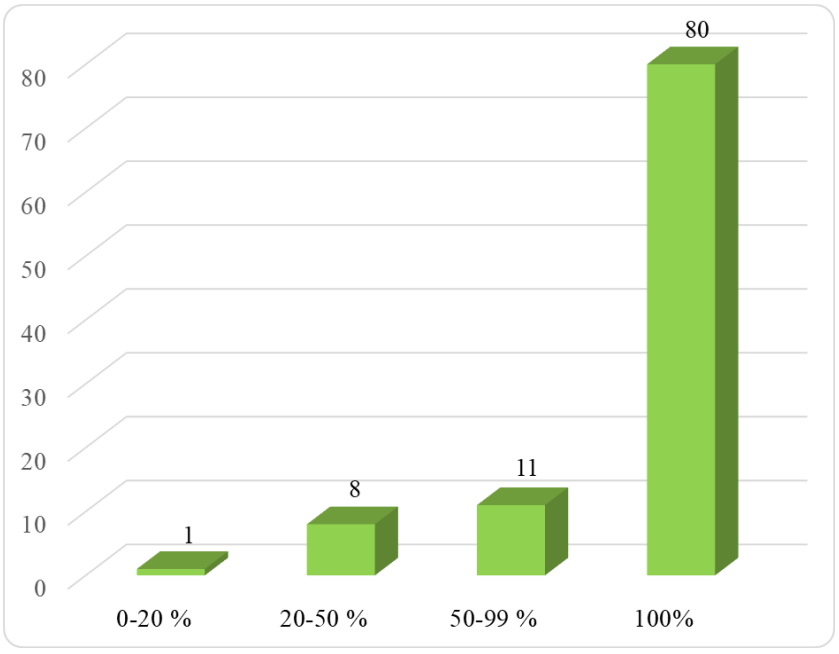


Fig. 2. Occurrence of molybdenum in the coal seams of the Western Donbas

References:

1. Biletskyy V. S. (Ed.). (2007). Concise Mining Encyclopaedia. (Vol. 2). Donbas. 652 p.

2. Long J., Zhang S., Luo K. (2023). Discovery of anomalous molybdenum enrichment in Ordovician and Silurian stone coal: Relevance, origin and recommendations. Chemosphere, 320, Article 137975. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.137975

3. U.S. Geological Survey. (2026). Molybdenum (Mineral Commodity Summaries). https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2026/mcs2026-molybdenum.pdf

4. Brownfield M. E. (2002). Characterization and modes of occurrence of elements in feed coal and fly ash-An integrated approach (Fact Sheet 038-02). U.S. Geological Survey. https://doi.org/10.3133/fs03802

5. Rudnick R.L., Gao S. (2014) Composition of the Continental Crust. In: Holland, H.D. and Turekian, K.K., Eds., Treatise on Geochemistry, Elsevier, Oxford, 1-51. https://doi.org/10.1016/B978-0-08-095975-7.00301-6

УДК 622.271

Адамова В.О., аспірантка другого курсу кафедри відкритих гірничих робіт, група 184А-22-10, Інститут природокористування
Науковий керівник: Ложніков О.В., д.т.н., проф. кафедри відкритих гірничих робіт та раціонального надрокористування
Національний технічний університет «Дніпровська політехніка»

АНАЛІЗ СВІТОВОГО ДОСВІДУ ОСВОЄННЯ РОЗСИПНИХ РОДОВИЩ ТИТАН-ЦИРКОНІЄВИХ РУД ЗА ПРИНЦИПАМИ ЗАМКНУТОГО ЦИКЛУ

Розвиток сучасного суспільства вимагає дбайливого ставлення до навколишнього середовища, особливо коли розглядаються питання вдосконалення технологічних циклів важкої промисловості. Аналіз загального стану надрокористування в Україні дозволяє визначити, що спадщиною гірничодобувної промисловості є 10 млрд т відходів виробництва, які спричиняють техногенний ефект на земельні та водні ресурси, а також на атмосферне повітря. Важливим інструментом в зниженні техногенного навантаження на природні ресурси є комплексні підходи до використання первинних і вторинних ресурсів, а також максимальне вилучення мінеральної фракції з запобіганням її потрапляння у відходи виробництва.

Одними з найбільш перспективних до освоєння в Україні є титан-цирконієві родовища, оскільки країна має значні запаси цієї критичної мінеральної сировини згідно з законодавства ЄС. Однак їх ефективне освоєння неможливе без дотримання принципів циркулярних технологій, оскільки при розробці кар'єру важка мінеральна фракція складає приблизно 1 % від загального об'єму гірничої маси. Решта гірничих порід спрямовується у відвали і хвостосховища, розташовані поруч з кар'єром і гірничозбагачувальною фабрикою.

Аналіз вітчизняного досвіду в області підвищення якісних і кількісних показників надрокористування дозволяють встановити, що основні напрями розвитку технологічних схем полягають у впровадженні принципів замкнутого циклу. На існуючих підприємствах з розробки титан-цирконієвих розсипів в Україні застосовуються складні системи оборотного водопостачання та внутрішнє відвалоутворення (Вільногірський ГМК). Пісок, що міститься у корисній копалині після вилучення мінеральної фракції може використовуватися для відновлення ландшафту. Також при розробці Малишівського родовища титан-цирконієвих руд застосовуються технології селективного вилучення супутніх мінералів (дистен-силіманіту та ставроліту), що значно знижує об'єми утворення відходів переробки. В умовах розробки Межиріченського ГЗК застосовуються сучасні методи згущення хвостів, що містять глинисті породи, в результаті досягається значне зменшення площ шламосховищ.

Під час аналізу світового досвіду використання принципів циркулярної економіки при розробці титан-цирконієвих родовищ визначено, що сучасні гірничі компанії використовують замкнуті цикли при видобутку і переробці корисної копалини. Таким чином вони мінімізують вплив на навколишнє середовище та досягають суворих екологічних стандартів. Компанія «Iluka Resources» (Австралія), що є одним зі світових лідерів у видобутку циркону, використовує технологію «dry mining» (сухий видобуток), який дозволяє швидко повертати порушені землі у рекультивацією. За цієї технології поверхні хвостосховищ повертаються у попереднє використання протягом одного сезону. Компанія «The Chemours Company» (США), що працює на титанових родовищах у Флориді та Джорджії використовує систему глибокого очищення технічної води, що дозволяє працювати відмовитися від скидання стоків у природні водойми. Компанія «Rio Tinto / QMM» (Мадагаскар) є потужним виробником ільменітові сировини і використовує плавучі збагачувальні установки, розташовані на понтонах зі збагачувальними установками, що дозволяє отримувати важків мінерали у межах кар'єру, а пуста порода розміщується у відвал в обводненому просторі кар'єру, на поверхні якого в подальшому виконують рекультивацію з висадкою лісу.

Застосування технологічних рішень за принципами циклічної економіки, які дозволяють підвищувати ефективність надрокористування, можуть здійснюватися на різних етапах видобутку і переробки корисної копалини. Вони інтегруються безпосередньо в технологічні схеми розробки кар'єрів і функціонування збагачувальної фабрики. В другому випадку це можуть бути додаткові гвинтові та магнітні сепаратори, що працюють у єдиному водному контурі з повторною циркуляцією.

Технології замкнутого циклу в умовах розробки титан-цирконієвих розсипів забезпечують мінімізацію відходів шляхом повторного використання ресурсів (води, реагентів, породи), чим досягається підвищення вилучення мінеральної фракції. За рахунок замкнутого водопостачання і систем очищення (відстійників, циклонів) технічна вода постійно знаходиться у циклі збагачення та не потрапляє у зовнішні водойми. Це особливо критично, оскільки освоєння титан-цирконієвих розсипів потребує десятків мільйонів кубічних метрів води на рік. Впровадження у розробку технологічних схем селективної виїмка та супутнє вилучення

мінералів дозволяє крім ільменіту, рутилу та циркону, освоювати навіть рідкісноземельні елементи (наприклад, монациту). Розділення піщаних і глинистих порід, що містяться у корисній копалині дозволяє відмовитися від формування хвостосховищ, а розміщувати ці породи роздільно у зовнішніх відвалах відпрацьованого простору кар'єру. За рахунок такого складування досягається паралельна рекультивація земель разом з розробкою кар'єру. Зменшення відходів виробництва досягається шляхом комплексної переробки відходів і використання кварцових пісків, глин і суглинків як сировини для будівельної галузі.

За рахунок зазначених рішень досягається не лише ресурсозберігаючий але й економічний ефект, який забезпечує зниження витрат, додаткові доходи та відсутності штрафів. Зниження витрат на ресурси відбувається шляхом повернення до 95% води в технологічний цикл, що зменшує об'єми залучення її з надр, транспортуванні, а також скорочення податків за водокористування. Завдяки зменшенню об'ємів транспортної роботи в циркулярних схемах відбувається скорочення витрат на електроенергію. Реалізація супутніх корисних копалин (пісок, глина, суглинок) для будівельної промисловості дозволить отримати додаткові прибутки замість витрат грошей на утримання відвалів і хвостосховищ. Також додатковий прибуток досягається шляхом вилучення супутніх мінералів (ставроліту, дистен-силіманіту), ресурс якого раніше витрачався. За рахунок зменшення площ хвостосховищ і розміщення вмісних порід у внутрішніх відвалах значно скоротяться витрати на відновлення земель. Запропоновані технологічні рішення дозволять суттєво скоротити екологічний податок за розміщення відходів та нульові ризики отримати штрафи за забруднення ґрунтових вод зовнішніми хвостосховищами.

Світовий досвід підтверджує, що впровадження принципів циркулярної економіки в розробку титан-цирконієвих родовищ досягається шляхом збільшення капітальних інвестиції в обладнання замкнутого циклу (до 20%), але завдяки переліченим перевагам досягається зниження операційних витрат (до 30%). Таким чином інвестиційний проєкт з розробки титан-цирконієвого родовища стає більш стійкішим до коливань світових цін на титан.

Представлені результати отримано в рамках виконання Проєкту 2025.02/0048 «Обґрунтування параметрів ресурсозберігаючої технології замкнутого циклу при освоєнні критичної сировини титанових родовищ» за підтримки Національного фонду досліджень України.

Список використаних джерел:

1. Lozhnikov, O.V., Shustov, O.O., Chebanov, M.O. & Perkova, T (2022). Methodological principles of the selection of a resource-saving technology while developing water-bearing placer deposits Mining of Mineral Deposits, (16), 115-122. https://doi.org/10.33271/mining16.03.115

2. Ganzha, O. A., Kovalchuk, M. S., & Kuzmanenko, H. O. (2025). Zirconium-titanium deposits of Ukraine placer province: genesis, geological characteristics and mineralogy. Journal of Geology, Geography and Geoecology, 34(2), 275-291. https://doi.org/10.15421/112524

3. Lozhnikov, O., Sobko, B., Pavlychenko A. (2023). Technological Solutions for Increasing the Efficiency of Beneficiation Processes at the Mining of Titanium-Zirconium Deposits. Inzynieria Mineralna, 2023, (1), pp. 61–68. http://doi.org/10.29227/IM-2023-01-07

4. Singh, S., Maurya, P., Karmakar, A., Maurya (2025). Mining tailings as a frontier for sustainable nanomaterials: advancing circular economy and environmental innovation. *Environmental Geochemistry and Health, 47*(7), 265. https://doi.org/10.1007/s10653-025-02566-x

5. Antony Jose, S., Calhoun, J., Renteria, O. B. (2024). Promoting a circular economy in mining practices. Sustainability, 16 (24), 11016. https://doi.org/10.3390/su162411016

6. Kinnunen, P. H. M., & Kaksonen, A. H. (2019). Towards circular economy in mining: Opportunities and bottlenecks for tailings valorization. Journal of cleaner production, 228, 153-160. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.171

7. Upadhyay, A., Laing, T., & Kumar, V. (2021). Exploring barriers and drivers to the implementation of circular economy practices in the mining industry. Resources Policy, 72, 102037. https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2021.102037

8. Jones, P., & Wynn, M. G. (2021). The circular economy, resilience, and digital technology deployment in the mining and mineral industry. International Journal of Circular Economy and Waste Management (IJCEWM), 1(1), 16-32. https://doi.org/10.4018/IJCEWM.2021010102

УДК 69.059.2:620.17

Байда Д.М., к.т.н.
Сак В.В., студент 2 курсу, група ПЦБ-4, ФГСПБ
Державний університет «Житомирська політехніка»

ОСОБЛИВОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ НЕРУЙНІВНИХ МЕТОДІВ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ МІЦНОСТІ БЕТОНУ В ПРОЦЕСІ ОБСТЕЖЕННЯ ІСНУЮЧИХ КОНСТРУКЦІЙ

Важливою задачею для оцінювання технічного стану існуючих залізобетонних конструкцій є визначення міцності бетону. Від правильності вирішення цієї задачі залежить достовірність оцінювання фактичної надійності залізобетонних конструкцій та наступні рішення щодо поводження з ними під час подальшої експлуатації. Значні помилки можуть призвести до неприпустимого погіршення технічного стану у випадку завищення міцності бетону або до невиправданих витрат ресурсів на підсилення цих конструкцій у випадку заниженої оцінки.

В Україні для оцінювання міцності бетону в конструкціях застосовуються руйнівний та неруйнівні методи у відповідності до чинних стандартів, які перелічені в таблиці 1. Бажане застосування неруйнівних методів, оскільки дослідження виконують на реальних конструкціях, пошкодження яких не рекомендується і навіть може бути неприпустимим або неможливим.

Як видно з таблиці 1 серед неруйнівних методів виділяють умовно неруйнівні (обмежено руйнівні за іноземною термінологією). Застосування цих методів призводить до механічних пошкоджень поверхневого шару, які потребують наступного ремонту. При цьому конструкції в цілому зберігають свою працездатність, тому ці методи вважають умовно неруйнівними.

Таблиця 1

Методи визначення міцності бетону в конструкціях

Вид методу	**Найменування методу**	**Принцип**	**Стандарт**
Руйнівний	***Визначення міцності на зразках-кернах, які відібрані з конструкцій***	Пряме визначення міцності бетону	ДСТУ Б В.2.7-223 [1]; ДСТУ EN 12504-1 [2]
Умовно неруйнівні (Обмежено руйнівні)	***Відриву зі сколюванням***	Зв'язок міцності бетону та зусилля виривання анкеру з елементу конструкції з відривом та сколюванням бетону навколо анкеру	ДСТУ Б В.2.7-220 [3]
	Сколювання ребра	Зв'язок міцності бетону та зусилля сколювання ребра елемента конструкції	
	Відрив диска	Зв'язок міцності бетону та зусилля відриву приклеєного сталевого диску від поверхні	
	Визначення сили витягування (CAPO-test)	Зв'язок міцності бетону та зусилля витягування спеціального анкеру з елементу конструкції зі зрізом бетону навколо анкеру	ДСТУ EN 12504-3 [4]
Неруйнівні	***Пружного відскоку***	Зв'язок між міцністю бетону та відскоком бойка приладу від поверхні бетону	ДСТУ Б В.2.7-220 [3]; ДСТУ EN 12504-2 [5]
	Ударного імпульса	Зв'язок міцності бетону та енергії удару із змінами в момент зіткнення бойка приладу з поверхнею конструкції	ДСТУ Б В.2.7-220 [3]
	Пластичної деформації	Зв'язок міцності бетону та співвідношення розмірів відбитку на бетоні та сталевому стержні внаслідок удару індентора приладу по бетонній поверхні	
	Ультразвуковий	Зв'язок міцності бетону та швидкості проходження ультразвукових коливань в бетоні	ДСТУ Б В.2.7-226 [6]; ДСТУ EN 12504-4 [7]
Примітка. Жирним шрифтом виділені найбільш поширені методи.			

Неруйнівні методи можуть застосовуватися в рамках процедур:

- контролю якості бетону на заводах залізобетонних конструкцій та будівельних майданчиках;
- визначення міцності бетону існуючих будівельних конструкцій, що виконується під час обстеження будівель та споруд.

Особливу складність представляє задача визначення міцності бетону конструкцій в процесі обстеження. Ця задача має такі важливі особливості у порівняння з контролем якості:

- дійсне значення міцності бетону на момент обстеження не відоме через неможливість виконання випробувань на стандартних зразках;
- кількість випробувань найбільш достовірними методами обмежена;
- відбір зразків-кернів та застосування неруйнівних методів виконується в реальних конструкціях.

Перелічені особливості характеризують проблему достовірного оцінювання міцності бетону реальних конструкцій і обумовлюють зростання уваги до її вирішення у світі. Важливість ефективного вирішення цієї проблеми обґрунтована зростанням актуальності питання оцінювання технічного стану будівель у зв'язку із процесами старіння будівель та споруд. Через значну актуальність даної проблеми в світі приділяють велику увагу дослідженням в галузі застосування неруйнівних методів для оцінювання міцності бетону існуючих конструкцій. Ця увага характеризується роботою технічних комітетів різних міжнародних організацій: технічного комітету (TC 249-ISC) Міжнародного союзу лабораторій та експертів з будівельних матеріалів, систем та конструкцій RILEM (International Union of Laboratories and Experts in Construction Materials, Systems and Structures;); технічного комітету (ACI 288) Американського інституту бетону ACI (American Concrete Institute) та інших. Останніми результатами цієї діяльності є відповідні технічні рекомендації [8, 9], які враховують сучасний стан розвитку наукових досліджень та сприяють впровадженню кращих практик в галузі неруйнівних досліджень міцності бетону існуючих конструкцій.

В Україні приділяється недостатньо уваги цій проблемі. Більшість досліджень стосується задач контролю якості або прямо не стосуються реальних умов досліджень міцності бетону в конструкціях. Розглянемо чинні нормативні положення та їх недоліки щодо застосування на практиці.

Кожен із перелічених методів випробувань міцності бетону (див. табл. 1) за результатами аналізу нормативних документів та довідкової літератури має свої недоліки і переваги. Більшість з недоліків пов'язана з великою кількістю факторів, які впливають на достовірність оцінювання міцності бетону неруйнівними методами, а саме:

- *склад бетону* (співвідношення компонентів, види та зерновий склад заповнювачів, наявність добавок тощо);
- *вологість бетону* та *температурні умови* в процесі випробувань;
- *нерівності поверхні* та *корозійні впливи* для методів, які засновані на принципі визначення показника твердості поверхні (методи пластичної деформації, пружного відскоку та ударного імпульсу);
- *напружено-деформований стан*, який переважно характеризується рівнем стискаючих напружень;
- *наявність армування*;
- *особливості технології виготовлення конструкцій*

Всі непрямі методи згідно з вимогами нормативних документів потребують калібрування завдяки встановленню градуювальної залежності для бетону визначеного складу та чітко визначених умов з метою виключення похибок, які пов'язані із змінами впливових факторів. *Під час обстеження існуючих конструкцій застосування попередньо встановлених достовірних градуювальних залежностей неможливе*. Через це задача визначення міцності бетону існуючих конструкції потребує застосування спеціальних процедур та підходів, які частково передбачені національними стандартами ДСТУ Б В.2.7-220:2009 «Бетони. Визначення міцності механічними методами неруйнівного контролю» [3], ДСТУ Б В.2.7-226:2009 «Бетони. Ультразвуковий метод визначення міцності» [6]. Ці стандарти розроблені в Україні на основі радянських стандартів та враховують відповідні наукові досягнення та практичний досвід. Застосування цих стандартів на практиці під час визначення міцності бетону існуючих конструкцій має такі особливості:

- стандарти головним чином орієнтовані на сферу контролю якості бетону;
- передбачено застосування виключно руйнівного методу або комплексне застосування методів за такими можливим схемами:

1) «Руйнівний метод (на зразках-кернах) + неруйнівний (один або декілька методів)»;

2) «Умовно неруйнівний (відриву зі сколюванням або сколювання ребра) + неруйнівний»;

- обов'язкове застосування більш точного методу необхідне для уточнення градуювальної залежності неруйнівного методу;
- стандарти не містять рекомендації, що враховують залежності між точністю досліджень та кількістю відібраних зразків або проведених випробувань;
- відсутні рекомендації щодо вибору місць досліджень та методів контролю параметрів під час випробувань;
- відсутні рекомендації щодо визначення характеристичної міцності бетону на стиск та оцінки її відповідності встановленим вимогам за результатами випробувань;
- відсутні рекомендації щодо застосування комбінованих методів (комбінації декілька непрямих неруйнівних методів);

- стандартом не передбачені поширені методи, які використовуються у світі (метод витягування (CAPo-test), метод випробувань опору проникненню (*Windsor Probe*).

В Україні в галузі визначення міцності бетону існуючих конструкцій в рамках гармонізації нормативної бази з Європейським Союзом був впроваджений відповідний європейський стандарт у якості національного стандарту ДСТУ Б EN 13791:2013 «Оцінка міцності бетону на стиск в конструкціях і збірних бетонних елементах» [10]. Даний стандарт у порівнянні із сучасними рекомендаціями та розглянутими українськими стандартами характеризується такими особливостями:

- стандарт головним чином орієнтований на процедуру оцінки міцності і не містить детальних рекомендації щодо процедури визначення міцності бетону в конструкціях;
- передбачено застосування виключно руйнівного методу в комбінації з неруйнівними методами;
- стандартом не передбачено застосування методів відриву зі сколюванням, сколювання ребра та відриву диску;
- обов'язкове застосування руйнівного методу необхідне для уточнення градуювальної залежності неруйнівного методу;
- стандарт не містять рекомендації, що враховують залежності між точністю досліджень та кількістю відібраних зразків або проведених випробувань;
- відсутні рекомендації щодо вибору місць досліджень та методів контролю параметрів під час випробувань;
- в противагу українським стандартам наявні рекомендації щодо визначення характеристичної міцності бетону на стиск та оцінки її відповідності встановленим вимогам за результатами випробувань;
- відсутні рекомендації щодо застосування комбінованих методів (комбінації декілька непрямих неруйнівних методів).

Крім того в розглянутих нормативних документах відсутні можливості застосування неруйнівних методів в залежності від необхідної достовірності отриманих результатів. Наприклад, в окремих практичних випадках, коли є суттєвий запас міцності або є її суттєва нестача, можливо слід передбачити спрощені нормативні процедури щодо оцінювання міцності бетону.

Висновок. Визначені особливості застосування методів неруйнівного контроля міцності бетону існуючих будівельних конструкцій згідно з нормативними документами. Ці особливості обумовлюють значні труднощі для правильного застосування неруйнівних методів на практиці через недостатнє нормативне забезпечення. На практиці ці труднощі можуть призводити до помилкових оцінок міцності бетону, що може призвести до перевитрат ресурсів або погіршення стану конструкцій.

Загалом чинні нормативні документи не містять детальних рекомендацій з виконання процедур визначення міцності бетону існуючих конструкцій з врахуванням наявних результатів передових досліджень та найкращих практик і потребують суттєвого удосконалення.

Список використаних джерел:

1. ДСТУ Б В.2.7-223:2009. Бетони. Методи визначення міцності за зразками, відібраними з конструкцій. Київ: Мінрегіонбуд України, 2010.

2. ДСТУ EN 12504-1:2022 Випробування бетону в конструкціях. Частина 1. Зразки з кернами. Взяття, перевірка та випробування на стискання (EN 12504-1:2019, IDT). Київ: ДП «УкпНДНЦ», 2023.

3. ДСТУ Б В.2.7-220:2009 Будівельні матеріали. Бетони. Визначення міцності механічними методами неруйнівного контролю Київ: Мінрегіонбуд України, 2010.

4. ДСТУ EN 12504-3:2022 Випробування бетону в конструкціях. Частина 3. Визначення сили витягування (EN 12504-3:2005, IDT). Київ: ДП «УкпНДНЦ», 2023.

5. ДСТУ EN 12504-2:2022 Випробування бетону в конструкціях. Частина 2. Неруйнівний контроль. Визначення числа відскоку (EN 12504-2:2021, IDT). Київ: ДП «УкпНДНЦ», 2023.

6. ДСТУ Б В.2.7-226:2009 Будівельні матеріали. Бетони. Ультразвуковий метод визначення міцності. Київ: Мінрегіонбуд України, 2010. 22 с.

7. ДСТУ EN 12504-4:2022 Випробування бетону в конструкціях. Частина 4. Визначення швидкості ультразвукового імпульсу (EN 12504-4:2021, IDT). Київ: ДП «УкпНДНЦ», 2023.

8. Breysse D., Balayssac J.P., Biondi S., Corbett D., Gonçalves A., Grantham M., Luprano V., Masi A., Valente Monteiro A., Sbartai Z.M. Recommendation of RILEM TC 249-ISC on Non Destructive In-situ Strength Assessment of Concrete, to be published in Constr Build Mat, 2019.

9. ACI 228.1R-19. Report on Methods for Estimating In-Place Concrete Strength. American Concrete Institute. 2019.

10. ДСТУ Б EN 13791:2013. Оцінка міцності бетону на стиск в конструкціях і збірних бетонних елементах (EN 13791:2007, IDT). Київ: ДП «УкпНДНЦ», 2013.

УДК 622.2

Балик С.І., аспірант кафедри відкритих гірничих робіт
Науковий керівник: Жуков С.О., д.т.н., проф.
Криворізький національний університет

ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ТЕПЛОВОЇ ВЗАЄМОДІЇ ПРИ ТЕРМІЧНОМУ РОЗШИРЕННІ ВИБУХОВИХ СВЕРДЛОВИН

Зростанням показників міцності гірських порід в глибоких залізорудних кар'єрах і, як наслідок, зниження продуктивності бурових верстатів, заснованих на механічному руйнуванні порід, вимагає застосування більш енергоефективних технологій буріння, зокрема таких, як вогневе.

Механізм руйнування гірських порід при вогневому бурінні базується на явищі термічного лущення. Під дією високоінтенсивного джерела тепла в поверхневому шарі породи, через різницю температур оточуючого масиву і безпосередньої ділянки контакту з газовим струменем, виникають локальні стискаючі напруження паралельно фронту нагріву, а за зоною стиснення – розтягуючі напруження, спрямовані перпендикулярно до поверхні нагріву. Коли значення напруження перевищує міцність породи, відбувається відкол лускоподібної частки від масиву. При цьому критичне значення для ефективності термічного буріння має вміст кварцу в мінеральному складі породи [1], оскільки останній має суттєво вищий, порівняно з іншими породами, коефіцієнт термічного розширення.

Таким чином наявність в масиві прошарків порід з незначною різницею коефіцієнтів термічного розширення її мінералів, високою теплопровідністю, а також високим показником тріщинуватості суттєво знижує ефективність термічного буріння. Натомість відома комбінована технологія, коли буріння свердловин виконується за збільшеною сіткою механічним способом, після чого частина свердловини, відведена під розміщення заряду, розширюється з використанням термобуру. При цьому суттєвою перевагою термічного розширення бурових свердловин порівняно з термічним бурінням є можливість ефективно застосовувати дану технологію навіть за наявності вищезазначених ускладнень.

В досліджені [2] наведено математичну модель процесу теплообміну з породою при застосуванні плазмового пальника, та, враховуючи зміну умов та засобів буріння, дану модель було модифіковано:

$$c\rho\frac{\partial T}{\partial \tau}=\frac{1}{r}\cdot\frac{\partial}{\partial r}\left(r\lambda(T)\frac{\partial T}{\partial r}\right)\ \tau>0\ \ R\le r<\infty \tag{1}$$

$$T(r,0)=T_{env}=const \tag{2}$$

$$-\lambda\frac{\partial T}{\partial r}\Big|_{r=R}=\alpha_{conv}\left(T_g-T_s\right)+\sigma_0\varepsilon_{red}\left[\left(\frac{T_f}{100}\right)^4-\left(\frac{T_s}{100}\right)^4\right] \tag{3}$$

де c – питома теплоємність породи, Дж/(кг·К); ρ – щільність породи, кг/м^3; τ – час термічного впливу, с; r – радіальна координата, м; $\lambda(T)$ – коефіцієнт теплопровідності породи як функція температури, Вт/(м·К); R – поточний радіус свердловини (стінки), м; α_{conv} – коефіцієнт конвективної тепловіддачі, Вт/(м^2·К); T_{env} – початкова температура породи, К; T_g, T_f, T_s – відповідно, температура газоподібних продуктів згорання горючої суміші, факела та стінок свердловини, К; σ_0 – випромінювальна здатність абсолютно чорного тіла, Вт/(м^2·К^4); ε_{red} – приведений ступінь чорноти системи «факел-порода».

Для переходу від плазмового до надзвукового пальника було виконано зміну структури граничних умов моделі. Замість інтегральних емпіричних показників – уведено диференційований розрахунок теплообміну. Така модифікація зумовлена переходом від радіаційно-іонізаційного переносу енергії, характерного для плазми, до інтенсивної вимушеної конвекції, спричиненої високою кінетичною енергією надзвукового струменя. Зокрема, використано коефіцієнт конвективної тепловіддачі (α_{conv}), що враховує параметри газодинаміки надзвукового потоку та теплофізичні властивості продуктів згоряння, а також радіаційну складову на основі закону Стефана-Больцмана. Застосування приведеного ступеня чорноти ε_{red} замість константи C дозволяє врахувати реальні випромінювальні властивості продуктів згоряння та породи. Окрім того, враховуючи невелику глибину свердловин (15-18 м), значення початкової температури породи вздовж свердловини прийнято постійною.

Подальшим напрямком досліджень є встановлення кореляційних залежностей між текстурно-структурними особливостями залізистих кварцитів та граничними параметрами теплового впливу, що визначають умови ініціації термомеханічного руйнування масиву.

Список використаних джерел:

1. Lyu, Z., Song, X., Li, G., Wang, G., Shi, Y., Liu, Y., & Zheng, R. (2018). Experimental analysis on characteristics of micro-structure and mineralogy changes in thermal spallation drilling. Journal of Petroleum Science and Engineering, 167, p. 100-109.
2. Bulat, A., Osinnii, V., Dreus, A., & Osinnia, N. (2021). Mathematical modelling of thermal stresses with in the borehole walls in terms of plasma action. Mining of Mineral Deposits, p. 63-69.

УДК 622:528.7

Возігнуй Д.А., студент 2-го курсу, група ГЗ-2
Куницька М.С., PhD, доц. кафедри маркшейдерії
Державний університет «Житомирська політехніка»

ЗАСТОСУВАННЯ БПЛА ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ОБ'ЄМІВ НАСИПНИХ ОБ'ЄКТІВ У ГЕОДЕЗИЧНИХ ДОСЛІДЖЕННЯХ

Визначення об'ємів насипних об'єктів є важливим завданням геодезичних робіт у гірничій галузі, оскільки від точності таких розрахунків залежить облік запасів корисних копалин, контроль виконання гірничих робіт та ефективність виробничих процесів. Традиційно для вирішення цих задач застосовуються наземні геодезичні методи, зокрема тахеометрична зйомка, яка забезпечує достатньо високу точність вимірювань. Однак такі методи характеризуються значною трудомісткістю, потребують тривалого часу виконання польових робіт та залежать від впливу людського фактора. У сучасних умовах розвитку цифрових технологій та автоматизації виробництва особливої актуальності набуває використання безпілотних літальних апаратів (БПЛА) для виконання аерофотозйомки. Використання БПЛА дозволяє оперативно отримувати просторові дані, формувати цифрові моделі місцевості та визначати об'єми насипних об'єктів із достатньою точністю [1].

Метою даної роботи є оцінка ефективності використання безпілотних літальних апаратів для визначення об'ємів насипних об'єктів та порівняння цього методу з традиційними геодезичними методами. Для визначення об'ємів насипних об'єктів у роботі застосовано метод аерофотозйомки з використанням безпілотного літального апарата. Загальна схема виконання дослідження наведена на рис. 1.

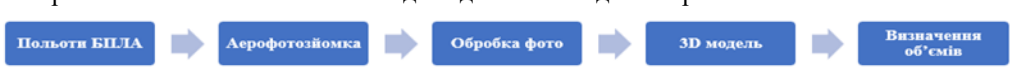


Рис. 1. Схема визначення об'ємів насипних об'єктів із використанням БПЛА

На першому етапі виконуються польоти БПЛА над досліджуваною територією з метою отримання аерофотознімків. Далі здійснюється обробка отриманих даних із використанням спеціалізованого програмного забезпечення, що дозволяє сформувати цифрову тривимірну модель об'єкта. На основі побудованої 3D моделі виконується визначення об'ємів насипних об'єктів, що забезпечує високу деталізацію результатів та достатній рівень точності [2]. Для оцінки ефективності застосування БПЛА проведено порівняльний аналіз із традиційним методом тахеометричною зйомкою. Результати порівняння представлені на рис. 2.

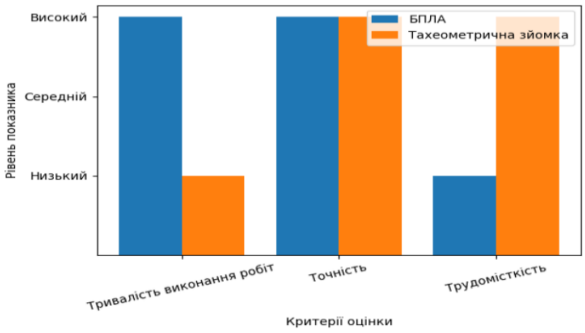


Рис. 2. Порівняння ефективності методів визначення об'ємів за основними критеріями

Застосування БПЛА дозволяє суттєво скоротити час виконання польових робіт, зменшити трудомісткість процесу та мінімізувати вплив людського фактора, при цьому забезпечуючи достатній рівень точності вимірювань. Крім того, використання аерофотозйомки забезпечує можливість оперативного отримання просторових даних, формування цифрових моделей місцевості та виконання обчислень об'ємів у автоматизованому режимі. Отримані результати підтверджують доцільність впровадження БПЛА у практику геодезичних робіт, зокрема при моніторингу насипних об'єктів та контролі гірничих процесів.

Список використаних джерел:

1. Янович О.А., Левицький В.Г. Сучасні підходи до виконання маркшейдерських підрахунків квартальної зйомки вийнятої блочної сировини та розкривних порід із застосуванням БПЛА. Технічна інженерія. 2025. № 1(95). С. 212–218.

2. Kozar, V. I., Kozar, L. M. Peculiarities of the use of electronic tacheometers when conducting topographical and geodetic works for land management and cadastre. Geodesy, cartography, land management, cadastre: mater. All-Ukrainian science and practice inter. conf. (Uman, April 27, 2020). pp. 8– 9.

УДК 622.244.4

Войта М.О., аспірант, 185А-23-5, АСП
Науковий керівник: Пащенко О.А., к.т.н., доц.
Національний технічний університет «Дніпровська політехніка»

ОБҐРУНТУВАННЯ РАЦІОНАЛЬНИХ ПАРАМЕТРІВ ФІЛЬТРУВАЛЬНИХ СИСТЕМ ДЛЯ БУРОВИХ ПРОМИВАЛЬНИХ РІДИН

Бурові промивальні рідини (БПР) є одним із найважливіших елементів технології спорудження нафтових, газових та геологорозвідувальних свердловин. Вони виконують комплекс технологічних функцій: охолоджують і змащують породоруйнуючий інструмент (долото або бурову головку), ефективно транспортують вибурену породу (шлам) на денну поверхню, підтримують стійкість стінок свердловини, створюють необхідний гідростатичний тиск на пласт для запобігання флюїдопроявам, а також забезпечують якісне первинне розкриття продуктивних горизонтів з мінімальним ушкодженням їх колекторських властивостей. Серед усіх фізико-хімічних і технологічних властивостей БПР особливе місце посідають саме фільтраційні характеристики, які визначають здатність рідини утворювати на стінках свердловини тонку, щільну, малопроникну та еластичну фільтраційну кірку (глинисту кірку або полімерну плівку). Якісна фільтраційна кірка діє як тимчасовий бар'єр, що мінімізує втрати фільтрату в пласт, запобігає диференціальному прихопленню бурильного інструменту, зменшує кольматацію привибійної зони продуктивних горизонтів, сприяє збереженню природної проникності колектора та підвищує загальну стійкість стовбура свердловини [1, 2].

Надмірна фільтрація призводить до утворення товстої, рихлої та пухкої кірки, що звужує прохідний переріз свердловини, ускладнює спуско-підйомні операції, цементування обсадних колон, підвищує ризик прихоплень і збільшує непродуктивний час буріння. Недостатній контроль фільтраційних властивостей може спричинити значні поглинання промивальної рідини, гідророзриви слабких інтервалів, набухання та обвалення глинистих порід (аргіліти, сланці), а також суттєве зниження коефіцієнта відновлення проникності продуктивного пласта (часто до значень нижче 0,6–0,7) [3]. У зв'язку з цим обґрунтування раціональних параметрів фільтрувальних систем – показника фільтрації (водовіддачі), товщини та проникності кірки, а також взаємозв'язаних реологічних властивостей – є актуальною науково-практичною задачею сучасної технології буріння, особливо в умовах складних геолого-технічних ситуацій українських родовищ.

Процес фільтрації бурових промивальних рідин підпорядковується закону Дарсі для течії рідини через пористе середовище. Об'єм фільтрату (V), що збирається за певний час (t) під дією перепаду тиску (ΔP), описується рівнянням:

$$V = \sqrt{\frac{2K \cdot A^2 \cdot \Delta P \cdot t}{\mu}}, \quad (1)$$

де K – проникність фільтраційної кірки, A – площа фільтраційної поверхні, μ – динамічна в'язкість фільтрату.

Проникність кірки є основним параметром, що визначає як статичну, так і динамічну фільтрацію. У статичних умовах товщина кірки постійно зростає, а швидкість фільтрації зменшується в міру ущільнення кірки. У динамічних умовах (під час циркуляції) потовщення кірки обмежується змиваючою дією потоку рідини, і після досягнення рівноваги товщина кірки стабілізується.

Основними контрольованими параметрами фільтраційних властивостей є:

- показник фільтрації за стандартом API (низькотемпературний, низькотисковий тест при перепаді тиску 0,7 МПа та кімнатній температурі) – оптимальні значення для більшості систем становлять 5–15 см³/30 хв залежно від геологічних умов і інтервалу буріння;
- показник фільтрації за HTHP (високотемпературний, високотисковий тест) – більш репрезентативний для реальних вибійних умов (температура до 150 °C і тиск понад 3,5 МПа);
- товщина фільтраційної кірки – бажано не більше 2 мм (1–3/32 дюйма), причому кірка повинна бути щільною, еластичною та легко видалятися;
- проникність кірки – повинна бути наднизькою (в діапазоні нанодарсі), щоб ефективно перекривати пори та мікротріщини породи.

На ці параметри суттєво впливають склад твердої фази (вміст і гранулометричний склад колоїдних частинок бентоніту, баритів та інших обважнювачів), тип і концентрація реагентів-понижувачів фільтрації (поліаніонна целюлоза PAC, карбоксиметилцелюлоза КМЦ, модифіковані крохмалі, акрилові полімери), реологічні показники (пластична в'язкість, динамічна та статична напруга зсуву), а також термобаричні умови в свердловині [4].

Лабораторні та промислові дослідження свідчать, що раціональне поєднання добавок, зокрема низьков'язкої (PAC-LV) та регулюючої (PAC-R) поліаніонної целюлози в концентраціях 0,5–0,8 % (оптимально близько 0,7 %), забезпечує виражений синергетичний ефект. Такі композиції дозволяють

суттєво знизити водовіддачу, сформувати тонку еластичну плівку та покращити якість кірки порівняно з використанням окремих реагентів. Широкий гранулометричний спектр твердої фази з достатньою кількістю частинок розміром менше 2 мкм ефективно мостить пори породи, зменшуючи проникність кірки. Властивості обважнювачів (форма, розмір і густина частинок) також значно впливають на пористість і механічну міцність кірки, іноді більше, ніж проникність самої формації [5].

В умовах буріння в Україні часто зустрічаються нестійкі глинисті сланці, аргіліти та змінні колекторські властивості продуктивних пластів. Полімер-інгібовані системи (з додаванням KCl, гуматів або акрилових реагентів) дозволяють підтримувати низьку водовіддачу (менше 10–12 см³/30 хв) навіть за підвищених температур. Безглинисті полімерні системи з використанням акрилових реагентів і водорозчинних ефірів целюлози забезпечують низьку фільтрацію, високі мастильні властивості та низьку корозійну активність, хоча вимагають уважного підбору для уникнення додаткової кольматації пласта. Оптимізація параметрів вимагає комплексного підходу: балансу між технічними показниками, економічними витратами на реагенти та екологічними аспектами утилізації відпрацьованої рідини. Надмірне застосування хімічних добавок підвищує собівартість буріння та навантаження на довкілля, тому раціональні параметри передбачають використання мінімальних ефективних концентрацій, які забезпечують цільові значення фільтрації, добру виносну здатність шламу та стійкість стінок свердловини.

Експериментальна оптимізація часто виявляє оптимальні пороги концентрацій: для систем на основі РАС найкращий компроміс між контролем фільтрації та стабільністю реологічних властивостей досягається саме в діапазоні 0,5–0,8 %. Синергетичні суміші формують більш компактну, менш пористу та еластичну кірку, що позитивно впливає на загальну якість стовбура свердловини. Крім того, важливим є контроль коефіцієнта зсуву фільтраційної кірки (не більше 0,3), що знижує ймовірність прихоплень.

Обґрунтування раціональних фільтраційних параметрів дозволяє суттєво зменшити ризики диференціального прихоплення, поглинань рідини та пошкодження продуктивних пластів, покращити якість стінок свердловини, полегшити подальші спуско-підйомні та цементувальні операції, а також підвищити дебіт свердловин за рахунок збереження природної проникності привибійної зони. У сфері вищої освіти інтеграція практичних лабораторних робіт з визначення фільтраційних властивостей (за допомогою приладів ВМ-6, ВГ-1, фільтр-пресів API та НТНР) у навчальні курси з технології бурових розчинів сприяє формуванню аналітичних компетентностей майбутніх фахівців напряму «Гірничі технології». Аналіз реальних кейсів оптимізації параметрів розвиває навички прийняття інженерних рішень у складних геолого-технологічних умовах.

Для розвитку гірничої та нафтогазової галузі України перспективним є подальше дослідження та впровадження екологічно безпечних добавок (модифікованих природних крохмалів, рослинних полімерів та акрилових реагентів) для контролю фільтрації. Це дозволить відповідати сучасним екологічним нормам, зменшити негативний вплив на довкілля під час утилізації бурових відходів і підвищити ефективність освоєння мінеральних ресурсів.

Подальші наукові роботи доцільно спрямовувати на створення систем реального часу моніторингу фільтраційних властивостей безпосередньо в вибійних умовах, розробку цифрових моделей динаміки фільтрації за змінних термобаричних умов, а також експериментальне обґрунтування нових композицій реагентів, адаптованих до специфічних геологічних умов українських родовищ.

Список використаних джерел:

1. Основні властивості та параметри промивальних рідин. Вікіпедія. URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/Основні_властивості_та_параметри_промивальних_рідин (дата звернення: 27.03.2026).

2. Системи промивки свердловин: експертний аналіз, хімія розчинів та оптимізація. URL: https://dolota.ua/systemy-promyvky-sverdlovyn-ekspertnyj-analiz-himiya-rozchyniv-ta-optymizacziya/ (дата звернення: 27.03.2026).

3. Коцкулич Я. С. Аналіз ефективності промивальних рідин для первинного розкриття продуктивних пластів [Електронний ресурс] / Я. С. Коцкулич, Є. Я. Коцкулич.. Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу. 2012. № 1. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nvif_2012_1_5

4. Лекція 7–8. Бурові розчини та їх технологічні функції. URL: https://geology.lnu.edu.ua/wp-content/uploads/2022/03/Lektsiia_7-1.pdf (дата звернення: 27.03.2026).

5. Гордійчук, М., Бейзик, О., Ковбасюк, І., Васько, А., & Васько, І. (2025). Динаміка вторинної фільтрації бурових розчинів у статичних умовах від вмісту акрилових реагентів [Dynamics of changes in static secondary filtration of drilling muds depending on the content of acrylic reagents]. Oil and Gas Power Engineering, 2(44), 184–193. https://doi.org/10.31471/1993-9868-2025-2(44)-184-193

УДК 622.24.051

Ганжа Ю.В., аспірант, 185А-24-10, АСП
Науковий керівник: Пащенко О.А., к.т.н., доц.
Національний технічний університет «Дніпровська політехніка»

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ПАРАМЕТРІВ РУЙНУВАННЯ ГІРСЬКИХ ПОРІД НА ДИНАМІКУ ПРОЦЕСІВ ЗА ДОПОМОГОЮ ШВИДКІСНОЇ ЗЙОМКИ

Руйнування гірських порід є основним технологічним процесом при спорудженні нафтових, газових, геологорозвідувальних та інших свердловин, а також при проведенні гірничих виробок і видобуванні корисних копалин. Ефективність буріння, питомі енергетичні витрати, швидкість зносу породоруйнуючого інструменту, якість стовбура свердловини та ризик виникнення аварійних ситуацій безпосередньо залежать від механізмів і динаміки руйнування породи під дією механічного навантаження. Традиційні методи дослідження, такі як статичні випробування на міцність, аналіз шламу після буріння чи пост-аналіз кернів, не дозволяють повноцінно зафіксувати швидкоплинні процеси тріщиноутворення, поширення тріщин, фрагментації породи та взаємодії долота з вибоєм [1]. Саме тому застосування швидкісної відеозйомки (high-speed imaging) з частотою від 1000 до кількох десятків тисяч кадрів за секунду стає потужним сучасним інструментом для вивчення динаміки руйнування в реальному часі.

Швидкісна зйомка дозволяє «уповільнити» процеси, що відбуваються за мілісекунди, і отримати детальну візуальну інформацію про послідовні етапи руйнування: ініціацію мікротріщин, їх швидке поширення, коалесценцію (злиття) тріщин, утворення сколів, динаміку відриву фрагментів породи та винос шламу потоком промивальної рідини [2]. Завдяки цьому методу вдається встановити кількісні зв'язки між параметрами руйнування (швидкість поширення тріщин, розмір і форма фрагментів, енергія, що витрачається на руйнування) та технологічними факторами буріння.

Процес руйнування гірських порід при механічному бурінні має яскраво виражений динамічний характер. При контакті зубця шарошки або штифта PDC-долота з породою виникають локальні напруження стиску, зсуву та розтягу. Руйнування починається з утворення мікротріщин у зоні безпосереднього контакту, після чого розвивається складна система макротріщин, що призводить до сколювання та відриву шматків породи. Динаміка цього процесу залежить від комплексу факторів: фізико-механічних властивостей породи (міцність на одноосьовий стиск, модуль пружності Юнга, коефіцієнт Пуассона, ступінь тріщинуватості), режимів буріння (осьове навантаження на долото, частота його обертання, витрата та властивості промивальної рідини), геометрії та типу породоруйнуючого інструменту [3].

Одним із фундаментальних підходів до опису руйнування є енергетична теорія міцності. Руйнування породи відбувається, коли накопичена потенціальна енергія пружної деформації перевищує критичний рівень. За критерієм Гріффітса критичне напруження для поширення тріщини розраховується за формулою:

$$\sigma_{cr} = \sqrt{\frac{2E\gamma}{\pi l}}, \tag{1}$$

де σ_{cr} – критичне напруження, E – модуль пружності матеріалу, γ – питома поверхнева енергія, l – половина довжини тріщини.

Для плоского деформованого стану формула набуває вигляду:

$$\sigma_{cr} = \sqrt{\frac{2E\gamma}{\pi l(1-\nu^2)}}, \tag{2}$$

де ν – коефіцієнт Пуассона.

Важливим інтегральним показником ефективності руйнування є механічна питома енергія (Mechanical Specific Energy – *MSE*), яка характеризує кількість енергії, необхідну для руйнування одиниці об'єму породи:

$$MSE = \frac{WOB}{A} + \frac{120\pi \cdot RPM \cdot Torque}{A \cdot ROP}, \tag{3}$$

де *WOB* – осьове навантаження на долото (кН), *A* – площа вибою (м²), *RPM* – частота обертання долота (об/хв), Torque – крутний момент (кН·м), *ROP* – механічна швидкість буріння (м/год).

Швидкісна зйомка дає можливість кількісно оцінити такі динамічні характеристики, як швидкість поширення тріщин (від десятків до сотень метрів за секунду залежно від типу породи), час від моменту контакту до початку руйнування, розмір і форму фрагментів породи, динаміку руху частинок шламу під дією потоку промивальної рідини, а також ефекти пружного відновлення породи після зняття навантаження [4].

Дослідження з використанням високошвидкісних камер демонструють суттєві відмінності в механізмах руйнування різних типів порід. У крихких породах (пісковики, вапняки, доломіти) руйнування

відбувається переважно шляхом швидкого сколювання відносно великих фрагментів. У пластичних глинистих породах домінує пластична деформація з утворенням дрібнодисперсного шламу. Збільшення осьового навантаження прискорює ініціацію та поширення тріщин, проте надмірне навантаження може призводити до надмірного подрібнення породи, зростання енергоспоживання та зниження ефективності виносу шламу. Оптимальне поєднання навантаження та частоти обертання долота забезпечує максимальну механічну швидкість буріння при мінімальному значенні MSE [5].

В умовах українського буріння, де часто спостерігається чергування міцних і слабких порід, а також наявність тріщинуватих інтервалів, вивчення динаміки руйнування набуває особливої актуальності. Швидкісна зйомка дозволяє виявити моменти нестабільної взаємодії долота з вибоєм, такі як вібрації, «підскакування» долота, утворення каверн або «зубців» на стінках свердловини. Аналіз отриманих відеоданих дає змогу науково обґрунтувати раціональні режими буріння для конкретних геологічних умов і суттєво підвищити стійкість стовбура свердловини.

Типова експериментальна установка для таких досліджень включає стенд з породоруйнуючим інструментом, прозору модель свердловини або камеру, потужне джерело освітлення та високошвидкісну камеру. Обробка відеоматеріалів здійснюється за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення, яке дозволяє автоматично відстежувати траєкторії частинок, вимірювати швидкості та кути поширення тріщин. Найбільш інформативні результати отримують при комбінації швидкісної зйомки з одночасним вимірюванням крутного моменту, вібрацій, тиску промивальної рідини та інших технологічних параметрів.

Обґрунтування впливу параметрів руйнування гірських порід на динаміку процесів за допомогою швидкісної зйомки відкриває можливості для оптимізації режимів буріння, зменшення зносу долот, зниження ймовірності аварій (прихоплень, обвалень стінок), підвищення механічної швидкості проходки та загальної економічної ефективності спорудження свердловин. У сфері вищої освіти використання відеоматеріалів швидкісної зйомки значно підвищує наочність викладання дисциплін «Технологія буріння свердловин», «Руйнування гірських порід», «Гірнича механіка» та «Геомеханіка», сприяє розвитку аналітичних навичок студентів і готує майбутніх фахівців до роботи з сучасними методами моніторингу та управління технологічними процесами.

Для гірничої та нафтогазової промисловості України перспективним напрямом є подальше впровадження цифрових технологій обробки відеоданих, зокрема використання штучного інтелекту для автоматичного розпізнавання тріщин і фрагментів породи, створення баз даних динаміки руйнування різних типів порід та адаптація результатів досліджень до конкретних геологічних умов родовищ. Це сприятиме підвищенню безпеки робіт, зниженню енергетичних витрат і розвитку інноваційних технологій буріння.

Подальші наукові роботи доцільно спрямовувати на поєднання швидкісної зйомки з чисельним моделюванням методом скінченних елементів, дослідження впливу ультразвукових, гідродинамічних та кавітаційних ефектів на динаміку руйнування, а також створення портативних систем моніторингу в реальних умовах свердловини.

Список використаних джерел:

1. Барановський, Е. М. Про руйнування гірських порід при бурінні глибоких свердловин / Е. М. Барановський, В. М. Мойсишин // Нафтогазова енергетика. - 2007. - № 3. - С.21-24.
2. Практичне використання кавітаційних процесів у бурінні свердловин : монографія / Я. М. Фем'як, І. І. Чудик, А. К. Судаков [та ін.]. - Вінниця : Посвіт, 2021. - 232 с. : табл. - 212-229. - ISBN 978-617-8003-12-8.
3. Орловський В. М. Буріння нафтових і газових свердловин : підручник / В. М. Орловський, В. С. Білецький, В. І. Сіренко. – Львів : Новий Світ-2000, 2024. – 408 с. – (Серія "Бібліотека Гірничої енциклопедії").
4. Пащенко О.А., Ігнатов А.О., Владико О.Б. Деякі особливості руйнування гірського масиву на вибої свердловини // Інструментальне матеріалознавство. 2021. № 1 (24). С. 121–134.
5. Барановський Є. М. Про руйнування гірських порід при бурінні глибоких свердловин / Є. М. Барановський, В. М. Мойсишин // Фізико-технічні проблеми видобування енергоносіїв. – 2007. – Вип. 21. – С. 21–23.

УДК 624.19:624.131.1:556.3

Гаращук А. С., Тутік А. Р.
студентки 2 курсу, групи ГС-41
Науковий керівник: Ган О. В., к.т.н.
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ОСОБЛИВОСТІ БУДІВНИЦТВА ПІДЗЕМНИХ СПОРУД В УМОВАХ ЩІЛЬНОЇ МІСЬКОЇ ЗАБУДОВИ З УРАХУВАННЯМ ГІДРОГЕОЛОГІЧНИХ ЗМІН

Будівництво підземних споруд у межах щільної міської забудови є одним із найбільш складних напрямів сучасного інженерного будівництва. Зростання навантаження на міську інфраструктуру, необхідність розвитку транспортних систем, інженерних комунікацій та підземного простору обумовлюють активне спорудження тунелів, станцій метрополітену, підземних переходів, паркінгів та колекторів у складних інженерно-геологічних і гідрогеологічних умовах. Особливу увагу при цьому приділяють впливу будівництва на існуючу забудову, оскільки будь-яка зміна напружено-деформованого стану ґрунтового масиву або режиму ґрунтових вод може спричинити деформації будівель і споруд.

Одним із основних факторів, що ускладнюють спорудження підземних об’єктів у міських умовах, є високий рівень ґрунтових вод та зміна напрямків фільтраційних потоків під час виконання робіт. При влаштуванні котлованів глибокого закладання, тунелів або підземних камер часто виникає необхідність тимчасового або постійного водозниження, влаштування протифільтраційних екранів, дренажних систем та огороджувальних конструкцій типу «стіна в ґрунті», пальових або шпунтових огороджень. Такі конструкції змінюють природний режим руху підземних вод, що може призводити до локального підтоплення територій або навпаки – осушення окремих ділянок ґрунтового масиву.

До основних технологій будівництва підземних споруд у складних міських умовах відносяться:

1. Відкритий спосіб будівництва із влаштуванням котлованів:
- спорудження котлованів із використанням огороджувальних конструкцій;
- влаштування розпірних систем та анкерного кріплення;
- застосування технології «стіна в ґрунті»;
- влаштування систем водозниження та дренажу.

2. Закриті способи проходки:
- щитова проходка тунелів;
- використання тунелепрохідницьких механізованих комплексів;
- буропідривний метод;
- метод продавлювання та мікротунелювання.

3. Заходи інженерного захисту територій:
- закріплення ґрунтів методом цементації або jet-grouting;
- улаштування протифільтраційних діафрагм;
- моніторинг деформацій будівель і рівня ґрунтових вод;
- геотехнічний супровід будівництва.

У сучасній практиці для оцінки впливу підземного будівництва на навколишнє середовище активно використовуються методи числового моделювання. Програмні комплекси типу PLAXIS, MIDAS GTS NX, GeoStudio, Geo5 та Slide дозволяють моделювати зміну гідрогеологічних умов, визначати параметри фільтраційних потоків, прогнозувати осідання поверхні та оцінювати стійкість огороджувальних конструкцій. Особливо важливим є врахування взаємодії системи «основа – фундамент – споруда» в умовах зміни рівня ґрунтових вод та техногенного навантаження.

Складність будівництва підземних споруд у щільній забудові також полягає у необхідності забезпечення безперервної експлуатації існуючих будівель, транспортної інфраструктури та інженерних мереж. Будівельні роботи часто виконуються в умовах обмеженого простору, підвищених вимог до безпеки та необхідності мінімізації впливу на навколишню забудову. Саме тому сучасні підходи до проєктування передбачають комплексне врахування інженерно-геологічних, гідрогеологічних та техногенних факторів із постійним моніторингом стану ґрунтового масиву та конструкцій.

Висновок. Будівництво підземних споруд у межах щільної міської забудови потребує комплексного підходу до оцінки інженерно-геологічних та гідрогеологічних умов території. Використання сучасних технологій огородження котлованів, методів закріплення ґрунтів та числового моделювання дозволяє знизити ризики деформацій існуючої забудови та забезпечити безпечне виконання будівельних робіт. Важливим елементом таких проєктів є організація системи моніторингу рівня ґрунтових вод і технічного стану навколишніх споруд на всіх етапах будівництва та експлуатації підземних об’єктів.

УДК 622.271

Генкуленко С.М., директор ТОВ «Українська гірничодобувна компанія»
Науковий керівник: Жуков С.О., д.т.н., проф.
Криворізький національний університет

ТЕХНОБРЕКЧІЇ ОБРУШЕННЯ ЯК ТИП ТЕХНОГЕННИХ РОДОВИЩ КРИВБАСУ

Наразі проблема нестачі мінеральної сировини вельми актуалізує пошук додаткових або альтернативних її джерел, і одним з найбільш перспективних та реальних напрямів вирішенні цієї задачі є залучення до продуктивної розробки техногенних родовищ, до яких у гірництві насамперед відносять відвали гірничодобувних підприємств і хвостосховища збагачувальних фабрик на поверхні Землі, які за кількістю та якістю мінеральної сировини, що міститься в них, здебільшого є цілком придатними для промислового використання в даний час або в майбутньому по мірі розвитку науки і техніки та зміни економічних умов [1].

Техногенні родовища класифікують за різними ознаками. В даний час термінологія, класифікація відходів і техногенної сировини, критерії приналежності їх до того або іншого типу змінюються і доповнюються у міру поглиблення досліджень і практичних робіт в області розробки родовищ конкретного типу.

На території Кривбасу, за даними [2] зосереджені техногенні родовища декількох основних типів: 1) безпечні намивні і насипні родовища порід різного складу, які можливо використовувати, як для будівельних цілей, так і для вилучення металів (відвали і хвостосховища гірничо-збагачувальних комбінатів і шахт); 2) безпечні намивні та насипні металургійні родовища для комплексного використання (шлаковідвали і шламосховища металургійного комбінату).

До окремого типу техногенних родовищ Протоколом ДКЗ України №4472 від 15.09.2018 р. було віднесено приосьову ділянку кар'єру «Південний» в умовному просторі розповсюдження 5-го залізистого горизонту (5f) (ділянку №2). В Протоколі зазначено, що «Ділянка №2 кар'єру «Південний» у сучасному її вигляді сформувалась за рахунок техногенних факторів, обумовлених підземним способом відпрацювання багатих залізних руд, що призвело до обрушення вищезалягаючих порід і змішування їх із залізними мартитовими рудами і залізистими кварцитами, до процесів просідання і зсуву вміщуючих порід». «Утворені унаслідок обвалення у вироблений простір руд і вміщуючих порід під час розробки їх підземним способом в межах ділянки № 2 кар'єру «Південний», залізні руди 5-го залізистого горизонту можна розглядати як окремий тип техногенних родовищ».

В Протоколі також наведено основні критерії віднесення ділянки №2 до родовищ техногенного типу. Серед таких критеріїв відмічено, що ділянка №2 являє собою техногенно порушену зону внаслідок інтенсивного просідання поверхні у зв'язку з колишньою підземною розробкою з повним обваленням вміщуючих порід у відроблений простір.

Слід зазначити, що в сучасних класифікаціях техногенних родовищ України, включаючи Кривбас [2-5], цей тип до того не був зафіксований, хоча і був давно відомий та частково висвітлений у літературі [6-7].Тому він потребував додаткового вивчення й аргументації, що визначило мету і об'єкт досліджень в роботі [1], де було детально описано цей генетичний тип техногенних утворень – технобрекчій обрушення.

На відміну від широко відомих технобрекчій насипного типу (відвалів) перші до того часу не були достатньо вивчені, але проведені геолого-картувальні, структурні, літолого-петрографічні роботи в межах кар'єру «Північний» колишнього рудника ім. Дзержинського дозволили детально охарактеризувати цей «новий» морфологічний й генетичний тип техногенних родовищ у Кривбасі – технобрекчій обрушення, а також поставити питання про актуальність внесення його до сучасних класифікацій техногенних родовищ Кривбасу в якості окремого типу. На даний час термін «технобрекчії обрушення» не є загальноприйнятим, знаходиться у стадії обговорення. В якості синоніму можна використовувати також «технобрекчії провалення (провальні)», однак між технобрекчіями обрушення і провалення є невелика різниця у змістовному відтінку: перші охоплюють простір над підземною виробкою і можуть не виходити на денну поверхню, другі поширюються до денної поверхні.

Більш загальний термін «технобрекчії» – скорочений від «техногенні брекчії» – охоплює велике різноманіття новоутворених внаслідок техногенних чинників породних агрегацій за способом утворення, морфологічним виглядом та складом. У самому першому наближенні серед технобрекчій можна виділити їх типи за способом утворення: насипні (відвальні), осипні, здвижені (зсувні), обрушені (провальні), забутовувальні (утворені внаслідок забутовування підземних гірничих виробок).

Головною ознакою належності їх до техногенного типу є повне руйнування стратиграфічної упорядкованості породних мас з порушенням первинних умов залягання та структурної будови вихідних порід внаслідок техногенних чинників з перемішуванням й переміщенням їх в новий простір, не притаманний їхньому природному заляганню, та формуванням нового техногенного геологічного тіла.

Якщо насипні та забутовувальні технобрекчії за способом переміщення й умовами формування є повністю техногенними, то для осипних, здвижених і обрушених спосіб переміщення є природним під дією гравітації, але саме виникнення цих утворень є неможливим без масштабних техногенних змін у геологічному середовищі.

За ступенем процесу обрушення внаслідок підземного видобутку, за дослідженнями [1] у кар'єрі «Південний», розташованому на північ від кар'єру «Північний», було виділено декілька зон, які в загальному плані корелюють з виділеними С.В. Шашуріним зонами зрушення гірських порід над підземними виробками в межах мульди зрушення:

I. Зона слабо порушених процесами обрушення від підземного видобутку корінних порід, які в цілому зберігають первинну стратифікацію; зона розвитку зсувів ковзання

II. Зона інтенсивно тріщинуватих і подроблених ціликів, які в цілому зберігають належність до певних стратиграфічних горизонтів (відповідає зоні тріщин, розломів)

III. Зона чередування ділянок інтенсивно подроблених ціликів, які в цілому зберігають належність до певних стратиграфічних горизонтів з ділянками технобрекчій обрушення без стратифікації (відповідає зоні тріщин, розломів, поєднаної з зоною провалів).

IV. Зона повного домінування суцільних технобрекчій обрушення з повним порушенням первинного залягання порід і без будь-яких ознак належності до певних стратиграфічних горизонтів (відповідає зоні воронок, провалів). Таку ж саму градацію зон за ступенем процесу обрушення можна виділити і в кар'єрі Північний».

Передумовами виникнення зон технобрекчій обрушення в умовах родовищ окислених залізистих кварцитів саксаганського типу є два чинники. В першу чергу – це розташування й об'єми виробленого підземного простору. Другим важливим чинником є процеси глибинного окислення, які перетворили вихідні рудовмісні маси на породи зниженої міцності, підвищеної пористості та вологоємності. Внаслідок процесів глибинного окислення фактично вся товща між 4s горизонтом і Саксаганським насувом (включно) перетворилась на ослаблену зону, схильну до провального процесу.

Внаслідок перемішування у складі технобрекчій обрушення всіх порід, які залягають вище над зонами підземного видобутку (різних залізистих та сланцевих горизонтів, залізних руд, метаультрабазитів талькового горизонту, глинистих порід кайнозою й ін.), відбулося розпорошення залишків багатих руд, розубожування (збіднення) первинних концентрацій заліза в результаті перемішування з малозалізистими породами, розущільнення вихідних порід зі зменьшенням їх об'ємної маси і міцності та збільшенням пористості, а також вологоємності.

ДУ «Інститут геохімії навколишнього середовища НАН України» досліджено [1], що технобрекчії обрушення/провальні – широко поширені в межах кар'єру «Північний». Вони включають величезні об'єми гірських масивів та разом з рештками ціликів залізистих кварцитів і рештками багатої руди, залишеної після підземного видобутку, є об'єктом сучасного промислового видобування як залізорудної сировини низької якості.

Таким чином, технобрекчії обрушення по суті – це нові техногенні гірські породи. Генетично і морфологічно вони повністю відповідають сутності техногенних утворень і до них цілком правомірно застосовувати у разі їх економічно доцільного видобутку понятійну і правову базу техногенних родовищ, так само як це є загально визнаним для насипних відвалів, або шламосховищ.

Список використаних джерел:

1. Звіт з НДР: «Геологічне дослідження Саксаганського родовища залізних руд в межах кар'єру «Північний» та його західного флангу (м. Кривій Ріг) з вивченням техногенної порушеності первинного геологічного середовища внаслідок тривалої експлуатації родовища відкритим і підземним способами видобутку» (у рамках договору № 03/2023 р. від 12.06.2023 р.). – К.: ДУ «Інститут геохімії навколишнього середовища НАН України». 2023. -279 с.
2. Олійник Т.А., Кушнірук Н.В., Саітгареєв Л.Н., Нагнибіда І.О. Техногенні родовища та їх класифікація // Збагачення корисних копалин, 2012. – Вип. 50(91).
3. Комплексна розробка рудних родовищ. Під ред. А.Д. Черних. - Київ: Техніка. 2005. - 270 с..
4. Євтехов В.Д. Техногені родовища: від використання наявних – до створення більш досконалих // Геолого-мінералогічний вісник. 2003. № 1. - С. 19-26.
5. Черненко В.А. Прогнозування розробки техногенних родовищ в Кривбасі // Відомості Академії гірничих наук України. 1998. № 1. - С. 26-29.
6. Казаков В.Л. Геоморфологія провальних зон Кривбасу / Охорона довкілля: екологічні, освітянські, медичні аспекти. Матер. IV Всеукр. Конф. III частина. Кривий Ріг, 1999. - С. 29-31.
7. Малахов Г.М. Техногенез у геологічному середовищі. - Кривий Ріг: Надра, 2003. - 165 с.

УДК 624.131.1:622.834.1

Гончаренко С.І., аспірант IV курсу,
відділ інженерної геології
Науковий керівник: Кріль Т.В., кандидат
геологічних наук, старший дослідник
Інститут геологічних наук НАН України

ОБҐРУНТУВАННЯ ГРАНИЦЬ ПОШИРЕННЯ ЗМІН ГЕОЛОГІЧНОГО СЕРЕДОВИЩА У ВУГЛЕВИДОБУВНИХ РЕГІОНАХ (НА ПРИКЛАДІ ПРАТ «ДТЕК ПАВЛОГРАДВУГІЛЛЯ»)

Розвиток вугільної промисловості України, зокрема шахт Західного Донбасу, нерозривно пов'язаний із постійним погіршенням гірничо-геологічних умов та порушенням стабільності геологічного середовища [1, 2]. Важливим аспектом для таких районів є встановлення меж геологічного середовища відповідно до визначень наведених у роботах Кріль Т. та Демчишина М. [2, 3]. Фундаментальні основи оцінки напружено-деформованого стану масиву навколо підземних порожнин закладено в роботах Е. Хука Е. та Брея Дж. [4], та Шашенка О., Пустовойтенко В., Сдвижкової О., Бондаренка В., Гардигори М., Симановича Г., Соцкова В., Снігура В. [5, 6]. Метою є визначення границь поширення змін напружено-деформованого стану геологічного середовища від впливу гірничої виробки методом чисельного моделювання.

Дослідження виконано на прикладі умов Західного Донбасу. Для аналізу впливу гірничої виробки було обрано дві шахти ПрАТ “Павлоградвугілля”. Максимальні глибини закладання гірничих виробок у ш. «Павлоградська» H = 230 м, ш. «Західно-Донбаська» H = 730 м. Ширина розрахункової моделі прийняті становить 100, а висота 140 м. Гірничу виробку розміщено на осі симетрії (X = 50 м) з урахуванням залишення масиву в підошві потужністю 98 м. На нижній та бічних границях моделі задано стандартне обмеження переміщень (Standard fixities). На верхній границі масиву (Y = 140 м) прикладено розподілене навантаження P (Distributed load), де h – потужність порід над виробкою, γ – питома вага порід:

$$P = \gamma * (H - h) \quad (1)$$

Форму виробки прийнято типову у вигляді склепінчастого перерізу шириною 5 м. Поведінку вугленосного гірського масиву описано пружно-пластичною моделлю Кулона-Мора (Mohr-Coulomb), що дозволяє врахувати перехід порід у граничний стан за критерієм переміщень [7]. Модель кріплення – металеве, податливе, аркове, яке моделювалося пружними балочними елементами (Plate) із заданням еквівалентних зведених характеристик жорсткості на 1 погонний метр (E_A, E_I).

Чисельний експеримент реалізовано у програмному комплексі PLAXIS 2D у плоскій постановці (Plane strain) з використанням 15-вузлових скінченних елементів (Staged construction) (рис. 1).

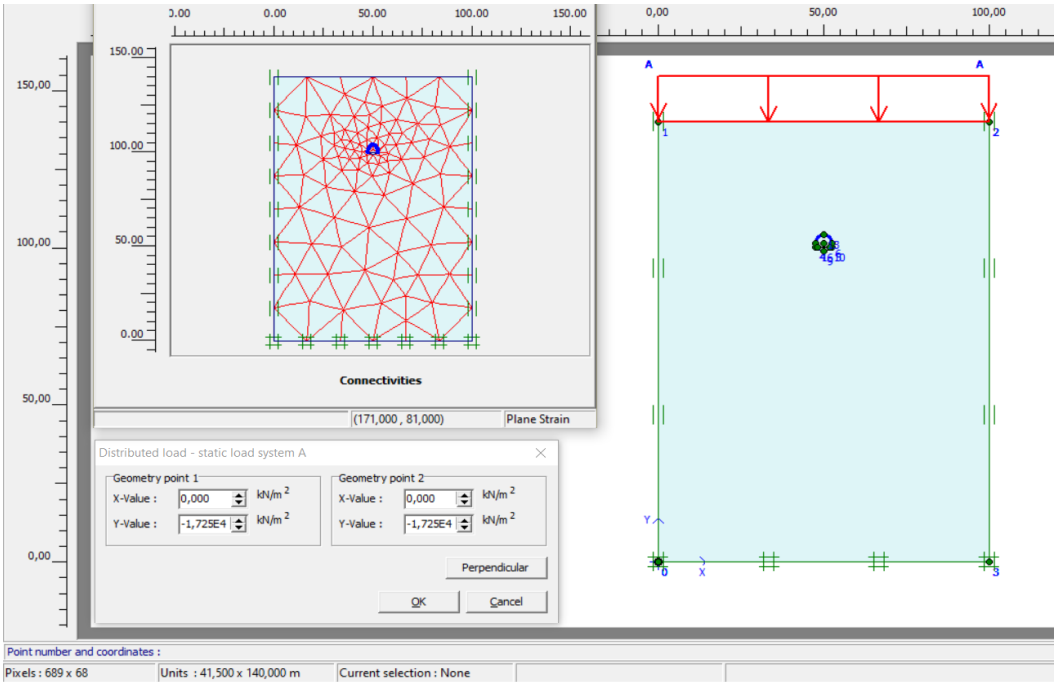


Рисунок 1 – Схема прикладання навантаження та сітка скінченних елементів розрахункової моделі

Розрахунок виконувався у три етапи: Генерація напружено-деформованого стану природного масиву до початку ведення гірничих робіт, моделювання виймання породи шляхом деактивації скінченних елементів усередині проектного контуру виробки, внаслідок чого відбувається первинний перерозподіл напружень та активація елементів кріплення (Plate) для оцінки сумісної роботи системи між гірським масивом і кріпленням та фіксація кінцевих деформацій (осідання покрівлі, конвергенція стінок). В результаті активізоване кріплення починає створювати жорсткий радіальний опір зміщення контуру гірського масиву, внаслідок чого можна зафіксувати граничні зміни геологічного середовища.

Границя впливу гірничої виробки на гірничий масив визначалась за критерієм згасання збуреного напружено стану. Для точної локалізації цієї межі, використано метод побудови розрізів (Cross sections) від контуру виробітки вглиб масиву. Межею зміненого геологічного середовища прийнято координати по осям X та Y, у якій епюра вертикальний напружень Sigma YY асимптотично наближається до початкового літостатичного тиску, а інкременти переміщень наближаються до нуля (рис. 2).

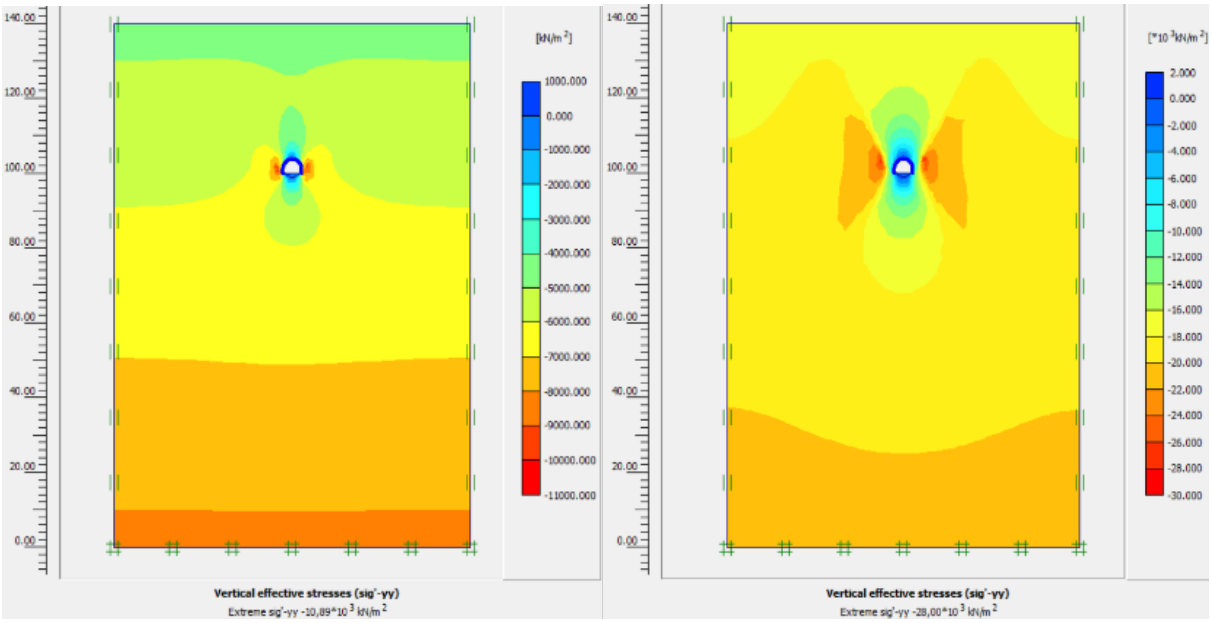


Рисунок 2 – Епюри напружено-деформованого стану природного масиву ш. «Павлоградська» та ш. «Західно-Донбаська»

За результатами чисельного моделювання напружено-деформованого стану масиву, визначено радіус поширення змін у геологічному середовищі, що варіює у межах 8-20 м навколо гірничої виробки для ш. «Павлоградська» та 18-24 м – ш. «Західно-Донбаська». Практичне значення отриманих результатів полягає в тому, що вони дають змогу науково обґрунтувати глибину нижньої межі геологічного середовища. Для ш. «Павлоградська» та ш. «Західно-Донбаська» становлять 250 м та 764 м відповідно.

Дослідження виконано в рамках наукової теми ІІІ-5-23 «Інженерно-геологічні основи містобудування та стратегічного освоєння підземного простору», номер державної реєстрації 0123U100129.

Список використаних джерел:

1. Shekhunova S. B., Kril T. V. Geological and economic risk assessment for territories of hazardous geological and technogenic processes (exemplified by Solotvyno township). Scientific Bulletin of National Mining University. 2022 – № 2 – с. 79–85.

2. Демчишин М. Г. Техногенні впливи на геологічне середовище території України. ІГН НАН України, Київ. 2004 – с.156.

3. Кріль Т. В. Принципи встановлення глибинних охоронних зон для об’єктів історико-культурної спадщини в умовах інтенсивного освоєння підземного простору сучасних міст. Збірник наукових праць Інституту геологічних наук НАН України. 2025 – Т. 18, № 2 – с. 116–128.

4. Hoek E., Brown E. T. Underground Excavations in Rock. London: CRC Press. 1980 – с. 527.

5. Шашенко О. М., Пустовойтенко В. П., Сдвижкова О. О. Геомеханіка: підручник. Київ: Новий друк. 2016 – с. 528.

6. Bondarenko V., Hardygora M., Symanovych H., Sotskov V., Snihur V. Numerical methods of geomechanics tasks solution during coal deposits' development. Розробка родовищ: Зб. наук. пр. 2016 – Т. 10, № 3. – с. 1–12.

7. Ankui H.., Baoda W., Xingyu D., Rui Z., Qiwei Z. UMAT redevelopment of elastoplastic damage constitutive model based on Mogi–Coulomb strength criterion. AIP Advances. 2026 – Т. 16, № 2 – с. 025249.

УДК 622.243:622.276

Горобець Т.Ю., студент гр. 185-22-1
Науковий керівник: Судаков А.К., д.т.н., проф. кафедри нафтогазової інженерії та буріння
Національний технічний університет «Дніпровська політехніка»

ОБҐРУНТУВАННЯ В'ЯЖУЧОЇ РЕЧОВИНИ БЛОКОВИХ ГРАВІЙНИХ ФІЛЬТРІВ ГІДРОГЕОЛОГІЧНИХ СВЕРДЛОВИН

У сучасних умовах експлуатації нафтових і газових свердловин України особливої актуальності набуває підвищення ефективності фільтраційних систем у складних гірничо-геологічних умовах. Значна частина родовищ характеризується наявністю слабкозцементованих піщаних колекторів, що призводить до винесення піску, замулювання привибійної зони та зниження дебіту свердловин.

Одним із найбільш ефективних способів боротьби з винесенням дрібного піску є застосування блокових гравійних фільтрів [1, 2]. Вони забезпечують механічну стабілізацію привибійної зони та створюють бар'єр для частинок породи. Однак ефективність таких фільтрів значною мірою залежить від властивостей в'яжучого матеріалу, який використовується для формування гравійного блоку.

Аналіз існуючих в'яжучих речовин показує, що традиційні матеріали (епоксидні смоли, поліуретани, цементні розчини) мають ряд суттєвих недоліків. Зокрема, вони частково заповнюють поровий простір між зернами гравію, що призводить до зниження проникності та збільшення гідравлічного опору фільтра. Крім того, утворюються замкнуті пори, які не беруть участі у процесі фільтрації [3, 4].

Також відомі рішення із застосуванням тимчасових або органічних в'яжучих речовин (наприклад, на основі желатину або водорозчинних полімерів) [5, 6], які здатні забезпечити формування блоку лише на етапі монтажу та транспортування блоків по стовбуру свердловин. Проте такі матеріали мають обмежену термостійкість та можуть передчасно руйнуватися під дією пластових температур і вод [7, 8].

У зв'язку з цим виникає необхідність обґрунтування та вибору такого в'яжучого матеріалу, який би поєднував високу механічну міцність на етапі транспортування та спуску з можливістю часткового або повного збереження порового простору під час експлуатації.

У даній роботі пропонується використання комбінованого в'яжучого матеріалу, що включає мінеральну основу (геополімер) та водорозчинний або біодеградований компонент (наприклад, модифікований крохмаль) [9, 10]. Такий підхід дозволяє сформувати міцний гравійний блок, який у процесі експлуатації частково розмонолічується.

Технологія передбачає виготовлення блокового гравійного фільтра на поверхні у спеціальній формі з рівномірним розподілом гравію та в'яжучого. Це забезпечує контроль структури, міцності та пористості фільтра до його встановлення у свердловину[11-15].

Після спуску фільтра в свердловину та початку експлуатації під дією пластових вод відбувається поступове вимивання розчинного компонента, що призводить до збільшення ефективної пористості та проникності. У результаті формується високоефективне фільтраційне середовище з оптимальними гідродинамічними характеристиками [16, 17].

Таким чином, запропоноване в'яжуче вещество дозволяє поєднати переваги жорстких блокових конструкцій і насипних гравійних обсипок, забезпечуючи як міцність, так і високі фільтраційні властивості.

Для умов українських родовищ питних вод це дозволяє [18]:

- зменшити винесення з продуктивного горизонту механічних домішок - піску;
- підвищити проникність гравійного обсипання;
- знизити гідравлічний опір при видобутку рідких корисних копалин, і за рахунок цього збільшити дебіт свердловин;
- забезпечити стабільну роботу свердловини;
- збільшити термін експлуатації свердловинного обладнання та міжремонтний період свердловин.

Запропоноване рішення є технологічно доцільним, економічно ефективним та екологічно безпечним, оскільки передбачає використання доступних матеріалів та мінімізацію негативного впливу на пласт.

Висновки:

Показано, що: ефективність блокових гравійних фільтрів значною мірою визначається властивостями в'яжучого матеріалу, який впливає на пористість та проникність конструкції; традиційні в'яжучі матеріали знижують ефективність фільтра через перекриття порового простору та утворення замкнутих пор.

Запропоновано комбіновану в'яжучу речовину, яка дозволяє забезпечити: необхідну міцність на етапі монтажу та транспортування блочного гравійного фільтра по стовбуру свердловини; високі фільтраційні характеристики під час експлуатації, що робить його перспективним для практичного застосування.

Список використаних джерел:

1. Буріння свердловин на воду : навчальний посібник / А.К. Судаков, Я.М. Фем'як, І.І. Чудик, О.М. Федик, В.І. Щуцький – Дрогобич: Посвіт, 2022. 344 с.
2. A. Sudakov, H. Hapich, A. Shumov, L. Holub (2023). Overview of binding substances for manufacturing block gravel filters of hydrogeological wells. Tooling materials science, 26, 49-57. https://doi.org/10.33839/2708-731X-25-1-58-68.
3. Судаков А. К., Дзюбик А. Р., Кузін Ю. Л., Назар І. Б., Судакова Д. А. Ізоляція поглинаючих горизонтів бурових свердловин термопластичними матеріалами. Монография. – Дрогобич.: «Просвіт», 2019. 182 с.
4. Фем'як Я. М., Чудик І. І., Судаков А,К., Якимечко Я. Я., Федик О.М. Практичне використанням кавітаційних процесів у бурінні свердловин: Монографія. - Дрогобич: «Посвіт», 2021.
5. Kozhevnikov A.A., Sudakov A.K., Dreus A.J., Lysenko, K. Ye. (2014) Study of heat transfer in cryogenic gravel filter during its transportation along a drillhole. Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu. v.6. 49–54. EID: 2-s2.0-84917692657
6. Kozhevnikov A.A., Ratov B.T., Sudakov A.K., Mostinets O.N. (2015) Experience of equipment of hydrogeological well of cryogenic-gravel filter. Mining of mineral deposits 9 (4), 493-499. https://doi.org/10.15407/mining09.04.493.
7. Kozhevnikov A., Sudakov A., Dreus A. (2015). Scientific bases of innovation technology of drill-hole equipment by cryogenic-gravel filters. Science and innovation. 11(3). 23-38. https://doi.org/10.15407/scin11.03.023
8. Hennadii Hapich, Alina Zahrytsenko, Andrii Sudakov, Artem Pavlychenko, Sergiy Yurchenko, Diana Sudakova & Iryna Chushkina (2024). Prospects of alternative water supply for the population of Ukraine during wartime and post-war reconstruction, International Journal of Environmental Studies. https://doi.org/10.1080/00207233.2023.2296781
9. Ratov B.T., Sudakov A.K., Fedorov B.V., Ruslyakova-Kupriyanova I.A., Sundetova P.S. (2024). Improvement of the methodology for calculating the expected drilling speed with PDC chisels. Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu, 1, 26-31. https://doi.org/10.33271/nvngu/2024-1/026
10. Chudyk, I., Sudakova, D., Pavlychenko, A., & Sudakov, A. (2024). Bench studies of the process of transporting an inverse gravel filter of block type along the well. V International Conference "ESSAYS OF MINING SCIENCE AND PRACTICE IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 1348 (2024) 012056. IOP Publishing. https://doi.org10.1088/1755-1315/1348/1/012009
11. Chudyk I., Biletskiy M., Ratov B., Sudakov A., Borash A. (2024). A new method of well completing with employment of the implosion effect. V International Conference "ESSAYS OF MINING SCIENCE AND PRACTICE IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 1348 (2024) 012056. IOP Publishing https://doi.org/10.1088/1755-1315/1348/1/012056
12. Sudakov A., Pavlychenko A., Hapich H., Isakova M, Shumov A (2025). Water supply from groundwater: new solutions for a battered-and-bruised Ukraine. Water Supply ws2025026. https://doi.org/10.2166/ws.2025.026
13. Ratov, B.T., Fedorov, B.V., Syzdykov, A.Kh., Zakenov, S.T., Sudakov A.K. (2021). The main directions of modernization of rock-destroying tools for drilling solid mineral resources. 21st International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2021. Section Exploration & Mining. 503-514. https://doi.org/10.5593/sgem2021/l.l/s03.062
14. Chernova M., Kuntsyak Y., Ratov B., Sudakov A., Nuranbayeva B. (2022). Substantiation of the use of polymer-composite materials, which reduce the influence of dynamic friction forces of macrostructural surfaces, when drilling wells. International Multidisciplinary Scientific GeoConference: SGEM; Sofia, №21(1.2). 917-925. https://doi.org/10.5593/sgem2021/1.1/s06.111
15. Biletskiy M., Ratov B., Sudakov A., Sudakova D., Borash B. (2023). Modeling of drilling water supply wellswith airlift reverse flush agent circulation. Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu. № 1. 53-60.
16. Chudyk, I., Sudakova, D., Dreus, A., Pavlychenko, A., & Sudakov, A. (2023). Determination of the thermal state of a block gravel filter during its transportation along the borehole. Mining of Mineral Deposits, 17(4), 75-82.
17. Судаков А.К., Загриценко А.М., Мостинець О.Н., Подвігіна О.О., Шумов А.С. Гідрогеологічне та технологічне обґрунтування альтернативного водопостачання півдня України: монографія. – Київ : «Нова Думка», 2026. - 284 с.
18. Судаков А.К., Дмитренко В.І., Шликов М.О. Експлуатація та ремонт свердловин на рідкі і газоподібні корисні копалини : підручник. – Київ : «Нова Думка», 2026. – 276 с.

УДК 622.271

Дзьоба М.В., аспірант
Косенко Т.В., старший викладач
Науковий керівник: Фролов О.О., д.т.н., проф.
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ПІДРАХУНОК ОБ'ЄМІВ РОЗКРИТТЯ ТА ВИДОБУТКУ ПОРІД СИХІВСЬКОГО РОДОВИЩА В SURFER-3D

Одним із найбільш поширених програмних комплексів у сфері геологічного моделювання є Surfer. Програма забезпечує статистичний аналіз геологічних даних, інтерпретацію та побудову цифрових моделей родовищ для встановлення об'ємів гірничих робіт [1]. Також Surfer має можливість коригування створених геопросторових моделей на основі нових даних, які отримуються при відпрацюванні родовища.

Об'єми в програмі Surfer можна розраховувати для тіл, визначених верхньою та нижньою поверхнями або 3D-полігонами. Верхня та нижня поверхні визначаються grid-файлом або площиною з постійним рівнем Z. Розрахунки об'єму генеруються для кожної комірки сітки [2]. У ділянках, де поверхня нахилена у верхній або нижній частині комірки сітки, Surfer приблизно визначає об'єм призми.

Об'єм визначається між двома поверхнями в межах заданого контуру, тобто між покрівлею і підошвою пласта. Для цього на поверхню накладають контури, за якими виконують розрахунок. Для кращої візуалізації контурну карту поєднуємо з Surface Map (рис. 1).

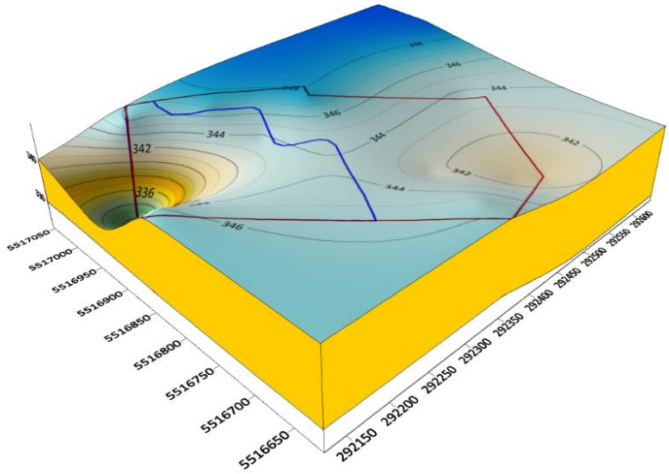


Рис. 1. Розрахункова схема для визначення об'єму гірських порід

Розрахункові контури об'єму гірського масиву в межах виділеної ділянки наведено на рис. 2.

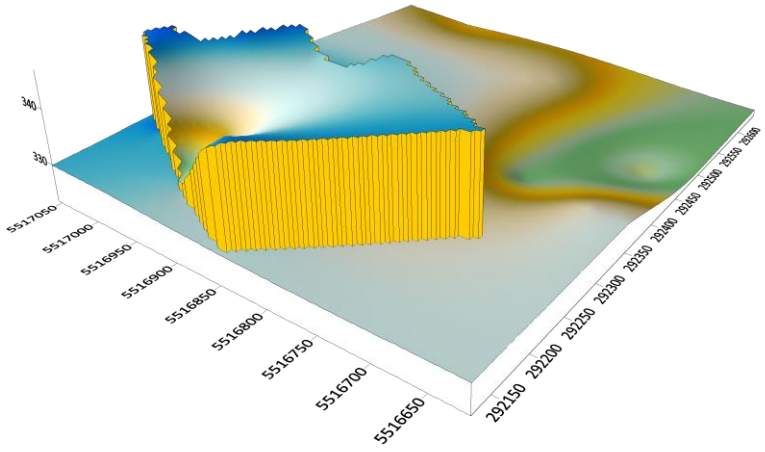


Рис. 2. Візуалізація оконтуреного об'єму гірського масиву

Підрахунок об’ємів виконано для розкривних порід, а також верхнього і нижнього шарів пісків Сихівського родовища в межах контуру гірничого відводу (червоний колір) і контуру Спеціального дозволу на видобування із зазначенням меж розкривних порід (зелений колір) та корисної товщі (синій колір) у межах ділянки Спеціального дозволу (рис. 3).

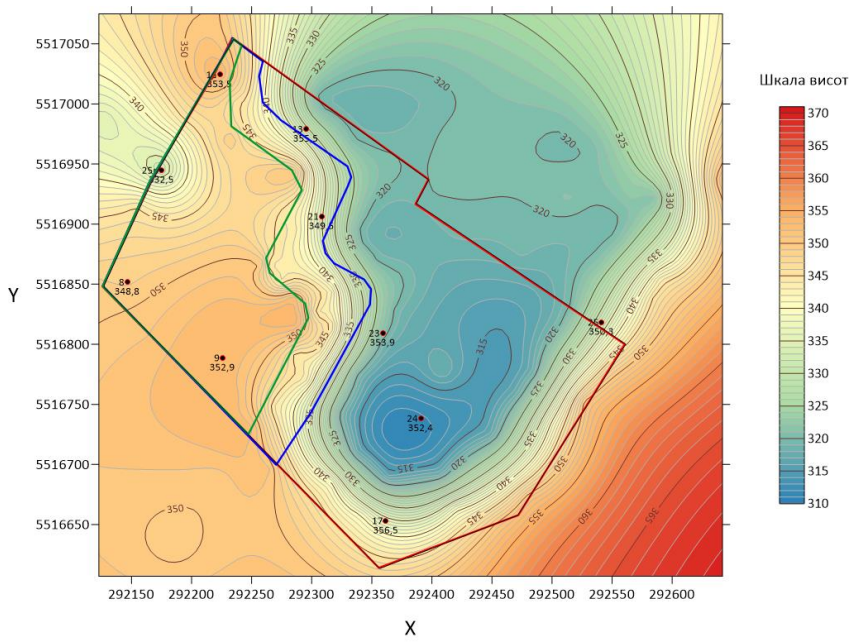


Рис. 3. Контурна карта ділянки для визначення об’ємів гірничих робіт

Спочатку визначаємо об’єм пісків нижнього шару. Для цього у grid-файл Surface вносяться дані верхньої та нижньої поверхонь відповідного шару, тобто межі між покрівлею та підошвою пісків. Потім визначається об’єм верхнього шару кварцових пісків у межах створення геопросторової моделі. Далі, аналогічно встановлюємо об’єм розкриву на усій ділянці родовища (гірничий відвід) та на ще невідробленій частині (в межах ділянки Спеціального дозволу виконання робіт).

Отримані, за результатами геопросторового моделювання Сихівського родовища кварцових пісків, розрахункові значення показників площ і об’ємів гірських порід (розкриву і корисних копалин) в межах гірничого відводу і ділянки Спеціального дозволу наведено у таблиці 1.

Таблиця 1

Значення площ і об’ємів гірських порід за результатами моделювання Сихівського родовища

Показники	Гірничий відвід (червоний контур)	Ділянка Спеціального дозволу (зелений і синій контури)
Площа в плані, м^2	95428,215	39687,627 – синій 25550,620 - зелений
Об’єми порід, м^3: – розкрив – верхній шар пісків – нижній шар пісків	 765044,038 1600036,604 797070,218	 178278,673 621558,002 334355,227

Отже, геопросторова модель Сихівського родовища кварцових пісків, яка отримана за результатами цифрового моделювання в Surfer, надає можливість розрахувати об’єми гірських порід в межах визначених ділянок, що в подальшому дозволяє встановлювати оптимальний напрям руху фронту гірничих робіт при розробці родовища корисних копалин.

Список використаних джерел:

1. Косенко Т. В. Перспективи розробки золоторудних родовищ на основі геодезичного моніторингу та ГІС технологій / Т. В. Косенко, Е. Шукюрлю // Збірник наукових праць НГУ, 2024. № 79. С. 38-48.

2. Surfer 8. User’s Guide. Contouring and 3D Surface Mapping for Scientists and Engineers. – Golden Software Inc., 2002. 640 p.

УДК 622.271

Дзьоба М.В., аспірант
Науковий керівник: Фролов О.О., д.т.н., проф.
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ОБҐРУНТУВАННЯ ЗАСТОСУВАННЯ ЧИСЕЛЬНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ДЛЯ ВИВЧЕННЯ НАПРУЖЕНОГО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ УКОСІВ ГІРСЬКИХ МАСИВІВ

На сьогодні чисельне моделювання гірничих об'єктів, систем і процесів поступово витісняє прикладні методи розрахунків, оскільки суттєво розширює можливості оцінки стійкості укосів уступів і бортів кар'єрів та дозволяє розв'язувати задачі механіки суцільного, дискретного і дискретно-суцільного середовищ [1]. Результати чисельного моделювання можуть використовуватися для підтвердження та уточнення розрахунків, виконаних методами граничної рівноваги.

Активне впровадження методів чисельного моделювання стало можливим завдяки розвитку потужної обчислювальної техніки та спеціалізованого програмного забезпечення. Це забезпечує можливість аналізу складних за будовою і геометрією зсувонебезпечних схилів у поєднанні з різноманітними інженерними спорудами, розташованими в їх межах. Висока точність розрахунків досягається за рахунок вбудованих алгоритмів, у яких імовірність похибок зведена до мінімуму, у зв'язку з чим чисельне моделювання дедалі частіше розглядається дослідниками як основний метод аналізу.

Як зазначають науковці, метод скінченних елементів дає можливість виконувати розрахунки стійкості укосів з урахуванням ширшого спектра чинників, при цьому розрахункова схема може бути поділена на значну кількість дискретних елементів. Окрім цього, істотно скорочуються витрати часу на повторні розрахунки у разі зміни інженерно-геологічних та гідрогеологічних умов об'єкта моделювання. У відповідних програмних комплексах також реалізовано процедуру поетапного зниження міцнісних характеристик гірського масиву для визначення критичних значень коефіцієнта стійкості схилу.

Метод чисельного моделювання ще донедавна вважався відносно новим підходом у розрахунках стійкості укосів гірських масивів, що було пов'язано з відсутністю достатньо потужних засобів автоматизації для побудови розрахункових моделей. Зазвичай метод ґрунтується на критерії міцності Мора-Кулона та використовує зсувні і міцнісні характеристики породи [2]. Важливою особливістю цього підходу є те, що поверхня ковзання не задається наперед, а формується як результат розрахунку.

Перевагою цього розрахункового підходу є відсутність потреби вводити спрощені припущення щодо роботи окремих секцій зсувного масиву та їх взаємодії між собою, оскільки модель формується шляхом дискретизації середовища на систему окремих елементів. У результаті ймовірна поверхня обвалення визначається як наслідок напружено-деформованого стану масиву і відображає його поведінку більш обґрунтовано. Крім того, метод чисельного моделювання забезпечує точніше відтворення роботи підпірних і зміцнювальних конструкцій у взаємодії з ґрунтовим або гірським середовищем.

Найбільш поширеним програмним комплексом, що реалізує метод чисельного моделювання, є PLAXIS 3D, у якому для оцінки стійкості застосовується спеціальна процедура зниження міцнісних параметрів ґрунту (метод зниження міцності), що забезпечує визначення коефіцієнта стійкості альтернативно до підходів методу граничної рівноваги. Розрахунок здійснюється шляхом розв'язання системи рівнянь рівноваги з урахуванням нелінійних зв'язків між напруженнями та деформаціями, а також умов пластичного руйнування масиву. Коректне формування розрахункової моделі забезпечує адекватне відтворення механічної поведінки ґрунтів і гірських порід у процесі зміни напруженого стану, що формується під час створення укосів кар'єрів та їх подальшої експлуатації.

Отже, незважаючи на відносну новизну чисельних методів при оцінці стійкості масивів, саме вони забезпечують найбільш точне прогнозування поведінки природних і штучних укосів за різних гірничо-геологічних умов та при використанні різноманітних зміцнювальних конструкцій.

Порядок побудови 3D-моделі в PLAXIS 3D полягає в наступному. Спочатку задаємо геометричні розміри робочої області, параметри якої повинні бути такими, щоб вона охоплювала межі можливої зони деформування гірського масиву. Наступним кроком є призначення типу гірської породи, яка буде застосована в моделі, і введення фізико-механічних властивостей породи. Далі в межах робочої області спочатку будуємо по координатах плоску модель, а потім її переводимо у тривимірний вигляд. Після створення розрахункової сітки виконуємо розрахунки для встановлення напружено-деформованого стану гірського масиву (рис. 1).

За результатами розрахунку отримуємо значення коефіцієнта стійкості, тобто Reached safety factor (рис. 2). В нашому випадку, оскільки формування моделі відбувалося для кута укосу уступу 50°, Reached safety factor становить 0,7828. Це означає, що модель не стійка і навантаження не витримала.

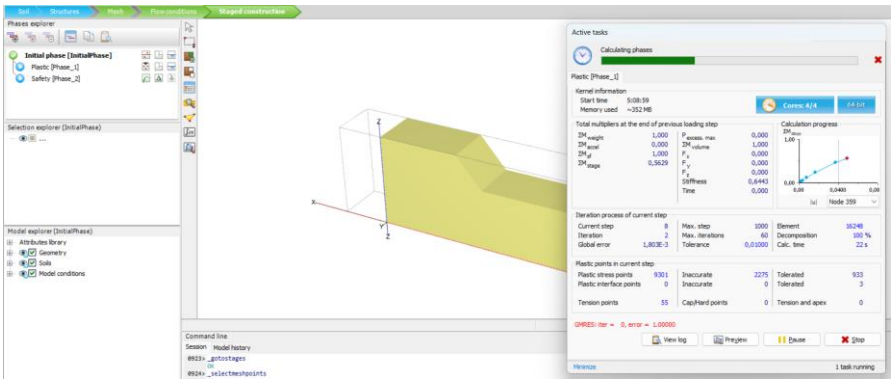


Рис. 1. Розрахунок стійкості тривимірної моделі уступу

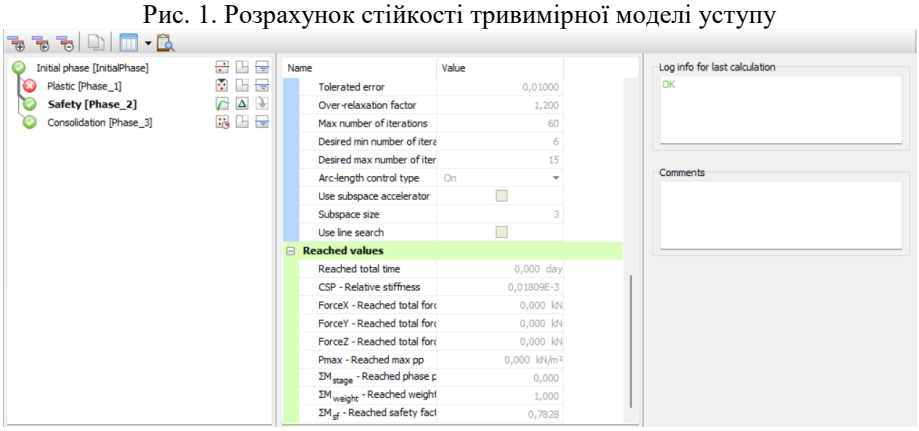


Рис. 2. Коефіцієнт стійкості укосу уступу (Reached safety factor)

Завершальним кроком є аналіз деформацій масиву в укосі уступу. На рис. 3 представлені результати напружено-деформованого стану кварцових пісків на уступі кар'єру з укосом 50°.

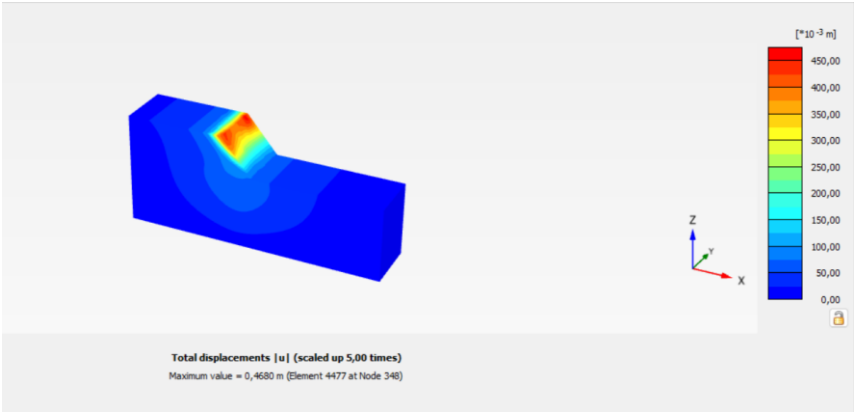


Рис. 3. Напружено-деформований стан кварцових пісків для куту укосу 50°

Таким чином, чисельне моделювання напружено-деформованого стану гірського масиву в програмному комплексі PLAXIS 3D, що використовує спеціальний метод розрахунку стійкості – зниження міцності, дозволяє виконувати оцінку стійкості укосу альтернативним методом, порівняно з традиційними методами граничної рівноваги.

Список використаних джерел:

1. Тютькін О. Л. Аналіз методів розрахунку стійкості зсувонебезпечних схилів / О. Л. Тютькін, О. І. Дубінчик, В.Р. Кільдєєв, Р.Б. Новік // Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика, 2022. №22. С. 85-92.

2. Kravchenko G. Resistance of fractal structures to natural and man-made influences / G. Kravchenko, L. Pudanova [Ел. ресурс]. – Режим доступу: https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/1001/1/012096.

УДК 622.24.051:004.8

Дмитрук М.О., аспірант, 185А-24-10, АСП
Науковий керівник: Пащенко О.А., к.т.н., доц.
Національний технічний університет «Дніпровська політехніка»

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ РУЙНУВАННЯ ГІРСЬКОЇ ПОРОДИ ЗА ДОПОМОГОЮ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ

Руйнування гірських порід є одним із найважливіших технологічних процесів при спорудженні нафтових, газових, геологорозвідувальних та спеціальних свердловин, а також при проведенні гірничих виробок і видобуванні корисних копалин. Від механізмів і динаміки руйнування породи під дією механічного навантаження безпосередньо залежать ефективність буріння, питомі енергетичні витрати, швидкість зносу породоруйнуючого інструменту, якість стовбура свердловини, рівень аварійності та загальна економічна ефективність робіт. Традиційні методи дослідження, такі як лабораторні випробування на міцність, візуальний аналіз шламу, швидкісна відеозйомка та емпіричні залежності, мають суттєві обмеження щодо обсягу даних, швидкості їх обробки та можливості реального прогнозування поведінки породи в складних геологічних умовах [1].

У сучасних умовах стрімкого розвитку цифрових технологій перспективним напрямом є застосування методів штучного інтелекту (ШІ) для автоматизованого аналізу, прогнозування та оптимізації процесу руйнування гірських порід. Штучний інтелект дозволяє обробляти великі масиви даних, отриманих з датчиків на долоті, вібраційних і силових сенсорів, систем моніторингу параметрів буріння (осьове навантаження WOB, частота обертання RPM, крутний момент Torque, механічна швидкість ROP), а також зображень високошвидкісної відеозйомки [2]. За допомогою алгоритмів машинного навчання та глибокого навчання вдається виявляти складні нелінійні закономірності між параметрами руйнування та технологічними режимами буріння, прогнозувати тип руйнування, розмір фрагментів породи, енергетичні показники та можливі ускладнення.

Процес руйнування гірської породи має складний нелінійний і багатостадійний характер. Він залежить від фізико-механічних властивостей породи (міцність на одноосьовий стиск σ_c, модуль пружності E, коефіцієнт Пуассона ν, ступінь тріщинуватості), режимів буріння, конструкції та матеріалу породоруйнуючого інструменту. Моделі штучного інтелекту дозволяють описувати ці залежності без необхідності створення складних аналітичних рівнянь, що часто є неможливим через багатопараметричність процесу [3].

Однією з ключових характеристик ефективності руйнування є механічна питома енергія (Mechanical Specific Energy – *MSE*), яка показує кількість енергії, витраченої на руйнування одиниці об’єму породи. Цей показник розраховується за формулою:

$$MSE = \frac{WOB}{A} + \frac{120\pi \cdot RPM \cdot Torque}{A \cdot ROP}, \quad (1)$$

де *WOB* – осьове навантаження на долото (кН), *A* – площа вибою (м²), *RPM* – частота обертання долота (об/хв), *Torque* – крутний момент (кН·м), *ROP* – механічна швидкість буріння (м/год).

Для прогнозування критичного напруження поширення тріщини широко застосовується критерій Гріффітса, який може бути інтегрований у моделі штучного інтелекту як цільова змінна:

$$\sigma_{cr} = \sqrt{\frac{2E\gamma}{\pi l(1-\nu^2)}}, \quad (2)$$

де γ – питома поверхнева енергія, l – половина довжини тріщини, ν – коефіцієнт Пуассона.

Сучасні дослідження активно використовують різні архітектури штучного інтелекту. Згорткові нейронні мережі (Convolutional Neural Networks – CNN) ефективно аналізують відеодані швидкісної зйомки для автоматичного розпізнавання тріщин, визначення їх довжини, кута поширення та швидкості розвитку. Алгоритми випадкового лісу (Random Forest) і градієнтного бустингу (XGBoost) добре працюють з табличними даними параметрів буріння, дозволяючи прогнозувати тип руйнування (крихке сколювання, пластична деформація чи втомне руйнування) з точністю 85–95 %. Метод опорних векторів (SVM) застосовується для класифікації станів вибою, а рекурентні нейронні мережі (LSTM) – для прогнозування динаміки процесу в часі [4].

Дослідження, проведені за допомогою моделей штучного інтелекту, демонструють чіткі відмінності в характері руйнування різних типів гірських порід. У крихких породах, таких як пісковики, вапняки та доломіти, моделі штучного інтелекту (зокрема згорткові нейронні мережі) ефективно фіксують швидке поширення макротріщин і утворення відносно великих фрагментів породи. Аналіз відеоданих високої швидкості показує, що в таких породах тріщини поширюються зі швидкістю від 100 до 500 м/с, а процес сколювання відбувається майже миттєво після досягнення критичного напруження. ШІ-моделі з високою точністю (до 93–96 %) ідентифікують момент ініціації тріщини, напрямок її розвитку та розмір утворених сколів, що дозволяє точно прогнозувати механічну поведінку вибою [5].

На противагу цьому, у пластичних глинистих відкладеннях (аргіліти, сланці, глинисті мергелі) штучний інтелект краще прогнозує утворення дрібнодисперсного шламу, поступове накопичення пластичних деформацій і суттєве підвищення значення механічної питомої енергії (MSE). У таких породах руйнування відбувається повільніше, переважно за рахунок пластичного течіння матеріалу, а не крихкого сколювання. Моделі ШІ вловлюють зростання пластичних деформацій за зміною вібраційного сигналу, збільшенням крутного моменту та поступовим підвищенням MSE на 25–40 % порівняно з крихкими породами [6]. Це дає змогу своєчасно виявляти перехід від ефективного крихкого руйнування до неефективного пластичного режиму.

Застосування штучного інтелекту відкриває принципово нові можливості для оперативного управління процесом буріння в реальному часі. На основі постійного аналізу поточних даних (WOB, RPM, Torque, ROP, вібрації) моделі ШІ можуть рекомендувати оптимальні значення осьового навантаження та частоти обертання долота. Головною метою такого регулювання є досягнення мінімального значення MSE при одночасній максимізації механічної швидкості проходки (ROP). Наприклад, при виявленні переходу до пластичного руйнування система може автоматично зменшити осьове навантаження на 15–20 % і підвищити частоту обертання, що дозволяє повернутися до більш енергоефективного режиму буріння. Таке інтелектуальне управління знижує енергоспоживання на 12–18 % і зменшує знос долота.

Особливо актуальним застосування штучного інтелекту є в умовах українського буріння. Для більшості родовищ України характерна швидка зміна літологічних типів порід у розрізі свердловини, наявність численних тріщинуватих зон, зон аномально високого пластового тиску та нестійких глинистих інтервалів. У таких умовах традиційні методи контролю параметрів буріння часто не встигають реагувати на швидкі зміни геологічного середовища. Моделі штучного інтелекту, навчені на великих обсягах історичних даних буріння з різних регіонів України (Карпатський регіон, Дніпровсько-Донецька западина, Причорноморська западина та шельф Чорного моря), дозволяють з випередженням прогнозувати ризики виникнення вібрацій, диференціальних прихоплень, обвалень стінок свердловини та поглинань промивальної рідини. Завчасне виявлення небезпечних ситуацій дає змогу буровій бригаді або автоматизованій системі вжити запобіжних заходів, що значно підвищує безпеку робіт і знижує непродуктивний час буріння в середньому на 20–30 %.

Типова методологія дослідження процесу руйнування гірської породи за допомогою штучного інтелекту включає кілька послідовних етапів. На першому етапі відбувається збір великого масиву даних з бурових установок, сенсорів і систем телеметрії. Далі виконується попередня обробка даних: нормалізація, очищення від аномалій і шумів, усунення пропусків. Наступним кроком є розмітка даних спеціалістами (вручну або напівавтоматично), після чого проводиться навчання моделей штучного інтелекту. Важливим етапом є крос-валідація та тестування моделей на незалежних наборах даних, що не брали участі в навчанні. Найперспективнішими на сьогодні вважаються гібридні фізико-інтелектуальні моделі. Вони поєднують фізичні закони руйнування гірських порід (критерій Гріффітса, енергетичний підхід на основі MSE) з сучасними алгоритмами машинного навчання. Такі гібридні моделі демонструють вищу точність прогнозування та кращу узагальнюючу здатність порівняно з чисто емпіричними (data-driven) підходами, особливо в умовах обмеженої кількості даних.

Подальші наукові дослідження доцільно спрямовувати на розробку більш складних гібридних фізико-інтелектуальних моделей, здатних працювати в умовах неповної та зашумленої інформації. Перспективним є використання генеративних нейронних мереж (GAN) для симуляції процесів руйнування в різних геологічних умовах, подальше удосконалення алгоритмів розпізнавання образів на відеоданих високої роздільної здатності, а також створення компактних портативних систем штучного інтелекту (edge AI), призначених для оперативного використання безпосередньо в польових умовах бурових майданчиків.

Список використаних джерел:

1. Барановський Є. М. Про руйнування гірських порід при бурінні глибоких свердловин / Є. М. Барановський, В. М. Мойсишин // Фізико-технічні проблеми видобування енергоносіїв. – 2007. – Вип. 21. – С. 21–23.

2. Орловський В.М. Буріння нафтових і газових свердловин : підр. / В.М. Орловський. – Х. : Вид-во НТУ «ХПІ», 2024. – 456 с.

3. Борисов К. І. Сучасні методи оцінки ефективності руйнування гірських порід із застосуванням штучного інтелекту // Гірничий вісник. – 2025. – № 1. – С. 45–52.

4. Vozniy V. Application of machine learning for rock failure prediction during drilling operations // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2024. – Vol. 234. – P. 212–225.

5. Ahmad, N., & Abbas, A. (2026). Artificial intelligence-enabled optimization of deep drilling operations using real-time data analytics. https://doi.org/10.13140/RG.2.2.14335.88482.

6. Boukredera, F. S., Hadjadj, A., Youcefi, M. R., & Ouadi, H. (2025). AI-Driven Optimization of Drilling Performance Through Torque Management Using Machine Learning and Differential Evolution. Processes, 13(5), 1472. https://doi.org/10.3390/pr13051472.

УДК 622.1:528.7

Долнер В.В., студент 3-го курсу, гр. ГГ-31
Горба Д.В., студент 3-го курсу, гр. ГГ-31
Державний університет «Житомирська політехніка»

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ТОЧНОСТІ ЦИФРОВИХ МОДЕЛЕЙ КАР'ЄРІВ, ОТРИМАНИХ ФОТОГРАММЕТРИЧНИМ ТА ЛАЗЕРНИМ МЕТОДАМИ

Сучасні маркшейдерські задачі на відкритих гірничих роботах – облік об'ємів видобутих і розкривних порід, моніторинг геометрії бортів, контроль рекультивації, оцінка стійкості укосів – все більше базуються на тривимірних цифрових моделях рельєфу (ЦМР) високої точності. Серед безпілотних технологій збору геопросторових даних домінують два принципово різні методи: фотограмметрична зйомка з кольоровою (RGB) камерою з подальшим відновленням геометрії за технологією Structure from Motion (SfM) і пряме вимірювання дальностей лазерним сканером (LiDAR). Обидва методи реалізуються на однотипних носіях – мультироторних безпілотних літальних апаратах (БПЛА), однак мають принципово різну природу формування координат точок поверхні, що зумовлює різний рівень точності, продуктивності та чутливості до зовнішніх умов. Порівняльні експериментальні дослідження на українських кар'єрах при синхронному виконанні зйомки одного об'єкта в ідентичних умовах залишаються одиничними.

Метою дослідження є порівняльний експериментальний аналіз точності цифрових моделей рельєфу кар'єру, отриманих синхронною фотограмметричною та LiDAR-зйомкою з БПЛА, а також оцінка економічної доцільності кожного методу для типових маркшейдерських задач.

Об'єкт дослідження – діюча ділянка [назва кар'єру] площею 6,2 га, представлена чотирма уступами загальною висотою 42 м. Поверхня вибою складена скельними породами (граніт), у північній частині кар'єру наявні зони з рідкою чагарниковою рослинністю, у південно-східній частині – штабель готової продукції висотою до 8 м. Перепад висот у межах знімальної території становить 47 м.

Експериментальна установка передбачала одночасне виконання двох незалежних аерофотозйомок із використанням двох БПЛА: DJI Mavic 3 Enterprise з модулем RTK і вбудованою 4/3″ CMOS-камерою (20 МП) – для фотограмметричної зйомки; DJI Matrice 350 RTK з підвісом Zenmuse L2 (LiDAR-сенсор + 4/3″ CMOS RGB-камера 20 МП) – для лазерного сканування з паралельним отриманням RGB-знімків. Контрольні вимірювання виконано за допомогою GNSS-приймача Topcon GR-5 (RTK-режим, 15 наземних опорних точок – GCP, рівномірно розподілених у плановому розрізі) та електронного тахеометра Topcon GTS-225 (35 незалежних контрольних точок для оцінки точності, з них 22 на скельних поверхнях, 8 у зоні чагарникової рослинності, 5 на бровках уступів).

Параметри польоту обрано однакові для обох систем: висота 100 м над початковою точкою, швидкість 6 м/с, напрям зйомки – меридіональний. Для фотограмметричної зйомки задано поздовжнє перекриття 80 % та поперечне 70 %, що при висоті 100 м забезпечило просторову роздільну здатність на місцевості (GSD) 2,7 см/пкс. Для LiDAR-сканування використовувалися параметри: частота імпульсів 200 кГц, кут сканування ±45°, що при заданій висоті дало середню щільність хмари точок 248 пкт/м². Загальна тривалість польотів становила 35 хв для фотограмметрії та 26 хв для LiDAR при ідентичній площі покриття.

Опрацювання даних виконано в спеціалізованому програмному забезпеченні: фотограмметрична обробка – Agisoft Metashape Professional 2.1.3 (вирівнювання знімків, побудова щільної хмари точок, генерація ЦМР); опрацювання даних LiDAR – DJI Terra з подальшою фільтрацією точок ґрунту в TerraSolid. Обидві ЦМР побудовано з однаковим розміром комірки 5 × 5 см та приведено до єдиної системи координат УСК-2000.

Оцінка точності здійснювалась через порівняння висот ЦМР у позиціях 35 контрольних точок з результатами тахеометричних вимірювань. Узагальнені показники точності наведено в табл. 1.

Таблиця 1

Точність ЦМР відносно контрольних точок (n = 35)

Метод	RMSE планове, см	RMSE висотне, см	Макс. |Δh|, см	Точок з |Δh|>10 см
Фотограмметрія (RGB+SfM)	3,2	4,8	14,7	4 з 35
LiDAR (Zenmuse L2)	2,1	3,4	9,5	1 з 35
Перевага LiDAR	**−1,1 см**	**−1,4 см (≈1,4×)**	**−5,2**	**−**

Аналіз різниці між двома ЦМР виконано шляхом попіксельного віднімання моделей у межах знімальної території. Середнє абсолютне розходження становить 2,1 см, стандартне відхилення – 4,2 см, максимальне локальне відхилення – 18 см. Розподіл відхилень близький до нормального, проте має асиметрію в зонах рослинності, де фотограмметрична ЦМР систематично перевищує висоти LiDAR-моделі на 6–15 см. Це пояснюється фундаментальною різницею методів: SfM-алгоритм відновлює видиму поверхню (включно з кронами рослин), тоді як LiDAR за достатньої щільності точок дозволяє виокремити справжню земну поверхню за останнім імпульсом. Друга концентрація розходжень спостерігається на бровках уступів, де LiDAR забезпечує різкіший профіль завдяки малому ефективному діаметру лазерного променя (близько 5 см на висоті 100 м), а

фотограмметричні алгоритми згладжують різкі перепади. На відкритих скельних поверхнях у середній частині уступів відмінності між моделями не перевищують ±3 см.

Економічне порівняння методів представлено в табл. 2 з урахуванням капітальних витрат на обладнання, часу виконання польових і камеральних робіт та орієнтовної собівартості зйомки 1 га.

Таблиця 2

Економічне та технологічне порівняння методів

Параметр	Фотограмметрія (RGB+SfM)	LiDAR (Zenmuse L2)
Вартість комплексу обладнання	8–15 тис. дол. США	35–60 тис. дол. США
Тривалість зйомки (6,2 га)	35 хв	26 хв
Тривалість камеральних робіт	6–8 год	1–2 год
Кількість опорних точок (GCP)	12–20	6–10
Залежність від освітлення/погоди	висока	низька
Робота в зонах рослинності	обмежена	ефективна
Класифікація точок (грунт/рослинність)	відсутня	автоматична
Орієнтовна вартість зйомки 1 га	25–40 дол.	80–150 дол.
Додаткові продукти зйомки	ортофотоплан, текстура 3D	інтенсивність відбиття, RGB

За результатами експерименту встановлено наступне.

1. LiDAR-зйомка забезпечує вертикальну точність ЦМР приблизно у 1,4 рази вищу за фотограмметричну (RMSE 3,4 см проти 4,8 см) при значно більшій стійкості до зон рослинності та різких перепадів рельєфу.

2. Фотограмметрична зйомка демонструє точність, достатню для більшості маркшейдерських задач об'ємного обліку (відносна похибка обчислення об'єму штабеля не перевищує 0,9 %), при цьому має у 3–4 рази нижчу вартість обладнання та забезпечує побудову ортофотоплану як додаткового продукту, що недоступне з RGB-каналу LiDAR-комплексу в тому ж проліті.

3. Час камерального оброблення фотограмметричних даних у 4–6 разів перевищує час оброблення LiDAR-даних, що при регулярному щомісячному моніторингу стає вагомим чинником при оцінюванні сумарної собівартості робіт.

Висновок. Оптимальний метод побудови ЦМР кар'єру залежить від конкретної маркшейдерської задачі. Для задач щомісячного об'ємного обліку та документального ортофотоплану доцільне використання фотограмметрії з RTK-БПЛА. Для прецизійного моніторингу геометрії уступів, контролю стійкості бортів, зйомок у зонах рослинності та задач з підвищеними вимогами до вертикальної точності рекомендована LiDAR-зйомка. Найбільш ефективною з точки зору точності та інформативності є комбінована технологія, при якій LiDAR забезпечує опорну геометрію поверхні, а фотограмметричний ортофотоплан накладається як текстурний шар. Подальші дослідження доцільно спрямувати на оцінку довгострокової повторюваності кожного методу при моніторингових серіях зйомок та на адаптацію методики до різних типів родовищ України.

Список використаних джерел:

1. Agüera-Vega F., Carvajal-Ramírez F., Martínez-Carricondo P. Accuracy of Digital Surface Models and Orthophotos Derived from Unmanned Aerial Vehicle Photogrammetry // Journal of Surveying Engineering. 2017. Vol. 143, № 2. 04016025. DOI: 10.1061/(ASCE)SU.1943-5428.0000206

2. Salach A., Bakuła K., Pilarska M., Ostrowski W., Górski K., Kurczyński Z. Accuracy Assessment of Point Clouds from LiDAR and Dense Image Matching Acquired Using the UAV Platform for DTM Creation // ISPRS International Journal of Geo-Information. 2018. Vol. 7, № 9. 342. DOI: 10.3390/ijgi7090342

3. Cucchiaro S., Maset E., Cavalli M., Crema S., Marchi L., Beinat A., Cazorzi F. How does co-registration affect geomorphic change estimates in multi-temporal surveys? A case study of an alpine debris-flow channel // GIScience & Remote Sensing. 2020. Vol. 57, № 5. P. 611–632.

4. Štroner M., Urban R., Línková L. A New Method for UAV Lidar Precision Testing Used for the Evaluation of an Affordable DJI ZENMUSE L1 Scanner // Remote Sensing. 2021. Vol. 13, № 23. 4811.

5. Поліщук Д.С., Панасюк А.В. Використання програмного забезпечення Agisoft Metashape в гірництві // Тези Всеукраїнської науково-практичної конференції до Дня науки. Житомир: «Житомирська політехніка», 2025.

6. Городинська М.В., Котенко В.В. Докладне картування гірничих виробок за допомогою лазерного сканування (LiDAR) // Тези Всеукраїнської науково-практичної конференції до Дня науки. Житомир: «Житомирська політехніка», 2025.

7. Скорик М.А., Гнітецький О.М., Котенко В.В. Практичний досвід використання GNSS-приймача Matrix II з IMU і технологію SMART Laser RTK для маркшейдерських робіт // Тези Всеукраїнської науково-практичної конференції до Дня науки. Житомир: «Житомирська політехніка», 2025.

8. Янович О.А., Левицький В.Г. Підвищення точності маркшейдерського забезпечення гірничих робіт шляхом застосування RTK-технологій в безпілотних літальних апаратах // Тези Всеукраїнської науково-практичної конференції до Дня науки. Житомир: «Житомирська політехніка», 2025.

УДК 699.85

Забродська А.М., студентка 3-го курсу, гр. ПЦБ-3
Науковий керівник: Піскун І.А., доктор філософії
Кафедра гірничих технологій та будівництва ім. проф. Бакка М.Т.
Державний університет «Житомирська політехніка»

РІЗНОВИДИ БОМБОСХОВИЩ ТА УКРИТТІВ

На сучасному етапі потреба у спорудженні захисних укриттів, здатних забезпечувати належний рівень безпеки за умов впливу загроз високої інтенсивності, набуває особливої актуальності та критичного значення. Передусім доцільно окреслити основні типи таких загроз, зокрема ті, що пов'язані із застосуванням зброї масового ураження. У міжнародній термінології для їх позначення використовується абревіатура **ABC**, що охоплює **атомну, біологічну та хімічну зброю** (*atomic, biological and chemical weapons*):

1. Хімічні загрози. Можуть бути спричинені як зумисним застосуванням хімічної зброї попри заборони прийняті ще після Першої світової війни (Версальським договором 1919 року), так і аваріями на хімічних виробництвах або при транспортуванні небезпечних речовин.

2. Застосування біологічної зброї. Способи розповсюдження біологічної зброї можуть бути аналогічними хімічній. Під час бойових дій збудники хвороб можуть поширюватись спеціальними боєприпасами, що містять спори хвороботворних організмів. Під час вибуху вони розлітаються, заражаючи людей [1]. Принципова відмінність від хімічної зброї – розповсюдження (зараження) не тільки у місці застосування – наслідки її використання здатні поширюватись, передаючись від людини до людини, спричиняючи епідемії.

3. Застосування ядерної зброї і аварії на АЕС – поширюють 2 види загроз: наслідки самого вибуху – ударної хвилі, випромінення тепла; поширення радіації на великі відстані. У першому випадку принципіальним питанням є відстань від епіцентру та сила самого вибуху, у другому – тип і кількість радіаційного випромінення [2].

Також не варто виключати і стандартну зброю: ракети різних типів, баражуючі боєприпаси, боєприпаси ракетних систем залпового вогню та артилерійських снарядів [3] та наслідки їх дії.

Незалежно від прийнятих конвенцій, часто заборонена зброя застосовується або країнами, що ці договори не підписували, або тими, що підписали, але не виконують забов'язання. Далі подібні випадки доводиться розслідувати, як зазначається у Global Investigate Journalism Network у статті під назвою «Розслідування воєнних злочинів: Заборонені та обмежені у використанні види зброї» [4].

На даний момент на території України застосовувалися в основному типи зброї, наведені в «Довіднику-каталозі основних зразків озброєння та військової техніки, які застосовувалися протиборчими сторонами під час відсічі широкомасштабного вторгнення рф в Україну»[5], до цього списку можна також додати використання ракет середньої дальності, які здатні транспортувати ядерні боєголовки [6]. Попри те, що застосування зброї масового ураження вважають малоймовірним, це не означає, що такої ймовірності взагалі немає зараз або у найближчому майбутньому [7]. Отже, в умовах непередбачуваності щодо застосування різних видів зброї необхідно діяти з розрахунками на гірший варіант розвитку подій задля безпеки населення. Проте наразі початок будівництва такого складного проєкту як декілька рядів високотехнологічних бомбосховищ у масштабах всієї країни одночасно може бути занадто ресурсозатратним, тому варто підійти до цього питання комплексно, розглянувши всі варіанти, потреби і можливості за різних ситуацій.

Існують різні варіанти розподілу укриттів на типи, ось 1 з них:

- бомбосховище, яке захищає безпосередньо від наслідків ударної хвилі вибухів, викликаних бомбардувальниками (та будь-якими іншими носіями) або вибухами на небезпечних виробництвах, таких як нафто- і газопереробних заводах, нафтохімічних заводах або на інших потенційно небезпечних об'єктах, а також від наслідків землетрусів [8];

- сховище, що захищає від дії зброї масового ураження – зазвичай суміщується з бомбосховищем з додаванням обладнання для підтримання нормальних умов для перебування там людей протягом необхідного проміжку часу, щоб дочекатись закінчення атаки і дії небезпечних факторів.

Сховища другого типу мають бути герметичним для створення «чистої» (вільної від токсичних речовин) зони всередині. Сховища, що захищають від дії зброї масового ураження повинні забезпечуватись системами подання повітря для дихання та підтримання всередині потрібного рівня тиску. Це слугує бір'єром для запобігання потрапляння забрудненого повітря в сховище через невеликі отвори у стінах конструкції [8].

В межах цієї категорії можна виділити ще декілька підтипів:

- сховища, що захищають від дії хімічної і біологічної зброї. Вони можуть розташовуватись як під землею і бути дуже подібними до сховищ від АВС або ж знаходитись на поверхні, як наприклад M8E1 CBPS, що забезпечує чистий, контрольований навколишнім середовищем простір, в якому розгорнуті медичні підрозділи і хірургічні бригади можуть лікувати поранених в зоні, зараженій хімічною або біологічною зброєю, без необхідності носити громіздкий захисний одяг і обладнання. Ця система CBPS інтегрована з тактичним транспортним засобом для живлення елементів управління системи і полегшення її швидкого розгортання [9].

- сховище, що захищає від радіації і радіоактивного пилу у випадку ядерного вибуху, багато таких сховищ були побудовані в часи Холодної війни для захисту людей у випадку ядерної війни [8]. Інформація стосовно норм будівництва захисних споруд міститься ряді нормативних документів таких як ДБН В.2.2-5:2023 «Захисні споруди цивільного захисту».

- укриття для екстремальних умов, прикладом яких є Cheyenne Mountain Complex (США). Він розташовується на глибині 610 метрів під шаром граніту. Внутрішній простір складає 18210 кв. метрів. Комплекс оснащений противибуховими дверима вагою приблизно 25 тонн і розміром близько 3,5 метра у висоту і 1,2 метра в ширину, призначені для того, щоб витримати ядерний вибух потужністю 30 мегатонн [10] на відстані 1,9 км [11]. Двері працюють завдяки поршневій системі. У випадку, якщо вона вийде з ладу, є резервна копія з важелями, щоб вручну відкривати і закривати двері. Якщо ці дві системи за певної ситуації не будуть працювати – всередині першої з тунелів є невеликий люк. Вибухозахисні клапани спроектовані таким чином, щоб у випадку вибуху повітря всередині приміщень залишалось придатним для дихання – вони оснащені складними фільтрами і працюють у комбінації з дверима [12]. До комплексу входить 15 взаємопов'язаних будівель (13 триповерхових і 2 двоповерхових), чотири резервуари для води, здатні зберігати до 22712,5 м^3 і резервуар для зберігання дизельного палива ємністю 189,3 м^3. Усі будівлі оснащені низкою масивних пружин, кожна вагою 1000 фунтів (450 кг), призначених для захисту конструкцій та їх вмісту від ударної хвилі ядерних вибухів і землетрусів. Наявна власна електростанція і водопостачання [10].

Як наслідок, основними умовами для сховищ від хімічної і біологічної зброї є: герметичні шлюзи на входи, система дезинфекції, наявність фільтрів для очищення повітря від забруднень і максимальна ізоляція приміщень від зовнішнього середовища з дією негативних чинників.

На даний момент в Україні ведуться роботи над облаштуванням, побудовою і переорганізацією укриттів, і прогрес у порівнянні з попередніми роками є відчутним: протягом 2023 та 2024 років приведено до належного стану 7165 одиниць укриттів. На це витрачено понад 9 млрд гривень [13]. Ведеться моніторинг за станом приміщень і запроваджується адміністративна та кримінальна відповідальності за порушення вимог утримання та експлуатації об'єктів фонду захисних споруд та посилюється відповідальності за порушення вимог пожежної та техногенної безпеки [14]. 30.01.2025 на обліку знаходилось понад 62 400 захисних споруд, стан їхньої готовності на рівні близько 85% [15].

Тож, Україна досягла значного прогресу в облаштуванні та підготовці укриттів для захисту населення, хоча проблема їхньої якості та відповідності нормам залишається актуальною.

Проте варто зазначити, що після завершення війни частина укриттів і бомбосховищ, які не мали спочатку подвійного призначення, перестануть на постійній основі виконувати свої функції як безпосередньо під час бойових дій, тому можна розглянути варіант переобладнання та інтеграції їх внутрішнього простору на потреби мирного часу. Після війн у багатьох державах залишилось багато прикладів такого переобладнання, які можуть допомогти робити схожі кроки і в Україні:

1. Regan West – підземний бункер, що був побудований в період «холодної війни» в 1963-1968 роках за наполяганням НАТО. Він мав вмістити уряд Данії у разі ядерної війни і знаходився майже в 400 кілометрах від Копенгагена на глибині 60 метрів під крейдяним пагорбом. 13 лютого 2023 року його вперше відкрили для іноземних туристів як музей. Тепер у всіх бажаючих буде можливість пройтися по довгих коридорах бункера, побачити спальню, призначену для монарха, залу нарад уряду, декор в стилі 1960-х років і перекусити в місцевому кафе. Структура бункера збережена в первозданному вигляді [16].

2. Bunker des Lumières – старий бункер у Південній Кореї, який колись був державним ключовим комунікаційним об'єктом, був відроджений як Bunker des Lumières після того, як був проданий приватній групі в 2012 році. Це захоплюючий проект медіа-мистецтва, заснований на концепції регенерації мистецтва, яка об'єднує мистецтво, технології та музика. Шедеври всесвітньо відомих митців, таких як Густав Клімт і Вінсент Ван Гог, представлені за допомогою технології проекційного відображення як нового способу насолодитися мистецтвом [17].

3. Zero Carbon Farm (London) – ця ферма розташувалась у раніше занедбаному бомбосховищі часів Другої світової війни, розташованому на глибині 33 метрів під вулицею Клепхем. У зародковому стані тунелі були спроектовані як короткочасні протиповітряні укриття з довгостроковою перспективою перетворення на експрес-поперечину «Північ-Південь». Цього не сталося, натомість тунелі перетворилися зі сховищ від повітряних нальотів на те, щоб у них жили, перш ніж використовувати їх як складські приміщення, і згодом вони стали домом для ферми. Тут вирощується зелень, яка потім продається багатьом великим роздрібним торговцям Великобританії, зокрема M&S, Waitrose, Tesco та Whole Foods Market. Вони також постачають свою продукцію до кафе і ресторанів по всьому Лондону [18].

4. The Bunker, Великобританія – у 1982 році будівлю спроєктував Луїс Кунг, аби відкрити там головний офіс власної компанії Westland Oil. Проте паралельно з будівництвом офісного приміщення він побудував ядерне бомбосховище площею понад 3,5 тисячі квадратних метрів. Бункер вміщував майже 400 людей та міг працювати автономно три місяці за рахунок власних дизельгенераторів. Також сховище мало систему фільтрації повітря, тюремні камери, колодязі та навіть кабінет для проведення операцій. Тунельні блок-хауси на вході таємно вміщували в собі численні гарматні порти. Комплекс зовні захищений п'ятишаровим броньованим склом та

іншими елементами безпеки. В наш час – це підземний кампус ЦОД з додатковою чотириповерховою будівлею. Територія цілодобово охороняється службою безпеки: колишніми військовими та поліціянтами, а також інфрачервоними камерами та захистом від електромагнітних імпульсів [19].

Наразі є неможливим ігнорування небезпеки, яка існує на території України внаслідок війни, тому існує потреба у засобах захисту, якими є бомбосховища (укриття). Залежно від умов у кожному регіоні, кожній області, необхідно обирати, які саме способи вирішення питання безпеки є можливими для реалізації і докладати зусиль для того, щоб ці рішення якомога краще виконували поставлені завдання – могли захищати як від дії звичайної зброї, так і зброї масового ураження, і виконували умови усіх наявних нормативних документів з цього питання.

Список використаних джерел:

1. Центр громадського здоров'я України. "Біологічна загроза. Загальна інформація." Центр громадського здоров'я України, https://phc.org.ua/reaguvannya-na-nadzvichayni-situacii/monitoring-nadzvichaynikh-situaciy/biologichna-nadzvichayna-situaciya/biologichna-zagroza.-zagalna-informaciya. Accessed 6 Feb. 2025.
2. "Загрози та принципи захисту – захисні споруди цивільного захисту." ПРО ЗАХИСТ, https://www.prozahyst.com/?p=185.
3. "ДБН В.2.2-5:2023. Захисні споруди цивільного захисту." Міністерство розвитку громад, територій та інфраструктури України, 2023, https://e-construction.gov.ua/laws_detail/3225773063500990463?doc_type=2.
4. "Розслідування воєнних злочинів: Заборонені та обмежені у використанні види зброї". Global Investigative Journalism Network, gijn.org/ua/resurs-ua/rozsliduvanna-voennih-zlociniv-zaboroneni-ta-obmezeni-u-vikoristanni-vidi-zbroi. Останній перегляд 6 лют. 2025.
5. Міністерство оборони України, Генеральний штаб Збройних Сил України, Центр досліджень воєнної історії ЗСУ. Зброя російсько-української війни 2022–2023 років: Довідник-каталог. 2023.
6. "Орешник чи РС-26 Рубеж. Що відомо про ракету, яку Росія випустила по Україні - BBC News Україна". BBC News Україна, www.bbc.com/ukrainian/articles/cx27wl31l7xo. Останній перегляд 6 лют. 2025.
7. "Ядерне стримування по-новому: чи веде воно до ядерної війни між Росією та НАТО - BBC News Україна". BBC News Україна, www.bbc.com/ukrainian/articles/cevv952q15jo. Останній перегляд 6 лют. 2025.
8. "Atmas: Types of Civil Defense Shelters". Atmas, www.atmas-tech.com/articles/types-civil-defense-shelters. Останній перегляд 6 лют. 2025.
9. "USAMRDC: Specially configured Chemical Biological Protective Shelter enhances USAMRICD training capabilities". USAMRDC: U.S. Army Medical Research & Development Command, mrdc.health.mil/index.cfm/media/articles/2021/chemical_biological_protective_shelter_enhances_USAMRICD_training. Останній перегляд 6 лют. 2025.
10. "Inside America's Fortress Protected by Massive Steel Doors – Cheyenne Mountain". YouTube, завантажено: USA Military Channel, 28 лип. 2024, www.youtube.com/watch?v=cM333Ty-30Y
11. "The Underground City Inside of Colorado's 9,570-foot Cheyenne Mountain | OutThere Colorado". OutThere Colorado, www.outtherecolorado.com/features/the-underground-city-inside-of-colorado-s-9-570-foot-cheyenne-mountain/article_ce093a04-5892-50c5-8570-d4a079cb8ebf.html. Останній перегляд 6 лют. 2025.
12. Terdiman, Daniel. "America's Fortress: Cheyenne Mountain, NORAD live on". CNET, 27 черв. 2009, web.archive.org/web/20180421035431/www.cnet.com/news/americas-fortress-cheyenne-mountain-norad-live-on.
13. "Міністерство з питань стратегічних галузей промисловості України - Приведення укриттів до належного стану: підсумки роботи Мінстратегпрому за перший квартал 2024 року". Головна | Міністерство з питань стратегічних галузей промисловості України, mspu.gov.ua/news/pryvedennia-ukryttiv-do-nalezhnoho-stanu-pidsumky-roboty-minstratehpromu-za-pershyi-kvartal-2024-roku?utm_source. Останній перегляд 6 лют. 2025.
14. Verkhovna Rada of Ukraine. "Парламент підтримав важливу ініціативу." Офіційний вебпортал Верховної Ради України, 6 лютого 2024, https://www.rada.gov.ua/news/razom/257500.html. Accessed 6 Feb. 2025.
15. Ukrinform. "Захисні споруди в Україні наразі готові майже на 85% - ДСНС". Укрінформ - актуальні новини України та світу, 30 січ. 2025, www.ukrinform.ua/rubric-society/3954589-zahisni-sporudi-v-ukraini-narazi-gotovi-majze-na-85-dsns.html?utm_source.
16. "У Данії для туристів відкрили знаменитий ядерний бункер часів "холодної війни"". Новини України - останні новини України сьогодні - УНІАН, www.unian.ua/tourism/news/yaderniy-bunker-v-daniji-yak-potrapiti-v-muzey-holodnoji-viyni-regan-west-12143805.html. Останній перегляд 6 лют. 2025.
17. Korea Tourism Organization. "Hanbok: Traditional Korean Clothing." Visit Korea, https://english.visitkorea.or.kr/svc/contents/contentsView.do?vcontsId=113152. Accessed 6 Feb. 2025.
18. Zero Carbon Farms. "Our Clapham Farm." Zero Carbon Farms, https://zerocarbonfarms.co.uk/clapham-farm/. Accessed 6 Feb. 2025.
19. "Дата-центри на місці ядерних бункерів та військових баз. Досвід Британії, США та Ізраїля, корисний для України". MC.today, Media for Creators, mc.today/uk/blogs/spadok-vijny-data-tsentry-na-mistsi-bunkeriv-ta-vijskovyh-baz/?utm_source. Останній перегляд 6 лют. 2025.

УДК 622.684:004.94

Захарчук В.О., студент 3-го курсу, гр. РР-53
Державний університет «Житомирська політехніка»

ВПРОВАДЖЕННЯ АВТОМАТИЗОВАНИХ СИСТЕМ ДИСТАНЦІЙНОГО МОНІТОРИНГУ ТА КЕРУВАННЯ КАР'ЄРНИМ АВТОТРАНСПОРТОМ

Розвиток відкритого способу видобутку корисних копалин супроводжується постійним збільшенням обсягів гірничих робіт, ускладненням транспортної інфраструктури кар'єрів та зростанням вимог до ефективності виробничих процесів. За таких умов кар'єрний автотранспорт виступає не лише засобом переміщення гірничої маси, а й одним із визначальних факторів продуктивності всього підприємства. Значна частка експлуатаційних витрат у структурі собівартості видобутку пов'язана саме з транспортними операціями, тому питання підвищення ефективності їх організації набуває особливої актуальності.

Традиційні підходи до управління транспортними процесами здебільшого ґрунтуються на диспетчерському контролі та прийнятті рішень оператором у режимі реального часу. Проте зі збільшенням глибини кар'єрів, протяжності маршрутів і кількості техніки ефективність такого підходу поступово знижується. Крім того, значний вплив людського фактора може призводити до виникнення простоїв, порушення режимів експлуатації обладнання та зниження рівня виробничої безпеки.

Сучасний етап розвитку гірничодобувної галузі характеризується активним впровадженням цифрових технологій, орієнтованих на автоматизацію виробничих процесів та інтелектуальне управління технічними системами. У межах концепції Industry 4.0 дедалі більшого поширення набувають технології Industrial Internet of Things (IIoT), системи телеметрії, супутникової навігації, хмарні платформи обробки даних та алгоритми штучного інтелекту. Їх інтеграція створює передумови для переходу від традиційного контролю до комплексного дистанційного моніторингу стану транспортних засобів і прогнозного управління їх роботою.

Метою дослідження є аналіз сучасних підходів до впровадження автоматизованих систем дистанційного моніторингу та керування кар'єрним автотранспортом, а також визначення основних переваг, обмежень та перспектив їх застосування в умовах цифровізації гірничого виробництва.

Результати аналізу сучасних досліджень свідчать, що цифрові системи моніторингу функціонують на основі безперервного збору та обробки інформації про роботу транспортних засобів. Для цього використовуються навігаційні модулі GPS, датчики контролю палива, системи діагностики двигуна, сенсори навантаження, засоби геолокації та телеметричні комплекси [1]. Отримані дані передаються до диспетчерських або хмарних платформ, де здійснюється їх аналіз і формування управлінських рішень.

Застосування систем дистанційного моніторингу дозволяє не лише відстежувати місцезнаходження техніки, а й контролювати режими її експлуатації, оцінювати технічний стан обладнання та виявляти потенційні відхилення від нормального режиму роботи. Особливої актуальності набуває використання предиктивних підходів, коли аналіз накопичених даних дає можливість прогнозувати можливі відмови обладнання ще до їх фактичного виникнення. Такий підхід сприяє зменшенню незапланованих простоїв і більш ефективному плануванню технічного обслуговування.

Одним із найбільш динамічних напрямів розвитку транспортних систем відкритих гірничих робіт є впровадження Autonomous Haulage Systems – автономних систем транспортування. Згідно з результатами сучасних досліджень, використання безпілотних кар'єрних самоскидів дозволяє значною мірою мінімізувати ризики, пов'язані з людським фактором, а також забезпечити більш стабільний режим роботи транспортного комплексу. Подібні системи поєднують засоби супутникової навігації, комп'ютерного бачення, LiDAR-системи, алгоритми штучного інтелекту та центри дистанційного управління [2].

Практичний досвід впровадження автономних транспортних рішень свідчить про їх позитивний вплив на показники роботи гірничих підприємств. Зокрема, відзначається скорочення витрат палива, зменшення часу простоїв техніки, підвищення продуктивності транспортних операцій та покращення показників виробничої безпеки. Водночас ефективність таких систем значною мірою залежить від якості цифрової інфраструктури, стабільності каналів зв'язку та рівня інтеграції інформаційних платформ.

Попри очевидні переваги, широке впровадження автоматизованих систем дистанційного керування супроводжується рядом обмежень. До основних стримувальних факторів належать значні капітальні витрати на модернізацію техніки, необхідність створення спеціалізованої комунікаційної інфраструктури та складність інтеграції різнорідних програмно-апаратних комплексів. Окремої уваги потребують питання кібербезпеки, оскільки зростання рівня цифровізації обумовлює збільшення потенційних ризиків несанкціонованого втручання у функціонування виробничих систем [3].

Таким чином, впровадження автоматизованих систем дистанційного моніторингу та керування кар'єрним автотранспортом слід розглядати як один із ключових напрямів цифрової трансформації гірничодобувної галузі. Їх застосування сприяє підвищенню ефективності використання транспортних ресурсів, оптимізації виробничих процесів та покращенню умов безпеки праці. Подальші дослідження доцільно спрямувати на розвиток інтелектуальних алгоритмів управління, інтеграцію цифрових двійників та застосування технологій штучного інтелекту для створення повністю автономних транспортних систем.

Список використаних джерел:

1. Gaber T., El Jazouli Y., Eldesouky E., Ali A. Autonomous haulage systems in the mining industry: cybersecurity, communication and safety issues and challenges. Electronics. 2021.
2. Ishimoto H., Hamada T. Safety concept and architecture for autonomous haulage system in mining. ISARC. 2020.
3. Price R. Autonomous haulage systems – the business case. AusIMM Bulletin. 2017.

УДК 622.7:621.928

Ігнатюк Р.М., аспірант
Шамрай В.І., к.т.н., доц.
Державний університет «Житомирська політехніка»

УДОСКОНАЛЕННЯ ПРОЦЕСІВ КЛАСИФІКАЦІЇ ДРІБНОДИСПЕРСНИХ ФРАКЦІЙ У ТЕХНОЛОГІЧНИХ ЛІНІЯХ ВИРОБНИЦТВА ЩЕБЕНЮ

Виробництво щебеневої продукції є одним із ключових напрямів переробки нерудної мінеральної сировини, від ефективності якого значною мірою залежить забезпечення потреб будівельної галузі якісними матеріалами. У сучасних умовах підвищення вимог до фізико-механічних характеристик будівельних матеріалів особливої уваги набуває забезпечення стабільного гранулометричного складу щебеневої продукції. Одним із визначальних факторів, що впливають на якість кінцевого продукту, є ефективність процесів класифікації матеріалу, зокрема дрібнодисперсних фракцій.

Під час дроблення гірських порід поряд із основними фракціями неминуче утворюється значна кількість тонкодисперсного матеріалу. Його обсяг та властивості залежать від фізико-механічних характеристик породи, типу дробильного обладнання та режимів його роботи. Особливо інтенсивне утворення дрібних частинок характерне для переробки міцних магматичних порід, зокрема гранітів, габро та лабрадоритів. Наявність надлишкової кількості таких частинок здатна негативно впливати не лише на якість готової продукції, але й на ефективність функціонування всієї технологічної лінії [1].

Традиційно процес розділення матеріалу за крупністю здійснюється за допомогою грохочення. Проте практика експлуатації показує, що зі зменшенням розміру частинок ефективність такого розділення поступово знижується. Це пояснюється низкою факторів, серед яких суттєву роль відіграють схильність дрібнодисперсного матеріалу до злипання, вплив вологості, забивання сит та нерівномірність подачі матеріалу. У результаті виникає зниження точності класифікації, погіршення якості сортування та збільшення втрат корисного продукту.

Метою дослідження є аналіз сучасних підходів до вдосконалення процесів класифікації дрібнодисперсних фракцій у технологічних схемах виробництва щебеню та визначення перспективних напрямів підвищення їх ефективності.

Аналіз результатів сучасних досліджень свідчить, що одним із найбільш перспективних напрямів удосконалення процесів класифікації є використання комбінованих технологічних рішень, які поєднують традиційні механічні методи з пневматичними або повітряними способами розділення [2]. Такий підхід дозволяє більш ефективно відокремлювати тонкодисперсні частинки та зменшувати навантаження на основне сортувальне обладнання.

Значний практичний інтерес становить застосування повітряних класифікаторів, принцип роботи яких базується на відмінностях аеродинамічних характеристик частинок. На відміну від традиційних схем сортування, такі системи забезпечують більш гнучке регулювання процесу розділення шляхом зміни швидкості повітряного потоку та режимів подачі матеріалу. Це створює можливість отримання більш стабільного гранулометричного складу продукції та зниження вмісту надлишкових дрібних фракцій.

Поряд із удосконаленням конструктивних рішень обладнання важливого значення набуває впровадження цифрових технологій у процеси контролю та керування технологічними лініями. Використання систем автоматизованого моніторингу, датчиків контролю параметрів матеріалу та засобів оперативної обробки даних дозволяє забезпечити більш точне керування процесом класифікації. Крім того, застосування інтелектуальних алгоритмів аналізу створює можливість оперативного реагування на зміну характеристик сировини та підтримання стабільних режимів роботи обладнання.

Окремим напрямом розвитку сучасних технологій є використання математичного моделювання та цифрових моделей виробничих процесів. Їх застосування дозволяє прогнозувати поведінку матеріалу в процесі сортування та оцінювати вплив технологічних параметрів на ефективність класифікації ще на етапі проєктування виробничих схем. Це створює передумови для більш раціонального вибору обладнання та зменшення експлуатаційних витрат.

Разом із тим впровадження сучасних рішень потребує врахування ряду технічних та економічних факторів. До основних обмежень належать необхідність модернізації діючих виробничих ліній, значні капітальні витрати та потреба адаптації обладнання до властивостей конкретної сировини.

Таким чином, удосконалення процесів класифікації дрібнодисперсних фракцій є важливим завданням підвищення ефективності виробництва щебеневої продукції. Поєднання сучасних технологічних рішень, автоматизованих систем керування та методів цифрового аналізу відкриває можливості для підвищення якості продукції, скорочення втрат матеріалу та забезпечення стабільності функціонування технологічних ліній. Подальші дослідження доцільно спрямувати на розроблення адаптивних систем керування процесами класифікації з урахуванням змінних характеристик вихідної сировини.

Список використаних джерел:

1. Shamrai V., Korobiichuk V., Leonets I., Melnyk-Shamrai V., Naumov Y. Development of Geopolymer Concrete Formulations Based on Activated Stone Processing Sludge to Reduce Natural Resource Consumption. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2025. Vol. 5. No. 6 (137). P. 41-48. doi:10.15587/1729-4061.2025.341720

2. Коробійчук В.В., Леонець І.В., Шамрай В.І., Мельник-Шамрай В.В., Криворучко А.О. Шлам каменеобробних підприємств: перспективи використання як домішки в керамічній промисловості. Технічна інженерія. 2025. Вип. 1 (95). С. 138-144.

УДК 69.059.2:620.17

Карабінський В.В., студент 4 курсу, група ПЦБ-2к, ФГСПБ
Байда Д.М., к.т.н.
Державний університет «Житомирська політехніка»

ДОСЛІДЖЕННЯ МІЦНОСТІ БЕТОНУ ТА ДЕФЕКТІВ ВИГОТОВЛЕННЯ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ МОНОЛІТНИХ КОНСТРУКЦІЙ ЧАШІ БАСЕЙНУ ГІМНАЗІЇ НА ВІДІБРАНИХ ЗРАЗКАХ-КЕРНАХ

В даній роботі розглядається практичний випадок дослідження параметрів конструкцій на зразках кернах у відповідності до вимог [1]. Даний приклад показує, що бувають випадки коли єдиним можливим способом достовірного встановлення таких параметрів конструкцій як міцності бетону, розмірів та складу елементів конструкції, армування може бути тільки застосування руйнівного методу завдяки вибурюванню зразків-кернів.

За інформацією від Замовника роботи під час будівництва конструкції чашу басейну були допущені суттєві відхилення від вимог проекту. Тому *метою роботи* було визначення міцності бетону та, за можливості, оцінювання армування в досліджуваних місцях залізобетонних монолітних конструкцій чаші басейну гімназії.

Для досягнення поставленої мети було передбачено:

- відбір зразків-кернів методом вибурювання з монолітних конструкцій чаші басейну;
- огляд та фотофіксація кернів з визначенням розмірів та положення арматури;
- випробування бетонних зразків-циліндрів на стиск;.
- аналіз та узагальнення отриманих результатів;
- оформлення звітної документації.

Методи виконання робіт – лабораторні методи випробувань, узагальнення та аналіз результатів досліджень.

Було прийнято рішення відібрати 6 кернів – по 3 керна з різних ділянок елементів стін та днища чаші басейну. Вибурювання кернів виконували свердлінням наскрізь на всю товщину елемента конструкції чаші басейну. Таким чином довжина свердління необхідних кернів була прийнята 30…35 см, що дозволяє визначити товщину елемента конструкції, наявність гідроізоляції та забезпечує можливість виготовлення не менше 2-х дослідних зразків-циліндрів для руйнівного випробування міцності бетону в лабораторії.

Після вибурювання всі керни були промарковані по порядку відбору від БК1 до БК6 (рис. 1).

а)

б)

Рисунок 1 – Загальний вигляд бетонних кернів БК1…БК6, які вибурені з елементів чаші басейну:
а – вибурені з днища; *б* – вибурені з стінок

Подальші лабораторні дослідження та аналіз параметрів кернів дозволив отримати такі результати:

1) За результатами випробувань середня міцність бетону конструкцій чаші басейну коливається в межах 10,06…22,26 МПа, що значно менше нормативного значення середньої міцності бетону у відповідності до вимог таблиці 3.1 ДБН В.2.6-98:2009 [2] для проектного класу С20/25, що становить 32 МПа. У відсотках фактична міцність бетону відібраних кернів становить 31,4…69,6 % від нормативного значення середньої міцності для класу бетону С20/25. Таким чином фактична міцність бетону конструкцій чаші не відповідає вимогам проектної документації;

2) Статистичний аналіз результатів випробувань показав, що міцність бетону в конструкції чаші бетону характеризуються значною неоднорідністю, що перевищує допустимі значення. Зокрема, коефіцієнт варіації міцності бетону становить 31,2 % при максимально допустимому значенні 16 % (таблиця 2 ДСТУ Б В.2.7-224:2009 [3]). У такому випадку неможливо зробити висновок про клас бетону конструкції чаші басейну загалом без виключення із цієї конструкції дефектних ділянок, які мають значно меншу міцність.

За умови виключення дефектної ділянки в місці відбору керна БК3 орієнтовний клас бетону конструкції чаші басейну становить С8/10. Таким чином орієнтовне значення класу бетону в конструкції чаші басейну значно нижче (в 2,5 рази) проектного класу бетону С20/25;

3) Огляд та вимірювання бетонних кернів, що були відібрані з стінок чаші басейну, дозволили встановити, що вертикальні поверхні стінок в процесі будівництва були вирівняні шаром штукатурного розчину товщиною 35…75 мм. Це не відповідає рішенням проекту і не забезпечує необхідний рівень довговічності конструкцій в процесі експлуатації басейну. Додатково це свідчить про погану якість опалубочних робіт, через що бетонні поверхні стінок чаші басейну в процесі будівництва зазнали значних відхилень від вертикальності.

4) Огляд та вимірювання відібраних кернів дозволив встановити окремі параметри конструкцій та їх армування:

- товщина плити днища становить 28,3…29,5 см, а товщина стінок з врахуванням штукатурного шару – 28,0…29,0 см;
- конструкції чаші басейну армовані двома сітками з арматури діаметром 12 мм періодичного профілю класу А400С;
- захисний шар бетону плити днища чаші басейну суттєво відрізняється в різних місцях і становить для верхньої арматури від 85 до 140 мм, для нижньої арматури від 6 до 40 мм;
- захисний шар бетону для арматури стінок днища суттєво відрізняється в різних місцях і становить для верхньої арматури від 0 до 45 мм (за виключенням штукатурного шару), для нижньої арматури від 15 до 30 мм.

За результатами огляду керну БК6 (див. рис. 1) можна зробити висновок, що на окремих ділянках стінки захисний шар бетону фактично відсутній і арматура знаходиться в штукатурному вирівнюючому шарі. Штукатурний шар не забезпечує захист арматури від корозії, що візуально спостерігається за наявністю на ній поверхневої корозії.

Суттєве коливання значень захисного шару бетону свідчить про неякісне виконання будівельних робіт і відсутністю контролю якості їх ведення.

Висновок. Застосування руйнівного методу досліджень міцності бетону завдяки вибурюванню кернів дозволило комплексно і достовірно встановити необхідні параметри залізобетонної конструкції чаші басейну, яка була виготовлена із суттєвими відхиленнями від проекту. Визначений комплекс параметрів неможливо було встановити без застосування руйнівного методу. Таким чином на практиці можуть бути випадки коли застосування неруйнівних методів досліджень недоцільне та може призвести до суттєвих розбіжностей в оцінюванні фактичних параметрів конструкції.

Список використаних джерел:

1. ДСТУ Б В.2.7-223:2009. Бетони. Методи визначення міцності за зразками, відібраними з конструкцій. [Чинний від 22.12.2009 р.] Київ: Мінрегіонбуд України, 2010. 12 с.

2. ДБН В.2.6-98:2009. Бетонні та залізобетонні конструкції. Основі положення. [Чинний від 2011-07-01]. Київ: Мінрегіонбуд України, 2011. 73 с.

3. ДСТУ Б В.2.7-224:2009. Бетони. Правила контролю міцності. [Чинний від 2010-09-01]. Київ: Мінрегіонбуд України, 2010. 23 с.

УДК 622:502

Кириленко Н.П., к.т.н.
Державний університет «Житомирська політехніка»

ЦИФРОВІ ТЕХНОЛОГІЇ В РЕКУЛЬТИВАЦІЇ ВІДПРАЦЬОВАНИХ КАР'ЄРІВ: ВІД МОНОФУНКЦІОНАЛЬНОГО ВІДНОВЛЕННЯ ДО СЦЕНАРНОГО ВИКОРИСТАННЯ ТЕРИТОРІЙ

Відкрита розробка родовищ корисних копалин супроводжується формуванням значних площ територій, порушених гірничими роботами, які характеризуються деградацією ґрунтового покриву, порушенням гідрологічного режиму, змінами мікроклімату та зниженням біологічної продуктивності. Такі території становлять підвищену екологічну та техногенну небезпеку і потребують системного підходу до їх подальшого використання.

Традиційна практика рекультивації базується переважно на вирівнюванні рельєфу, засипанні виробленого простору відвальними породами та нанесенні родючого шару ґрунту з подальшим поверненням території до сільськогосподарського використання. Однак такий підхід є економічно затратним та енергомістким. Крім того, він ігнорує потенціал відпрацьованих кар'єрів як просторового ресурсу для альтернативного використання.

Водночас у гірничодобувній галузі активно впроваджуються технології Industry 4.0, зокрема автоматизація виробничих процесів, цифрові системи моніторингу техніки та управління безпекою. Однак сучасний етап розвитку галузі характеризується поступовим переходом до концепції Industry 5.0, яка передбачає поєднання цифровізації з принципами сталого розвитку, екологічної відповідальності та людиноцентричного управління. У цьому контексті особливого значення набуває поширення цифрових підходів на всі стадії життєвого циклу гірничих об'єктів, включаючи етап їх ліквідації та рекультивації.

Проте, незважаючи на ці тенденції, процеси рекультивації та управління територіями після завершення гірничих робіт залишаються одним із найменш цифровізованих сегментів галузі. Це зумовлює дефіцит об'єктивних, просторово та часово деталізованих даних, необхідних для прийняття обґрунтованих рішень щодо подальшого використання порушених земель.

Метою дослідження є обґрунтування підходу до цифровізації рекультивації відпрацьованих кар'єрів на основі інтеграції сенсорних технологій, дистанційного зондування (Remote Sensing, RS) та аналітичних моделей для визначення їх придатності до різних сценаріїв використання.

Аналіз сучасних досліджень показує, що основними інструментами оцінки стану порушених територій залишаються дистанційне зондування Землі та геоінформаційні системи [1–3]. Вони дозволяють оцінювати зміни рослинного покриву, деформації поверхні та трансформацію ландшафтів. Однак ці методи не забезпечують достатньої часової деталізації та не дозволяють відстежувати динаміку процесів у реальному часі [4, 5].

У зв'язку з цим перспективним є використання технологій Інтернету Речей (Internet of Things, IoT), які дозволяють організувати безперервний моніторинг параметрів стану території. До таких параметрів належать:

– геомеханічні характеристики (деформації, нахили бортів кар'єру, вібраційні процеси);
– гідрогеологічні показники (рівень підземних вод, водонаповнення кар'єру, дренажні процеси);
– фізико-хімічні властивості ґрунтів (pH, електропровідність, температура);
– параметри мікроклімату та якості повітря.

Інтеграція даних IoT із результатами супутникових спостережень та безпілотної аерофотозйомки забезпечує формування комплексної інформаційної бази для аналізу стану територій та створення цифрового двійника кар'єру, що дозволяє оцінювати поточний стан і прогнозувати можливі сценарії його подальшого використання.

Ключовим елементом такого підходу є формування інтегральної системи оцінки придатності території, яка враховує геомеханічні, гідрологічні, екологічні та соціально-економічні параметри. Це дозволяє перейти від інтуїтивних або нормативно обмежених рішень до кількісно обґрунтованого вибору напрямів використання.

На відміну від традиційного підходу, що передбачає уніфіковане відновлення територій, сучасна концепція рекультивації базується на диференційованому функціональному використанні відпрацьованих кар'єрів залежно від їх природно-техногенних характеристик (таб. 1).

Особливий інтерес становлять кар'єри будівельних корисних копалин (граніт, габро, лабрадорит), які характеризуються відносно низьким рівнем хімічного забруднення та чіткою геометрією. Це створює сприятливі умови для їх використання як рекреаційних об'єктів, техногенних водойм, територій для розвитку альтернативної енергетики, сільського господарства та туризму.

Запропонований підхід дозволяє відмовитися від повного засипання відпрацьованого простору та перейти до його раціонального використання як функціонального елементу антропогенного ландшафту.

Таблиця 1

Напрями використання відпрацьованих кар'єрів залежно від параметрів середовища

Напрям використання	Конкретні варіанти реалізації	Ключові параметри	Методи визначення
Рекреація та туризм	Екопарки, пляжі, зони відпочинку, дайвінг	Стабільність бортів, якість води, безпека, естетика	IoT-сенсори, UAV, GIS
Водні об'єкти (озера, аквакультура)	Озера, зариблення, рибні господарства	Хімічний склад води, глибина, температура, кисневий режим	Водні сенсори, дистанційний моніторинг
Відновлювана енергетика	Сонячні та вітрові електростанції	Інсоляція, вітровий режим, площа, затінення	GIS, метеосенсори
Агровикористання	Вирощування лохини, винограду, нішевих культур	pH ґрунту, вологість, мікроклімат, структура ґрунту	Ґрунтові сенсори, IoT
Екосистемне відновлення	Формування біотопів, заселення птахами та амфібіями	Біорізноманіття, гідрологічний режим, стабільність середовища	RS, екологічний моніторинг
Культурно-мистецьке використання	Амфітеатри, концертні майданчики	Геометрія кар'єру, акустика, стабільність укосів	3D-моделі, UAV, геомоніторинг
Екстрим та спортивна інфраструктура	Скеледроми, канатні парки, мото/вело-траси	Стійкість порід, геометрія схилів, безпека	Геомеханічний моніторинг, UAV
Лісогосподарське використання	Лісовідновлення, плантації швидкорослих культур	Вологість, склад ґрунтів, ерозійна стійкість	RS, GIS, польові вимірювання
Водорегулюючі функції	Акумулювання води, протипаводкові резервуари	Об'єм, водний баланс, інфільтрація	Гідросенсори, GIS
Промислове використання	Склади, логістичні об'єкти, технопарки	Геометрія, доступність, несуча здатність	GIS, геотехнічний аналіз
Інноваційні об'єкти	Дата-центри, підземні або заглиблені інфраструктури	Температурний режим, стабільність, енергозабезпечення	IoT, цифрові моделі
Освітньо-наукове використання	Геопарки, навчальні полігони	Геологічна будова, доступність, безпечність	GIS, польові дослідження

Разом із тим впровадження цифрових технологій у сфері рекультивації обмежується низкою факторів: відсутністю нормативних вимог щодо цифрового моніторингу, складністю інтеграції різнорідних даних, недостатнім рівнем цифрових компетенцій, та, найважливіше, обмеженим фінансуванням після завершення гірничих робіт. Для України ця проблема є особливо актуальною в умовах післявоєнного відновлення, коли значні площі порушених територій потребують швидкого та економічно обґрунтованого залучення до господарського використання.

Таким чином, цифровізація рекультивації відпрацьованих кар'єрів є перспективним напрямом розвитку гірничої галузі, що дозволяє забезпечити ефективне управління територіями, знизити екологічні ризики та створити нові можливості для економічного розвитку. Запропонований підхід може бути використаний як основа для створення цифрових систем підтримки прийняття рішень у сфері управління порушеними територіями. Подальші дослідження доцільно спрямувати на формування типових наборів сенсорів для різних типів кар'єрів, розробку методик класифікації територій за їх придатністю до різних видів використання, а також створення цифрових платформ підтримки прийняття рішень.

Список використаних джерел:

1. Wang J., Zhen J., Hu W., Chen S., Lizaga I., Zeraatpisheh M., Yang X. Remote sensing of soil degradation: Progress and perspective. International Soil and Water Conservation Research. 2023 – Т. 11, № 3 – с. 429–454.

2. Zhang B., Wu D., Zhang L., Jiao Q., Li Q. Application of hyperspectral remote sensing for environment monitoring in mining areas. Environmental Earth Sciences. 2012 – Т. 65, № 3 – с. 649–658.

3. Werner T.T., Bebbington A., Gregory G. Assessing impacts of mining: Recent contributions from GIS and remote sensing. The Extractive Industries and Society. 2019 – Т. 6, № 3 – с. 993–1012.

4. Song W., Song W., Gu H., Li F. Progress in the Remote Sensing Monitoring of the Ecological Environment in Mining Areas. International Journal of Environmental Research and Public Health. 2020 – Т. 17, № 6 – с. 1846.

5. McKenna P.B., Lechner A.M., Phinn S., Erskine P.D. Remote Sensing of Mine Site Rehabilitation for Ecological Outcomes: A Global Systematic Review. Remote Sensing. 2020 – Т. 12, № 21 – с. 3535.

УДК 528.4

Ковальов В.А., студент, ІІІ курс, група 31-З,
Геодезія та землеустрій
Науковий керівник: Кушнірук О.М., викладач
Відокремлений структурний підрозділ
Рівненський фаховий коледж Національного університету
природокористування і біоресурсів України

ЛАЗЕРНЕ СКАНУВАННЯ КАР'ЄРІВ І ШАХТ: СУЧАСНІ ПІДХОДИ, ПЕРЕВАГИ ТА ПРАКТИЧНЕ ЗАСТОСУВАННЯ

Сучасний розвиток гірничої промисловості вимагає впровадження високоточних, ефективних та безпечних методів отримання просторової інформації. Одним із найбільш інноваційних інструментів у цій сфері є лазерне сканування, яке активно застосовується для дослідження кар'єрів і шахт. Завдяки здатності швидко отримувати великі обсяги даних з високою точністю, ця технологія стала невід'ємною складовою геодезичного та маркшейдерського забезпечення гірничих робіт.

Лазерне сканування (LiDAR – Light Detection and Ranging) базується на принципі вимірювання відстані до об'єкта шляхом фіксації часу проходження лазерного імпульсу від випромінювача до поверхні та назад. У результаті формується так звана «хмара точок», яка відображає просторову структуру об'єкта або території. Такий підхід дозволяє створювати тривимірні моделі кар'єрів і підземних виробок із високим рівнем деталізації. Лазерне сканування дозволяє отримувати до мільйонів вимірювань за секунду, що значно перевищує можливості традиційних геодезичних методів[1]. Це робить технологію особливо ефективною для моніторингу змін рельєфу, об'ємів видобутку та контролю деформацій.

У відкритих гірничих розробках лазерне сканування застосовується для визначення геометричних параметрів кар'єру, розрахунку об'ємів гірничої маси, контролю бортів і уступів. Використання наземних лазерних сканерів дає змогу отримувати точні дані навіть у складних умовах рельєфу. Крім того, активно використовуються мобільні та аеролазерні системи, встановлені на безпілотних літальних апаратах. Аеролазерне сканування дозволяє оперативно охоплювати великі площі та отримувати дані про важкодоступні ділянки кар'єрів» [2]. Це особливо важливо при проведенні інвентаризації або плануванні гірничих робіт.

У підземних умовах (шахтах) лазерне сканування має ще більше значення, оскільки традиційні методи часто є небезпечними або малоефективними. Наземні сканери дозволяють швидко отримувати точну геометрію виробок, визначати їхній стан, виявляти деформації та оцінювати стабільність гірничих масивів. Застосування лазерного сканування в шахтах підвищує безпеку праці, оскільки зменшує необхідність перебування персоналу в небезпечних зонах [3]. Однією з ключових переваг лазерного сканування є висока точність отриманих даних. Похибка вимірювань може становити лише кілька міліметрів, що дозволяє використовувати результати для інженерних розрахунків і проектування. Крім того, технологія забезпечує швидкість виконання робіт, що значно скорочує час польових вимірювань.

Ще однією важливою перевагою є можливість створення цифрових моделей місцевості (ЦММ) та тривимірних моделей об'єктів. Такі моделі використовуються для аналізу, планування, візуалізації та прийняття управлінських рішень. Вони також можуть інтегруватися з геоінформаційними системами (ГІС), що значно розширює можливості обробки та аналізу даних. Інтеграція даних лазерного сканування з ГІС дозволяє створювати комплексні інформаційні системи управління гірничими підприємствами [4].

Однак, попри численні переваги, лазерне сканування має і певні недоліки. До них можна віднести високу вартість обладнання, необхідність спеціалізованого програмного забезпечення та високі вимоги до кваліфікації персоналу. Крім того, обробка великих обсягів даних потребує значних обчислювальних ресурсів.

У практиці гірничих підприємств лазерне сканування вже довело свою ефективність. Воно використовується для контролю об'ємів видобутку, моніторингу стану укосів, оцінки ризиків обвалів, а також для документування стану об'єктів. У поєднанні з іншими сучасними технологіями, такими як безпілотні літальні апарати та автоматизовані системи управління, лазерне сканування формує основу цифровізації гірничої галузі. Таким чином, лазерне сканування кар'єрів і шахт є перспективним напрямом розвитку геодезичних і маркшейдерських робіт.

Список використаних джерел:

1. Іванов І.І. Лазерне сканування в геодезії. Київ: Наукова думка, 2020.
2. Петренко П.П. Аеролазерні технології в гірничій справі. Львів: ЛНУ, 2021.
3. Сидоренко С.С. Маркшейдерські роботи в шахтах. Дніпро: НГУ, 2019.
4. Коваленко К.К. Геоінформаційні системи у гірництві. Харків: ХНУ, 2022.

УДК 622.271.3:622.68

Козаріз С.В., магістр
Науковий керівник: Луценко С.О., к.т.н., доц.
Криворізький національний університет

ОПТИМІЗАЦІЯ ПАРАМЕТРІВ КОМБІНОВАНИХ ТРАНСПОРТНИХ СИСТЕМ ПРИ ДИНАМІЧНОМУ ПОГЛИБЛЕННІ ВІДКРИТИХ ГІРНИЧИХ РОБІТ

З постійним збільшенням глибини залізорудних кар’єрів та обмеженістю їхнього робочого простору транспортні витрати стають визначальним чинником формування собівартості видобутку корисної копалини. Використання комбінованих транспортних систем із застосуванням внутрішньокар’єрних перевантажувальних пунктів (ВКПП) дозволяє суттєво підвищити ефективність транспортування. Проте динамічне поглиблення гірничих робіт неминуче призводить до просторового віддалення вибійних екскаваторів від стаціонарних або напівстаціонарних ВКПП, що зумовлює понаднормативне зростання відстані транспортування автомобілями та, як наслідок, зниження продуктивності видобувного комплексу.

Мета дослідження полягає в оптимізації відстані транспортування гірничої маси в глибоких кар'єрах шляхом обґрунтування раціонального місця розташування та етапного перенесення ВКПП узгоджено з динамікою розвитку гірничих робіт.

Стратегія ефективного використання комбінованого транспорту вимагає періодичного наближення перевантажувальних пунктів до активного фронту гірничих робіт. Процес етапного перенесення ВКПП пов'язаний із вирішенням двох взаємозалежних просторово-часових задач: вибором місця розташування майданчика та визначенням оптимального кроку перенесення (по глибині та в плані) [1, 3].

Місце розташування ВКПП має визначатися з урахуванням геометричних параметрів кар'єру, стійкості бортів та напрямку розвитку робочої зони. Найбільш раціональним є розміщення перевантажувальних вузлів на тимчасово неробочих бортах або у спеціально сформованих торцевих нішах, що мінімізує обсяги додаткового рознесення бортів і не блокує розвиток гірничих робіт на нижчих горизонтах.

Крок перенесення ВКПП є ключовим параметром оптимізації. Збільшення часу стояння перевантажувального пункту на одному горизонті мінімізує питомі капітальні витрати на його демонтаж, переміщення та спорудження нового майданчика. З іншого боку, це призводить до експоненціального зростання експлуатаційних витрат на автомобільний транспорт через збільшення відстані транспортування та висоти підйому гірничої маси.

Крок перенесення ВКПП є ключовим параметром оптимізації. Збільшення часу стояння ВКПП мінімізує питомі капітальні витрати на його переміщення, але експоненціально збільшує експлуатаційні витрати на автотранспорт. Оптимальний крок визначається на основі мінімізації сумарних приведених витрат [2]. Момент етапного перенесення настає тоді, коли додаткові експлуатаційні витрати на транспортування до існуючого ВКПП перевищують питомі витрати на його перенесення на новий, більш глибокий горизонт.

Комплексне врахування цих факторів дозволяє сформувати раціональний графік перенесення ВКПП, повністю синхронізований із загальною динамікою поглиблення кар'єру. Це запобігає дефіциту провізної здатності транспорту та підвищує загальну надійність системи «вибій – транспорт».

Етапне перенесення внутрішньокар’єрних перевантажувальних пунктів є дієвим інструментом управління транспортною системою глибокого кар'єру. Обґрунтування раціонального кроку перенесення, синхронізованого з режимом гірничих робіт й інтенсивністю формування активного робочого простору, дозволяє стабілізувати плече відкатки автотранспортом, уникнути різких стрибків експлуатаційних витрат та забезпечити економічно доцільну інтенсивність освоєння родовища.

Список використаних джерел:

1. Abbaspour, H., Drebenstedt, C., Paricheh, M., & Ritter, R. (2019). *Optimum location and relocation plan of semi-mobile in-pit crushing and conveying systems in open-pit mines by transportation problem.* International Journal of Mining, Reclamation and Environment, 33(5), 297-317. DOI: 10.1080/17480930.2018.1435968

2. Kamrani, A., Badiozamani, M. M., Pourrahimian, Y., & Askari-Nasab, H. (2024). *Evaluating the semi-mobile in-pit crusher option through a two-step mathematical model.* Resources Policy, 95, 105113. DOI: 10.1016/j.resourpol.2024.105113

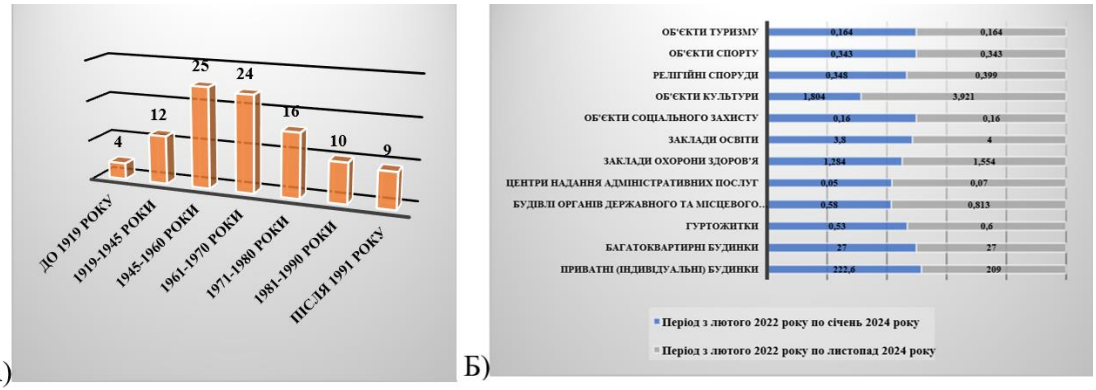
3. Paricheh, M., Osanloo, M., & Rahmanpour, M. (2017). *In-pit crusher location as a dynamic location problem.* Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 117(6), 599-607. DOI: 10.17159/2411-9717/2017/v117n6a11

УДК 624.04:69.059

Кузнєцов В. А., студент IV курсу, групи 6.1922-ПЦБ
кафедри промислового та цивільного будівництва
Науковий керівник: Мішук К.М., кандидат технічних наук, доц.,
доц. кафедри промислового та цивільного будівництва
Інженерний навчально-науковий інститут ім. Ю.М. Потебні
Запорізький національний університет

МЕТОДИ УСУНЕННЯ АВАРІЙНИХ ДЕФОРМАЦІЙ БУДІВЕЛЬ

У сучасних умовах розвитку будівельної галузі, проблема аварійних деформацій будівель набувала особливої актуальності, що напряму пов'язано з такими аспектами, як: експлуатація понад нормативні строки (Рис. 1, А) [1], що призводить до фізичного зносу конструкцій, втрати їх несучої здатності та виникнення небезпечних деформацій (осідань, тріщин, кренів тощо); будівництво в складних інженерно-геологічних умовах, що з часом можуть зазнавати змін (нерівномірні та просадні ґрунти, високий рівень ґрунтових вод, сейсмічність тощо); техногенний вплив (ущільнена забудова, нове будівництво поблизу існуючих споруд, підземні роботи); вплив активних бойових дій, за яких значна кількість будівель зазнає пошкоджень та/або руйнувань внаслідок вибухових та динамічних навантажень (Рис. 1, Б) [2; 3].



А) Б)

Рис. 1. А) Структура житлового фонду за роком будівництва, [%]; Б) Кількість пошкоджених та/або зруйнованих будівельних об'єктів, станом на січень 2024, та, станом на листопад 2024 року, [тис. шт]

У зв'язку з цим зростає потреба в дослідженні ефективних й обґрунтованих методів усунення аварійних деформацій, які дозволяють стабілізувати технічний стан будівель, підвищити несучу здатність і продовжити термін експлуатації їх конструкцій та мінімізувати витрати на демонтаж і нове будівництво.

Відповідно до Методики проведення обстеження та оформлення його результатів, аварійні пошкодження (деформації), які зазвичай виникають внаслідок порушення роботи системи «основа-фундамент-конструкція» – це втрата експлуатаційно придатного стану власне будівельного об'єкта або його складових, зокрема, порушення цілісності, герметичності, геометрії та інших параметрів внаслідок позапроєктних впливів, що були зумовлені надзвичайною ситуацією та/або бойовими діями [4].

Перед ліквідацією аварійного стану обов'язково проводиться технічне обстеження об'єктів з метою: надання оцінки технічного стану будівельних конструкцій, інженерних систем та об'єкта загалом (визначення категорії технічного стану об'єкта чи його частини, відповідно до ДСТУ 9273:2024), з використанням результатів візуального обстеження, проведення інструментальних досліджень та виконання перевірочних розрахунків; визначення обсягів, термінів невідкладних протиаварійних робіт або консервації; визначення виду та обсягів робіт з поточних, капітальних ремонтів об'єкта або його частин, реконструкції об'єкта або його частин, відновлення пошкодженого об'єкта або його частин; визначення обґрунтованої необхідності демонтажу об'єкта [4].

Оскільки причиною виникнення аварійних деформацій є порушення роботи системи «основа-фундамент-конструкція», то відповідно й методи будуть класифікуватися на 3 основні групи: усунення деформацій основи, усунення деформацій фундаментів, усунення деформацій будівельних конструкцій. Стислий огляд кожної групи наведено в Таблиці 1.

Таблиця 1. Характеристика методів усунення аварійних деформацій будівель

№ п/п	Група методів	Характеристика
1	2	3
1	Усунення деформацій основ [5]	Влаштування шпунтової огорожі для підвищення несучої здатності слабкого ґрунту; створення бокового привантаження для поліпшення опірності ґрунту впливу вертикальних навантажень; армування ґрунту; влаштування подушок (із піску чи місцевого зв'язного ґрунту); влаштування протифільтраційних завіс
		Ущільнення ґрунту: поверхневе (трамбівки та трамбувальні машини, котки, вібратори); глибинне (ґрунтові, шлакові, ґрунтоцементні чи вапняні палі; глибинне віброущільнення чи гідроущільнення вибухами); у вигляді попереднього обтиснення для пониження ґрунтових вод (улаштування водозниження, дренажі)
		Закачування в ґрунт ущільнюючого розчину: силікату натрію (одно- чи двокомпонентний), цементного, бітумного, різних смол тощо
		Пропускання постійного струму, який викликає хімічні реакції в ґрунті, що поліпшує його фізико-механічні характеристики
		Дія відкритого вогню на фізико-механічні властивості ґрунту
2	Усунення деформацій фундаментів [6]	Ін'єктування поліуретанових й епоксидних смол, цементних розчинів тощо в тріщини та пори бетону для поліпшення його механічних властивостей
		Стальні (металеві) конструкції для розподілення навантаження та запобігання подальшим деформаціям
		Залізобетонні та бетонні обойми для збільшення опорної площі фундаментів
		Перевлаштування одного типу фундаменту в інший для утворення єдиної жорсткої системи та перерозподілу навантажень на ґрунтову основу
		Підведення паль (буроін'єкційні, гвинтові, мікропалі) для передачі навантажень на нижчі шари ґрунту
3	Усунення деформацій надземних конструкцій [7]	Ін'єктування цементно-полімерних або полімерних розчинів на основі поліепоксиду для усунення тріщин ушкодженої кладки або бетонної конструкції
		Бетонні та залізобетонні обойм/сорочок для збільшення площі поперечного перерізу та покращення несучої здатності пошкоджених конструкцій
		Металеві обойми, кутники або тяжі для перерозподілу навантаження в конструкціях
		Нанесення шару високоміцного бетону під тиском на поверхню пошкодженої стіни (торкретування), для усунення тріщин та формування захисту від корозії
		Вуглецеві стрічки для підвищення міцності без суттєвого збільшення ваги конструкції
		Встановлення розпірок або підкосів для зменшення розрахункової довжини елементів
		Приварювання додаткових листів, кутників або швелерів до металевих балок і колон для збільшення перерізу конструкцій

Підсумовуючи, варто зазначити, що основні методи усунення аварійних деформацій будівель базуються на трьох ключових принципах: усунення причин деформацій (слабкі ґрунти, ґрунтові води, позапроєктні навантаження); підсилення та стабілізація фундаментів і основи; відновлення та підсилення надземних конструкцій будівлі. Комплексне застосування цих заходів дозволяє не лише усунути аварійні деформації (пошкодження), а й подовжити термін служби як власне будівлі, так і її конструкцій загалом.

Список використаних джерел:

1. Українська асоціація девелоперів. *Українська асоціація девелоперів* : веб-сайт. URL: https://www.ua-developers.com.ua/posts/energoefektivnist-budivel-v-ukrayini-85-zhitlovogo-fondu-potrebuie-modernizaciyi (дата звернення: 29.04.2026)

2. Київська школа економіки (KSE Institute). Звіт про прямі збитки інфраструктури від руйнувань внаслідок військової агресії Росії проти України станом на початок 2024 року [Електронний ресурс]. Київ, 2024. URL: https://kse.ua/wp-content/uploads/2024/04/01.01.24_Damages_Report.pdf

3. Київська школа економіки (KSE Institute). Звіт про збитки інфраструктури України внаслідок війни станом на листопад 2024 року [Електронний ресурс]. Київ, 2025. URL: https://kse.ua/wp-content/uploads/2025/02/KSE_Damages_Report-November-2024-UA.pdf

4. Про затвердження Методики проведення обстеження та оформлення його результатів : Наказ М-ва розвитку громад та територій від 06.08.2022 № 144. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0898-22#Text (дата звернення: 29.04.2026)

5. 2.2. Підсилення основ фундаментів. *StudFiles* : веб-сайт. URL: https://studfile.net/preview/11020119/page:21/ (дата звернення: 29.04.2026)

6. 5.3.Основні способи підсилення фундаментів і умови їх примінення. *StudFiles* : веб-сайт. URL: https://studfile.net/preview/9138189/page:10/ (дата звернення: 29.04.2026)

7. 2.4 Проектування ремонту і підсилення конструкцій Нижче наведено основні рекомендовані способи підсилення залізобетонних конструкцій. *StudFiles* : веб-сайт. URL: https://studfile.net/preview/3908518/page:6/ (дата звернення: 29.04.2026)

УДК 622.331:622.641

Кучерук М.О. аспірантка, І курс, група ГРдф-1, ННМІ
Національний університет водного господарства та природокористування

ДИНАМІКА ФІЗИКО-ХІМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТОРФУ В ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСАХ ВИДОБУТКУ ТА ЗНЕВОДНЕННЯ

Ефективність комплексної переробки торфу як багатокомпонентної органо-мінеральної сировини безпосередньо залежить від глибини розуміння динаміки його якісних показників, що формуються на етапах видобутку, первинної переробки та зневоднення. Торфові родовища, які займають близько 4,5% суходолу планети, являють собою унікальні природні утворення з надзвичайно складною стратиграфічною будовою [1]. В умовах України переважають низинні типи торфових покладів, які характеризуються високим ступенем розкладу та значним вмістом мінеральних компонентів. Зольність таких покладів зазвичай перебуває в межах 11 – 36%, що суттєво впливає на теплотворну здатність та хімічну стабільність кінцевих продуктів. Процес сушіння торфу в технологічному циклі видобутку слід розглядати не просто як видалення вологи, а як складний фізико-хімічний процес структурної перебудови, де закладаються ключові експлуатаційні характеристики сировини: об'ємна вага, механічна міцність, гідрофобність та пористість.

Лабораторні дослідження фізико-механічних властивостей торфу підтверджують, що він є складною дисперсною системою, де зміна вмісту вологи призводить до незворотних змін у структурі порового простору. Головним чинником, що визначає величину об'ємної ваги під час зневоднення, виступає динамічне співвідношення між рідкою та газоподібною фазами. При висушуванні торфу в так званому двофазному стані спостерігається стрімке зростання об'ємної ваги, що пов'язано з ущільненням твердого скелета під дією капілярних сил. Науковий аналіз показав, що режим сушіння (інтенсивність випаровування) має обмежений вплив на фінальну щільність повітряно-сухого торфу, проте критично впливає на внутрішню цілісність матеріалу. Важливою технологічною закономірністю є трансформація механічної міцності торфового куска. Встановлено, що в процесі видалення вологи міцність матеріалу зростає нелінійно, досягаючи свого піку при вологості в діапазоні $w = 20 \div 30\%$. Цей ефект пояснюється формуванням міцних водневих зв'язків та сил істинного зчеплення між високомолекулярними сполуками торфу, такими як гумінові речовини та лігнін. Однак пересушування матеріалу нижче позначки 20% призводить до зростання внутрішніх напружень, появи мікротріщин та подальшого зниження міцності, що робить його непридатним для тривалого транспортування та зберігання.

Окрему роль у формуванні міцності відіграє режим сушіння та температурний фактор. Експериментально доведено, що підвищення температури сушіння з 20°C до 60°C з метою інтенсифікації виробництва має негативні наслідки для якості продукції. Через виникнення значних градієнтів вологості між поверхневими та внутрішніми шарами торфового куска відбувається нерівномірна усадка, що провокує тріщиноутворення та знижує кінцеву міцність продукту більш ніж у тричі. Паралельно змінюються сорбційні властивості торфу. Втрата здатності до повного відновлення початкової вологості починається вже при досягненні вологості 55%, що свідчить про перебудову колоїдної структури, яка стає більш гідрофобною. Ця особливість важлива при використанні торфу як сорбенту або компонента органо-мінеральних добрив. Мінеральна складова торфу, представлена переважно сполуками кремнію, кальцію, заліза та алюмінію, відіграє роль своєрідного наповнювача в органічній матриці. Дослідження хімічного складу золи низинних торфів показали, що високий вміст кальцію (який у низинних покладах може вдесятеро перевищувати вміст у верхових) сприяє формуванню більш жорсткої, але крихкої структури. При комплексній переробці торфу на добрива чи паливні брикети надлишок певних мінеральних елементів може каталізувати або, навпаки, інгібувати процеси термічного розкладу чи мікробіологічної активації. Крім того, липкість торфу, яка має максимум у зоні межі пластичності, створює додаткові технологічні труднощі при формуванні та екструзії. Оптимізація тиску прилипання до робочих поверхонь обладнання (який для переробленого торфу становить 10–40 гс/см^2) дозволяє підвищити продуктивність пресового устаткування та покращити геометрію торфових гранул.

Висновки: Отже, параметри видобутку та переробки торфу мають базуватися на комплексному аналізі вологості, дисперсності та фізико-хімічного стану сировини. Для отримання якісної продукції з високою механічною стійкістю і заданими сорбційними властивостями доцільно застосовувати м'які режими сушіння до вологості не нижче 20 – 25%. Це забезпечує збереження структури торфу та ефективну подальшу переробку в енергетичні ресурси, меліоранти чи біологічно активні препарати.

Список використаних джерел:

1. Moshynskyi, V. S., Diallo, Mohamed Tafsir, Vasylchuk, O. Yu., $$ect.$$ Alternative directions of peat use. REnergy- and resource-saving technologies of developing the raw-material base of mining regions : multi-authored monograph / reviewers: Mihaela TODERAS, Khavalbolot KELGENBAI, Dimitar ANASTASOV. Petroșani, Romania : UNIVERSITAS Publishing, 2021. P. 32–46. URL: http://ep3.nuwm.edu.ua/20341/1/3%20Moshynskyi%20%281%29.pdf

УДК 622.02

Лазарук В.О., магістр
Трошина А.В., студентка, 3 курс
Науковий керівник: Фролов О.О., д.т.н., проф.
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

АНАЛІЗ СТАНУ КРІПЛЕННЯ В ПІДГОТОВЧИХ ВИРОБКАХ ШАХТ

Вугільна промисловість України є однією з базових галузей народного господарства, яка постачає свою продукцію для потреб електроенергетики, коксохімічного виробництва, населення, комунально-побутових споживачів тощо. Для нашої держави видобуток вугілля має важливе значення – його частка в загальному паливно-енергетичному балансі становить близько 25 % умовного палива [1].

Ефективність роботи вугільних шахт залежить від багатьох чинників, серед яких однією з найсуттєвіших є стан основних підготовчих гірничих виробок. Будучи транспортними магістралями, вони забезпечують безперервність і надійність роботи підземного комплексу шахти. Проблема забезпечення стійкості гірничих виробок набуває особливої актуальності зі збільшенням глибини розробки, оскільки при цьому зростає величина гірського тиску, що зумовлює значні деформації кріплення виробок.

Для забезпечення експлуатаційного стану гірничих виробок доводиться виконувати ремонтні роботи, що полягають у перекріпленні окремих ділянок або всієї виробки, заміні деформованих елементів кріплення, застосуванні тимчасового підсилювального кріплення, збільшенні щільності встановлення рам і заміні міжрамних огороджень, підриванні спучених порід ґрунту тощо. Фахівці зазначають, що протяжність перекріплюваних виробок досягає до 50 % відносно пройдених, а відремонтовані виробки у 1,7 рази перевищують протяжність знову проведених. Незважаючи на значні обсяги ремонтних робіт і їх високу трудомісткість, протяжність виробок з незадовільним станом залишається значною і становить 15…20 % від загальної довжини підтримуваних виробок [2].

Отже, проблема підтримання підготовчих виробок у стійкому стані протягом усього періоду їх експлуатації не лише залишається актуальною, а й набуває зростаючого характеру та потребує створення, промислового освоєння і впровадження ефективних способів охорони й підтримання, а також розроблення нових конструкцій кріплення підготовчих виробок.

Аналіз стану підготовчих виробок вугільних шахт України, а також витрат, пов’язаних з їх підтриманням і ремонтом, свідчить, що найбільші труднощі при підтриманні підготовчих виробок в експлуатаційному стані пов’язані з боротьбою зі спучуванням порід. Як показує практика, дослідження потребують, в першу чергу, підготовчі виробки, які зазнають впливу очисних робіт. Підтримання виробок у працездатному стані в зоні впливу очисних робіт є одним з найважливіших чинників, що визначають стабільну роботу видобувних дільниць [3].

Досвід роботи гірничих підприємств показує, що підтримання виробок у зоні впливу очисних робіт є досить складним, трудомістким і вартісним завданням. Поєднання великої кількості впливових чинників (кут нахилу пласта, шаруватість гірських порід, тип кріплення, порядок відпрацювання родовища тощо) визначає цілу низку труднощів, що пов’язані із забезпеченням стійкості виробок.

Визначальними серед інших є геомеханічні процеси, пов’язані з виїмкою пласта та подальшим обрушенням порід, що залягають у покрівлі (основній і безпосередній). Урахування цих чинників зумовило розроблення та впровадження різних типів кріплення, які відрізняються конструктивними особливостями, принципом роботи, характером взаємодії з навколишнім породним масивом тощо. Застосовувані кріплення в окремих випадках дають позитивний ефект, однак питання забезпечення стійкості виробок у зоні впливу очисних робіт не можна вважати остаточно вирішеним.

Аналізуючи стан підготовчих гірничих виробок, отриманих за результатами візуальних обстежень і інструментальних вимірювань, можна відзначити, що виробки перебувають у досить складних умовах експлуатації. Зокрема, великі глибини ведення робіт, слабкі вміщуючі породи, наявність розвиненої мережі дрібних тектонічних порушень і тектонічних зон негативно впливають на стан виробок.

Основними причинами втрати стійкості кріплення підготовчих гірничих виробок є:

- прогини верхняків (рис. 1);
- вигини стояків;
- розриви профілю верхняків і стояків (рис. 2);
- розриви з’єднувальних хомутів;
- нахил рам;
- руйнування затяжки;
- випадання шматків породи аж до утворення «сундуків» (рис. 3);
- чітко виражене спучування тощо.

Рис. 1. Деформація підготовчої виробки на етапі проведення

Рис. 2. Деформація кріплення в зоні опорного тиску перед очисним вибоєм

Рис. 3. Вивал породи

Отже, аналіз стану кріплення підготовчих виробок шахт показує, що їх підтримання у стійкому стані протягом усього періоду експлуатації потребує впровадження комплексних заходів, спрямованих на розробку як нових типів кріплення, так і на зміцнення геомеханічних властивостей породного масиву.

Список використаних джерел:

1. Красник В.Г. Програми перспективного розвитку вугільної промисловості України / В.Г. Красник // Вугілля України. – 2006. – № 12. – С. 6-8.

2. Закони і закономірності впливу гірського тиску на стійкість підготовчих виробок / Бондаренко В.І., Бузило В.І., Табаченко М.М. Медяник В.Ю. // Національний гірничий університет / Матеріали міжнародної конф-ції “Форум гірників–2009”, Дніпропетровськ: 30-03 жовтня 2009 р. – С. 54-63.

3. Терещук Р.М. Стійкість підготовчих виробок із нестійкою почвою у зоні впливу очисних робіт: монографія / Р.М. Терещук, С.П. Лозовський; МОН України; Нац. гірн. ун-т. – Д.: НГУ, 2014. – 104 с.

УДК 622.271

Лебеденко В.В., аспірант
Пилипчук Д.І., аспірант
Науковий керівник: Григор'єв Ю.І., к.т.н., доц.
Криворізький національний університет

МЕТОДОЛОГІЧНИЙ ПІДХІД ДО ПРОЄКТУВАННЯ РЕЖИМУ ГІРНИЧИХ РОБІТ ПРИ АДАПТИВНІЙ КАТЕГОРИЗАЦІЇ ГІРНИЧОЇ МАСИ

У сучасних умовах відкритої розробки залізорудних родовищ дослідження режимів гірничих робіт дедалі більше виходить за межі суто геометричного проєктування кар'єрного простору [1]. Якщо на початкових етапах достатнім є визначення кінцевого контуру та розмежування гірничої маси на руду і розкрив, то для складніших виробничих систем така схема вже не забезпечує повноцінного відображення економічної та технологічної структури об'єкта. Особливо це стосується ситуацій, коли поряд із геогенними запасами формується або може бути залучена в розробку техногенна сировинна база. За таких умов частина матеріалу не відповідає поточним вимогам до рудної сировини, але зберігає промислову цінність для подальшого подальшого використання.

Для системи «кар'єр – техногенне родовище» таке уточнення має принципове значення. Техногенна сировина в межах цієї системи може виконувати різні функціональні ролі залежно від економічних умов і техніко-економічних критеріїв оцінки. За зростання ціни на продукцію вона може бути залучена до складу рудопотоку та спрямована на поточну переробку. Натомість за несприятливої ринкової кон'юнктури той самий матеріал може розглядатися як розкривна порода. Саме тому дослідження техногенної сировини як окрему категорію мінерально-сировинної бази є перспективним напрямом для подальшого розвитку теоретичних основ проєктування відкритих гірничих робіт.

Актуальність такого підходу посилюється в умовах мінливої ринкової кон'юнктури. Зміна цінових параметрів, виробничих обмежень і вимог до якості продукції зумовлює коливання граничного бортового вмісту корисного компонента, що, у свою чергу, змінює межі економічної доцільності відпрацювання окремих блоків. Унаслідок цього одна й та сама частина гірничої маси може переходити з категорії «розкрив» до категорії «техногенна сировина» або безпосередньо до рудної маси. Отже, виникає методологічна потреба не лише в категоризації блоків, а й у дослідженні того, як зміна їх статусу впливає на режим відпрацювання кар'єру в цілому.

У цьому контексті перспективним є підхід, за якого дослідження будується як послідовний перехід від блочної економічної переоцінки до інтегрального аналізу й далі – до моделювання режимів гірничих робіт. Така схема дозволяє подолати розрив між статичною характеристикою ресурсної бази та її динамічною інтерпретацією в процесі відпрацювання [2]. Її основу можуть становити чотири взаємопов'язані компоненти: адаптивна переоцінка та категоризація гірничої маси, аналіз зміни поточного коефіцієнта розкриву з урахуванням техніко-економічного статусу категорії «техногенна сировина», зональна апроксимація кумулятивних кривих і алгоритм поетапного розвитку фронту гірничих робіт.

Першим кроком у цьому алгоритмі є переоцінка блоків у межах моделі родовища з подальшим поділом гірничої маси на три категорії: руда, техногенна сировина та розкрив. Принципова відмінність цього підходу від традиційного полягає в тому, що техногенна сировина розглядається не як проміжна залишкова група, а як окрема функціональна категорія, чутлива до зміни ціни, технологічних параметрів і виробничої стратегії [3]. Просторова інтерпретація таких результатів дає можливість дослідити розміщення цієї категорії в межах кар'єрного простору та встановити, що техногенна сировина, як правило, концентрується у перехідних зонах між рудним ядром і периферійною розкривною частиною [4].

Другим важливим етапом запропонованої методології є застосування кумулятивних залежностей як проміжного аналітичного рівня між блочною економічною моделлю та проєктуванням режиму гірничих робіт. Кумулятивні криві зміни коефіцієнта розкриву дозволяють перейти від аналізу окремих блоків до інтегрального представлення структури кінцевого контуру кар'єру. У межах подальших досліджень саме ці графіки можуть розглядатися як основа для оцінки того, як зміна економічної категоризації блоків впливає на загальну конфігурацію відпрацювання, структуру рудопотоку та обсяги розкривних робіт.

Третім напрямом дослідження є застосування зональної апроксимації кумулятивних кривих як проміжного аналітичного етапу між економічною категоризацією блоків і проєктуванням режиму гірничих робіт. Необхідність цього етапу зумовлена тим, що кумулятивна крива, побудована в координатах «руда –гірнича маса», має нелінійний характер і відображає послідовну зміну умов відпрацювання різних частин кінцевого контуру кар'єру, тому її інтерпретація як єдиної лінійної залежності є методично спрощеною. У зв'язку з цим крива поділяється на три характерні зони – стартову, основну робочу та хвостову, які відповідають початковому етапу розкриття, найбільш тривалому періоду стабільної експлуатації та завершальному етапу відпрацювання залишкових ділянок [5]. Для кожної з цих зон виконується окреме лінійне наближення, що дозволяє перейти від загальної дугоподібної форми

кумулятивної траєкторії до системи відрізків із чіткою інженерною інтерпретацією. Ключове значення при цьому має саме основна робоча зона, оскільки вона охоплює найбільший за обсягом інтервал відпрацювання гірничої маси та, відповідно, найбільш повно характеризує експлуатаційний режим кар'єру, тоді як стартова і хвостова зони мають локальний, підготовчий або завершальний характер. Нахил апроксимуючого відрізка в межах основної робочої зони інтерпретується як інтегральна характеристика співвідношення між приростом загальної гірничої маси та приростом руди, а після відповідного перетворення – як оцінка експлуатаційного коефіцієнта розкриву. Таким чином, зональна апроксимація дає можливість отримати стійкий параметр, що відображає режим відпрацювання в його найбільш характерній робочій фазі та може бути безпосередньо використаний як цільовий орієнтир для алгоритму поетапного розвитку фронту гірничих робіт.

Четвертим елементом є алгоритм поетапного розвитку фронту гірничих робіт, який дає змогу дослідити доцільність різних варіантів відпрацювання в межах заданої логіки. У межах даного дослідження доцільним є розгляд двох сценаріїв: перший – з включенням категорії «техногенна сировина» до складу рудопотоку, другий – без такого включення. Порівняння цих двох варіантів дозволяє проаналізувати трансформацію рудопотоку та спроєктувати параметри експлуатаційного режиму зокрема, визначити коефіцієнт розкриву для різних сценаріїв зовнішніх умов господарювання.

Зважаючи на високу обчислювальну складність задачі динамічного розподілу гірничої маси, в основу алгоритму поетапного розвитку гірничих робіт покладено ітеративний евристичний підхід. Його застосування дає змогу послідовно формувати просторово доступну для відпрацювання зону у межах кінцевого контуру кар'єру та на цій основі проєктувати технологічно обґрунтовані етапи відпрацювання. Реалізація алгоритму базується на поетапному відборі блоків із урахуванням умов доступності, просторової послідовності виїмки та критеріїв узгодження поточного коефіцієнта розкриву з його цільовим значенням за одночасного дотримання заданих технологічних обмежень.

Таким чином, подальші дослідження в межах системи «кар'єр – техногенне родовище» будуть спрямовані на інтеграцію динамічної категоризації гірничої маси, кумулятивного аналізу та алгоритмічного моделювання режимів відпрацювання. Такий підхід створює основу для переходу від статичного розгляду техногенної сировини до її інтерпретації як керованого елемента виробничої системи і відповідного дотримання принципів адаптивного проєктування [6]. Наукова перспективність цієї методології полягає в можливості встановлення закономірностей впливу техногенної сировини на режим гірничих робіт, динаміку поточного коефіцієнта розкриву та адаптивного проєктування розвитку гірничих робіт за різних цінових сценаріїв, а практична цінність – у формуванні підґрунтя для подальшого розвитку адаптивних моделей проєктування відкритих гірничих робіт у стохастичних економічних умовах.

Список використаної літератури:

1. Григор'єв Ю.І. Визначення основних методичних принципів цілеспрямованого формування техногенних родовищ при комплексному освоєнні надр / Ю.І. Григор'єв // Гірничий вісник : науково-технічний збірник. - Кривий Ріг: КНУ, 2014. - Вип. 97. – С. 267 – 271.

2. Григор'єв Ю.І. Обґрунтування методики адаптивного формування календарного плану гірничих робіт з урахуванням змінної якості рудної сировини та динаміки ринкової кон'юнктури / Ю.І. Григор'єв // Технічна інженерія : науковий журнал. – Житомир: Державний університет «Житомирська політехніка», 2025. – № 1 (95). – С. 124 – 130. – DOI: https://doi.org/10.26642/ten-2025-1(95)-124-130.

3. Голік В. І., Комащенко В. І. Техногенні мінеральні утворення як резерв мінерально-сировинної бази гірничих підприємств // Науковий вісник Національного гірничого університету. – Дніпро. – С. 35–42.

4. Григор'єв Ю.І. Технологія відпрацювання техногенного родовища відкритими рудоскатами / Ю.І. Григор'єв, І.Є. Григор'єв, В.Е. Усачов, М.С. Євтушенко // Збірник наукових праць Національного гірничого університету. – Дніпро: НГУ, 2018. – Вип. 56. – С. 18 – 28.

5. Григор'єв Ю.І. Обґрунтування інструментів механізму адаптації гірничо-видобувного комплексу з позицій системного підходу / Ю.І. Григор'єв // Розвиток промисловості та суспільства : матеріали Міжнародної науково-технічної конференції (Кривий Ріг, 24-26 травня 2023 р.). – Кривий Ріг: КНУ, 2023. – С. 6.

6. Григор'єв Ю. І., Луценко С. О., Григор'єв І. Є., Пилинчук Д. І., Лебеденко В. В. Адаптивна оптимізація режиму гірничих робіт гірничо-видобувного кластера з використанням евристичного багатокритеріального алгоритму // *Науковий журнал Метінвест Політехніки. Серія: Технічні науки*. – 2026. – Вип. 6. – С. 160–165. – DOI: 10.32782/3041-2080/2026-6-20.

УДК 006.011

Литвинчук Д.В., студент, курс 2, група ГС-41, факультет НН ІЕЕ
Науковий керівник: Вапнічна В.В., к.т.н., доц.
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ОЦІНКА ТА КОНТРОЛЬ ЯКОСТІ БУДІВЕЛЬНОГО ПІСКУ

Будівельний пісок є одним із базових нерудних матеріалів, що використовується у виробництві бетонів, розчинів, силікатних виробів, дорожніх конструкцій, основ та підсипок. На перший погляд цей матеріал може сприйматися як звичайна природна сировина, однак у будівельній практиці він розглядається як продукція, якість якої має бути підтверджена результатами вимірювань, випробувань і порівняння з чинними нормативними вимогами. Саме тому оцінювання піску доцільно виконувати комплексно: через взаємозв'язок метрології, стандартизації та процедур підтвердження відповідності.

Об'єктом розгляду є пісок ділянки, що досліджується. За наявними матеріалами досліджень поклад представлений різнозернистим кварцовим піском. Загальна потужність корисної копалини в межах підрахунку запасів становить від 10,8 до 15,4 м, у середньому близько 14,4 м. Важливою особливістю родовища є наявність двох частин покладу: верхнього необводненого шару та нижнього обводненого шару. Така будова має практичне значення для вибору технології розробки: верхній шар може розроблятися екскаваторним способом, тоді як нижній доцільно видобувати із застосуванням гідромеханізації.

З погляду використання продукції необводнений пісок верхнього шару може застосовуватися переважно у дорожньому будівництві, при планувальних роботах, підсипанні та благоустрою територій. Обводнений пісок нижнього шару має ширшу сферу застосування, зокрема як дрібний заповнювач для важких бетонів, матеріал для дорожніх робіт, компонент щільних силікатних бетонів, а також у певних видах гідротехнічного будівництва. Це підтверджує, що навіть у межах одного родовища пісок не є однорідним за виробничою цінністю, а його придатність повинна визначатися на основі фактичних показників якості.

Метрологічне забезпечення якості піску полягає у правильному відборі проб, застосуванні встановлених методик випробувань, використанні справних і повірених засобів вимірювальної техніки та коректній обробці результатів. Для будівельного піску найбільш важливими є зерновий склад, модуль крупності, вміст пиловидних і глинистих часток, наявність глини в грудках, вміст органічних домішок, густина, насипна густина, коефіцієнт фільтрації, а також сумарна питома активність природних радіонуклідів. На етапі геологічної оцінки додатково визначаються потужність розкривних порід, потужність корисної копалини, глибина залягання шарів і межі підрахунку запасів.

Практичні методи контролю охоплюють ситовий аналіз для визначення зернового складу, лабораторне відмулювання або інші методи для встановлення вмісту пиловидних і глинистих часток, а також радіометричні або спектрометричні вимірювання для оцінювання радіаційної безпечності. У цьому випадку метрологія виконує не лише допоміжну, а й доказову функцію: вона забезпечує достовірність даних, на підставі яких ухвалюються рішення щодо можливого напряму використання сировини та її реалізації як будівельної продукції.

Стандартизація задає єдині правила, за якими здійснюється оцінювання піску. Основним нормативним орієнтиром є ДСТУ Б В.2.7-32-95, що поширюється на щільний природний пісок і пісок відсівів подрібнення із середньою густиною зерен більше 2,0 до 2,8 г/см^3, які використовують як дрібний заповнювач бетонів, будівельних розчинів і сухих сумішей, як компонент силікатних виробів, основу або компонент сумішей для автомобільних доріг та аеродромів, а також баластовий матеріал при благоустрою і плануванні. Цей стандарт придатний для цілей сертифікації та визначає показники якості, зокрема зерновий склад, вміст пиловидних і глинистих часток, органічних домішок і сумарну питому активність природних радіонуклідів.

ДСТУ Б В.2.7-29-95 класифікує дрібні заповнювачі, у тому числі природні піски, та визначає, що до пісків належать неорганічні зернисті сипкі будівельні матеріали з розмірами зерен від 0,05 до 5,0 мм. Відповідно до функціонального призначення щільні піски можуть застосовуватися як дрібний заповнювач для важких бетонів і розчинів, дорожніх сумішей, силікатних виробів, основ будівель і споруд, рекультиваційних та інших будівельних робіт. Отже, стандартизація дозволяє не лише встановити відповідність матеріалу вимогам, а й обґрунтувати конкретну сферу його використання.

Окреме значення має радіаційно-гігієнічний контроль. Для ділянки, що досліджується, сумарна питома активність природних радіонуклідів становить 42-63 Бк/кг. Це суттєво нижче за граничне значення 370 Бк/кг, що застосовується для будівельних матеріалів І класу. Отже, пісок може розглядатися як придатний для використання у всіх видах будівництва без радіаційних обмежень. Такий показник є

важливим не лише для формального оформлення документації, а й для підтвердження безпечності матеріалу для населення та навколишнього середовища.

Особливу увагу у такій системі потрібно приділяти репрезентативності проб. Природна сировина не має абсолютно однакових властивостей у всіх точках родовища: зерновий склад, частка пилуватих домішок і вологість можуть змінюватися залежно від глибини залягання та місця відбору. Тому об'єктивна оцінка повинна базуватися не на одиничному зразку, а на серії проб, відібраних за затвердженою схемою. Узагальнення результатів за розвідувальними перетинами дає можливість визначити середньозважені характеристики та уникнути помилкового висновку щодо всієї ділянки за випадковим локальним відхиленням.

На виробничому рівні контроль якості доцільно організовувати як послідовний процес. Спочатку встановлюють геологічні умови залягання і можливі межі видобування, потім відбирають проби з необводненого та обводненого шарів, після цього виконують лабораторні дослідження і порівнюють отримані дані з нормативними вимогами. Завершальним етапом є оформлення протоколів, паспортів якості та інших супровідних документів. Така послідовність забезпечує простежуваність: від конкретної партії піску можна перейти до результатів аналізу, методики випробування і нормативного документа, на підставі якого зроблено висновок.

Практична цінність стандартизації проявляється також у тому, що вона зменшує ризик нецільового використання матеріалу. Наприклад, підвищений вміст глинистих часток може погіршувати зчеплення зерен із цементним каменем, збільшувати витрату в'яжучого та негативно впливати на міцність і довговічність бетонів. Надлишок дуже дрібних часток змінює водопотребу суміші, а наявність зерен понад установлені розміри може ускладнювати приготування розчинів або виробів. Тому контроль піску має не лише формальне, а й технологічне значення для подальшого будівництва.

Для підприємства підтвердження відповідності є важливим елементом конкурентоспроможності. Споживач будівельних матеріалів зацікавлений не просто у придбанні піску, а в отриманні продукції з прогнозованими властивостями. Наявність протоколів випробувань, паспортів якості та результатів радіаційного контролю підвищує довіру до постачальника, полегшує використання матеріалу в проєктній і виробничій документації та зменшує ризики претензій під час виконання будівельних робіт. У цьому сенсі метрологія, стандартизація і сертифікація працюють як єдина система управління якістю.

З урахуванням сучасних потреб будівельної галузі України така система контролю має особливу актуальність. Відновлення інфраструктури, будівництво доріг, промислових і цивільних об'єктів потребують значних обсягів нерудної сировини. Однак швидке залучення місцевих родовищ до використання не повинно відбуватися без перевірки якості. Комплексний підхід до оцінювання піску дозволяє поєднати економічну доцільність використання місцевої сировинної бази з вимогами безпеки, довговічності та нормативної відповідності будівельної продукції.

Підтвердження відповідності якості піску як продукції підприємства має спиратися на комплекс документів. До них належать спеціальний дозвіл на користування надрами, матеріали геологорозвідувальних робіт, техніко-економічне обґрунтування постійних кондицій, протоколи лабораторних випробувань, радіаційно-гігієнічний висновок або результати відповідної оцінки, паспорт якості на партію продукції та за потреби декларація про відповідність. Саме сукупність цих документів підтверджує, що пісок є не випадково видобутою сировиною, а контрольованою будівельною продукцією з визначеними характеристиками.

Таким чином, якість будівельного піску ділянки, що досліджувалася повинна оцінюватися не за одним окремим показником, а через систему взаємопов'язаних дій: геологічне вивчення, метрологічно забезпечений відбір і аналіз проб, порівняння результатів із вимогами стандартів та документальне підтвердження відповідності. Метрологія забезпечує точність і достовірність вимірювань, стандартизація визначає нормативні межі якості, а сертифікаційні та супровідні документи підтверджують можливість безпечного використання матеріалу. У результаті природний пісок набуває статусу стандартизованої, контрольованої та придатної до практичного застосування продукції для будівельної галузі.

Список використаних джерел:

1. ДСТУ Б В.2.7-32-95. Будівельні матеріали. Пісок щільний природний для будівельних матеріалів, виробів, конструкцій і робіт. Технічні умови. Київ, 1996.

2. ДСТУ Б В.2.7-29-95. Будівельні матеріали. Дрібні заповнювачі природні, із відходів промисловості, штучні для будівельних матеріалів, виробів, конструкцій та робіт. Класифікація. Київ, 1996.

3. ДСТУ Б В.2.7-232:2010. Будівельні матеріали. Пісок для будівельних робіт. Методи випробувань. Київ, 2010.

4. Норми радіаційної безпеки України (НРБУ-97): Постанова МОЗ України від 01.12.1997 № 62.

УДК 622.2

Луценко Д.О., студент 4-го курсу, гр. РР-52
Науковий керівник: Піскун І.А., доктор філософії
Кафедра гірничих технологій та будівництва ім. проф. Бакка М.Т.
Державний університет «Житомирська політехніка»

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ТА ДОЦІЛЬНОСТІ РЕКОНСТРУКЦІЇ ДСЦ В УМОВАХ ДП «ШПАТ»

На підприємстві, що здійснює розробку родовища «Гірне», у технологічному процесі переробки гірничої маси використовується дробильно-сортувальне обладнання, значна частина якого експлуатується протягом тривалого часу без суттєвого технічного оновлення. У результаті цього обладнання морально та фізично застаріло і не забезпечує необхідної продуктивності підприємства, що негативно впливає на ефективність технологічного процесу переробки гірничої маси. Додатковою проблемою в роботі дробильно-сортувального комплексу є наявність негабаритної гірничої маси, що надходить з кар'єру. Великі шматки породи ускладнюють процес дроблення матеріалу без застосування додаткового обладнання, створюють підвищене навантаження на дробарки та можуть призводити до зниження продуктивності обладнання і виникнення простоїв у роботі технологічної лінії. Саме наявність застарілого обладнання, недостатня продуктивність існуючого дробильно-сортувального комплексу та проблеми з переробкою негабаритної гірничої маси стали основними передумовами для проведення реконструкції дробильно-сортувального заводу, під час якої враховувалися необхідність підвищення ефективності роботи обладнання, покращення умов переробки гірничої маси та забезпечення стабільної роботи підприємства.

У результаті реконструкції та модернізації дробильно-сортувального комплексу очікується підвищення ефективності його роботи за рахунок заміни застарілого дробильного обладнання на більш сучасне і продуктивне, зокрема впровадження нових щокових дробарок, що забезпечить більший ступінь дроблення та надійність технологічного процесу (рис. 1). Одночасно буде оптимізовано технологічну схему переробки гірничої маси шляхом удосконалення послідовності дроблення і сортування, що дозволить зменшити навантаження на окремі вузли та усунути наявні проблеми це є переподрібнення породи та грохочення матеріалу на тих стадіях які не забезпечують достатній вихід продукту готової фракції після грохота. Це сприятиме підвищенню якості готової продукції завдяки більш ефективному грохоченню та поверненню некондиційного матеріалу на повторне дроблення. Крім того, очікується зростання загальної продуктивності комплексу, зменшення простоїв обладнання та зниження енерговитрат на одиницю продукції за рахунок раціональнішого розподілу навантажень між агрегатами. Покращаться умови експлуатації та технічного обслуговування обладнання, що, у свою чергу, підвищить стабільність роботи підприємства та зменшить кількість аварійних зупинок. У підсумку це забезпечить не лише збільшення обсягів переробки гірничої маси, але й підвищення загальної економічної ефективності функціонування дробильно-сортувального заводу.

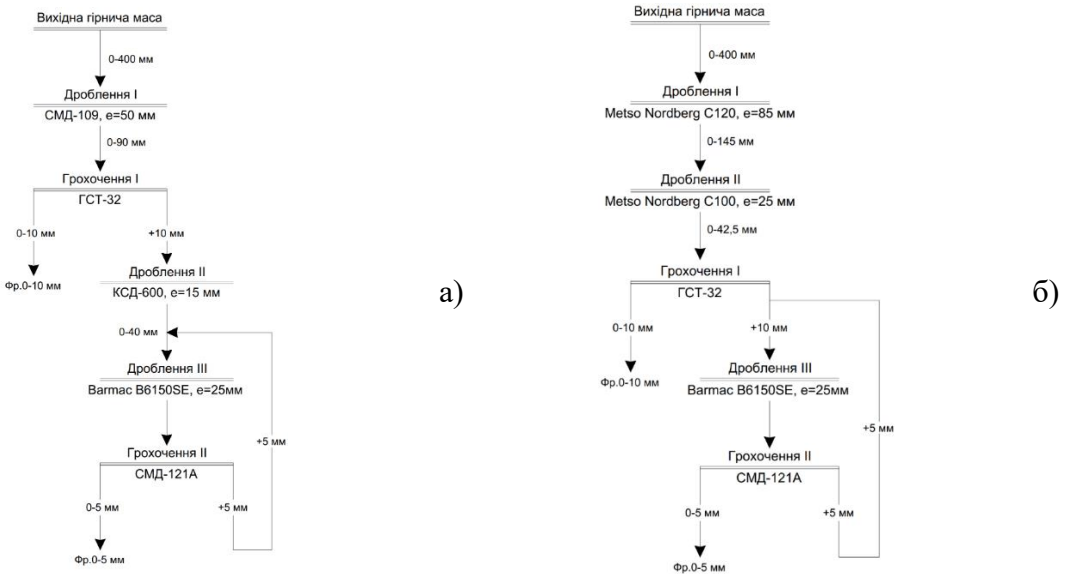


Рис. 1. Поточна (а) та запропонована (б) технологічна схема ДСЦ

Запропонована технологічна схема дробильно-сортувального заводу дозволяє ефективно переробляти наявну гірничу масу, зокрема проблемні негабаритні шматки породи розміром до 700 мм. Впровадження нової схеми забезпечує досягнення необхідної продуктивності дробильно-сортувального комплексу а саме 120 тис т/рік, яка відповідає виробничим потребам підприємства. Крім того, реалізація запропонованих технічних рішень очікувано дозволить не лише підвищити продуктивність ДСЗ, але й знизити собівартість готової продукції за рахунок більш ефективного використання обладнання, зменшення простоїв та оптимізації процесу переробки гірничої маси (таблиця 1).

Таблиця 1

Зведені техніко-економічні показники для обґрунтування запропонованих рішень

№ з/п	Параметр	Значення		Динаміка
		поточні	очікувані	
1	Витрати на забезпечення видобувних робіт, грн/рік	80906119,2	110956963,5	+30050844,3
2	Витрати на забезпечення роботи ДСЦ, грн/рік	42085200,0	56350395,4	+14265195,4
2.1	Функціонування основного обладнання для дроблення (без урахування оплати праці), грн/рік	18844800,0	17394811,4	-1449988,6
2.2	Функціонування основного обладнання для грохочення (без урахування оплати праці), грн/рік	1687880,0	2314806,9	+626926,9
2.3	Функціонування додаткового обладнання ДСЗ (без урахування оплати праці), грн/рік	3916480,0	5371172,6	+1454692,6
2.4	Додаткове обладнання для забезпечення функціонування ДСЦ, грн/рік	8766840,0	12022872,0	+3256032,0
2.5	Базовий фонд оплати праці (з урахування 20% річної премії), грн/рік	1620000,0	1620000,0	0,0
2.6	Витратні та допоміжні матеріали, грн/рік	10000,0	10000,0	0,0
2.7	Знос і амортизація виробничих активів, грн/рік	220000,0	8220000,0	+8000000,0
2.8	Заходи з безпеки праці персоналу, грн/рік	5000,0	5000,0	0,0
2.9	Загальна сума прямих витрат, грн/рік	35071000,0	46958662,9	+11887662,9
2.10	Резервні витрати (у межах 20%), грн/рік	7014200,0	9391732,6	+2377532,6
2.11	Кількість працівників залучених до роботи у ДСЦ, чол.	9	9	0,0
2.12	Продуктивність праці, т/чол.	5600,0	7680,0	+2080,0
2.13	Собівартість дроблення, грн/т	835,0	815,3	-19,8
3	Витрати на забезпечення робіт зі збагачення кварц-польовошпатової сировини, грн/рік	29730324,0	39328901,5	+9598577,5
4	Загальні витрати на забезпечення повного комплексу робіт, грн/рік	152721643,2	206636260,4	+53914617,2
5	Продуктивність підприємства по основній продукції	50400,0	69120,0	+18720,0
6	Собівартість виробництва одиниці продукції, грн/т	3423,4	3368,9	-54,6
7	Вартість реалізації продукції, грн/т	4000,0	4000,0	0,0
8	Дохід від реалізації, грн	201600000,0	276480000,0	+74880000,0
9	Податкові відрахування, грн	44352000,0	60825600,0	+16473600,0
10	Чистий дохід, грн	157248000,0	215654400,0	+58406400,0
11	Прибуток, грн	4526356,8	9018139,6	+4491782,8
12	Рентабельність, %	3,0	4,4	+1,4

У роботі розглянуто удосконалення технологічних процесів переробки гірничої маси на родовищі «Гірне», яке розробляє ДП «Шпат». Основною метою було підвищення ефективності роботи дробильно-сортувального комплексу та покращення техніко-економічних показників підприємства шляхом впровадження більш раціональної технологічної схеми. У роботі проаналізовано існуючу схему дроблення і сортування та виявлено її основні недоліки, зокрема недостатню продуктивність, високі енерговитрати та зниження ефективності роботи обладнання. Запропоновано модернізовану технологічну схему із застосуванням двох щокових дробарок і відцентрової дробарки типу Barmac, що забезпечує необхідну продуктивність, стабільну якість продукції та більш ефективне використання обладнання. Результати розрахунків показали покращення техніко-економічних показників, зокрема зростання продуктивності, зменшення енерговитрат і експлуатаційних витрат. Впровадження запропонованих заходів сприятиме підвищенню ефективності роботи підприємства та призведе до збільшення його прибутку.

Список використаних джерел:

1. ДП «Шпат». Офіційна інформація та виробничі дані підприємства (внутрішні матеріали)

2. Metso Outotec. Crushing and Screening Handbook. URL: https://www.metso.com/portfolio/crushing-and-screening-handbook/

3. Бойко В.С., Смирнов В.О. Технологія видобування та переробки корисних копалин http://dx.doi.org/10.26642/ten-2023-2(92)-225-233

4. Наукові публікації з питань дроблення та сортування гірничої маси. https://www.doi.org/10.31474/2415-7902-2022-1(8)-2(9)-94-105

5. ДП «Шпат» [Електронний ресурс]. - Режим доступу: http://www.shpat.com.ua/index.php/produktsiya/kvarts-polevoshpatovoe-syrjo

УДК 622.7:666.9

Мачинський М.О., студент 1-го курсу, гр. РР-50м
Шамрай В.І., к.т.н., доц.
Державний університет «Житомирська політехніка»

ДОСЛІДЖЕННЯ ФІЗИКО-ХІМІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ВІДСІВІВ ЩЕБЕНЮ ЯК МІНЕРАЛЬНИХ НАПОВНЮВАЧІВ ТА ПОТЕНЦІЙНИХ КОМПОНЕНТІВ В'ЯЖУЧИХ РЕЧОВИН

Важливим показником під час оцінювання придатності відсівів для використання як мінеральних наповнювачів є їх дисперсність та поверхневі характеристики. Відомо, що зі зменшенням розмірів частинок суттєво зростає площа їх контакту з компонентами в'яжучого середовища, а це, у свою чергу, безпосередньо впливає на інтенсивність фізико-хімічних процесів у матеріалі. Для тонкодисперсних систем характерною особливістю є підвищена поверхнева енергія частинок, яка визначає характер адсорбційних процесів, змочуваність поверхні та особливості взаємодії між окремими фазами. Саме ці параметри багато в чому визначають поведінку матеріалу в складі композиційних систем і можуть впливати на процеси формування їх внутрішньої структури [1].

Водночас слід враховувати, що фізико-хімічні властивості дрібнодисперсних матеріалів значною мірою залежать від способу їх утворення. У процесі механічного дроблення гірських порід відбувається не лише зменшення розмірів зерен, але й зміна фізичного стану їх поверхні. Руйнування структури мінералів супроводжується появою дефектів кристалічної решітки, утворенням нових поверхонь та локальним накопиченням енергії. Такі зміни можуть сприяти формуванню активних центрів на поверхні частинок, що потенційно підвищує їх реакційну здатність і може впливати на характер взаємодії з в'яжучими компонентами [2]. Хімічний склад досліджуваних відсівів щебеню представлений у табл. 1.

Таблиця 1

Хімічний склад відсівів щебеню

Компонент	Омелянівське родовище граніту, wt %
SiO_2	69,0
Al_2O_3	14,0
Fe_2O_3	4,90
K_2O	4,80
Na_2O	3,30
CaO	1,80
MgO	0,50
TiO_2	0,40
P_2O_5	0,30
Інші	1,00
Всього:	100,00

Окремої уваги потребує питання можливої пуцолановой активності окремих компонентів відсівів. Тривалий час дрібнодисперсні продукти дроблення розглядалися переважно як інертні мінеральні матеріали, що виконують функцію заповнювача. Проте сучасні дослідження демонструють, що за певних умов частина силікатних та алюмосилікатних компонентів може проявляти реакційну здатність та брати участь у процесах взаємодії з продуктами гідратації цементу. Навіть незначний рівень такої активності здатний впливати на формування структури матеріалу та його експлуатаційні характеристики.

Особливий інтерес також становить дослідження морфології поверхні частинок. Частинки, отримані в результаті механічного руйнування порід, зазвичай мають складну форму та нерівномірний рельєф поверхні. На відміну від природних матеріалів, які під дією природних процесів набувають більш згладжених контурів, продукти дроблення характеризуються кутуватістю, підвищеною шорсткістю та наявністю мікронерівностей. З одного боку, це сприяє кращому механічному зчепленню з в'яжучим середовищем, а з іншого – може впливати на водопотребу та реологічні характеристики сумішей.

Варто зазначити, що ефективність використання відсівів щебеню як функціональних компонентів значною мірою визначається не лише їх первинними фізико-хімічними характеристиками, але й можливістю цілеспрямованого модифікування властивостей матеріалу. Сучасні технологічні підходи передбачають застосування механічної, термічної або хімічної активації мінеральної сировини, що дозволяє змінювати дисперсність частинок, стан поверхні та рівень їх реакційної здатності. Зокрема, механічна активація, яка здійснюється шляхом додаткового подрібнення матеріалу, сприяє збільшенню

питомої поверхні та формуванню нових активних центрів. Це може суттєво підвищувати інтенсивність фізико-хімічної взаємодії між компонентами суміші [3].

Не менш важливим аспектом є вплив відсівів на процеси формування мікроструктури композиційних матеріалів. Дрібнодисперсні частинки здатні виконувати роль своєрідних центрів кристалізації, навколо яких відбувається розвиток структурних елементів матеріалу. У результаті може формуватися більш щільна та рівномірна структура, що позитивно позначається на фізико-механічних характеристиках готової продукції. Подібний ефект особливо важливий для композиційних систем, де якість контакту між окремими компонентами визначає довговічність та експлуатаційні властивості матеріалу [4].

Крім того, необхідно враховувати, що характер взаємодії між відсівами та в'яжучим середовищем може змінюватися залежно від мінералогічного складу вихідної породи. Навіть незначні відмінності у співвідношенні кварцу, польових шпатів, карбонатних мінералів або глинистих домішок можуть впливати на кінетику фізико-хімічних процесів та особливості структуроутворення. Саме тому визначення взаємозв'язків між складом матеріалу та його технологічними властивостями залишається одним із важливих напрямів сучасних досліджень у сфері використання вторинної мінеральної сировини.

Для детального вивчення таких особливостей дедалі частіше застосовуються сучасні методи фізико-хімічного аналізу. Використання сканувальної електронної мікроскопії, рентгенофазового аналізу, лазерної гранулометрії та спектроскопічних методів дозволяє отримувати більш повну інформацію про структуру поверхні, мінеральний склад та розподіл частинок за розмірами. Комплексне використання таких підходів створює можливість встановлювати взаємозв'язки між структурними характеристиками матеріалу та його поведінкою у складі композиційних систем [5].

Не менш важливим є дослідження впливу відсівів на технологічні властивості сумішей. Введення дрібнодисперсних компонентів може змінювати рухливість системи, характер структуроутворення та умови перебігу процесів тверднення. При цьому вплив таких матеріалів не завжди є однозначним. У ряді випадків дрібні частинки здатні ущільнювати структуру, заповнюючи міжзерновий простір, тоді як надлишковий вміст тонких фракцій може спричиняти збільшення водопотреби та ускладнювати технологічну обробку сумішей [6].

Крім суто технологічних аспектів, доцільність використання відсівів визначається також екологічними та економічними чинниками. Щороку підприємства з виробництва нерудних матеріалів накопичують значні обсяги дрібнодисперсних відходів, складування яких потребує додаткових територій і супроводжується техногенним навантаженням на навколишнє середовище. Їх повторне використання дозволяє не лише зменшити кількість відходів, а й сприяє більш повному залученню мінеральних ресурсів у виробничий цикл. У сучасних умовах це набуває особливого значення, оскільки відповідає принципам циркулярної економіки та концепції сталого розвитку.

Таким чином, комплексне дослідження фізико-хімічних властивостей відсівів щебеневого виробництва відкриває перспективи для розширення напрямів їх практичного використання. Поглиблене вивчення їх структури, поверхневих характеристик та особливостей взаємодії з в'яжучими системами дозволить формувати більш обґрунтовані підходи до створення нових композиційних матеріалів із покращеними властивостями.

Список використаних джерел:

1. Shamrai V., Leonets I., Melnyk-Shamrai V., Patseva I., Naumov Y. Reuse of stone working enterprise slurry in geopolymer and concrete products. Mining of Mineral Deposits. 2024. Vol. 18(4). P. 10-17. https://doi.org/10.33271/mining18.04.010

2. Shamrai V., Korobiichuk V., Leonets I., Melnyk-Shamrai V., Naumov Y. Development of Geopolymer Concrete Formulations Based on Activated Stone Processing Sludge to Reduce Natural Resource Consumption. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2025. Vol. 5. No. 6 (137). P. 41-48. doi:10.15587/1729-4061.2025.341720

3. Шамрай В.І., Мельник-Шамрай В.В., Подчашинський Ю.О., Наумов Я.О., Меринов Р. Р. Кількісна оцінка відходів при розпилюванні природного каменю дисковими пилами. Технічна інженерія. 2025. Вип. 2(96). С. 339–345. https://doi.org/10.26642/ten-2025-2(96)-339-345

4. Коробійчук В.В., Леонець І.В., Шамрай В.І., Мельник-Шамрай В.В., Криворучко А.О. Шлам каменеобробних підприємств: перспективи використання як домішки в керамічній промисловості. Технічна інженерія. 2025. Вип. 1 (95). С. 138-144.

5. Мельник-Шамрай В.В., Шамрай В.І., Пацева І.Г., Ігнатюк Р.М. Оцінка впливу гірничо-видобувної галузі на довкілля: система управління відходами. Екологічні науки : науково-практичний журнал. К. : Видавничий дім «Гельветика», 2024. № 4(55). С.164-168

6. Шамрай В.І., Мельник-Шамрай В.В., Темченко А.Г., Махно А.М., Ігнатюк Р.М. Дослідження якісних властивостей відходів каменевидобування та каменеобробки з метою їх використання як сировини для виготовлення геополімерного бетону. Технічна інженерія. 2023. Вип. 1(91). С. 385–397. https://doi.org/10.26642/ten-2023-1(91)-385-397

УДК 622.1:528.7

Мельнийчук Є.Ю., студент 3 курсу, гр. ГГ-31
Державний університет «Житомирська політехніка»

ГІБРИДНІ СИСТЕМИ ПОЗИЦІОНУВАННЯ В УМОВАХ НЕСТАБІЛЬНОГО GNSS-СИГНАЛУ ДЛЯ БЕЗПЕРЕБІЙНОЇ МАРКШЕЙДЕРСЬКОЇ ЗЙОМКИ

Сучасна маркшейдерська справа значною мірою побудована на використанні глобальних навігаційних супутникових систем (GNSS), зокрема технологій RTK, диференціального GNSS, наземних (GBAS) та супутникових (SBAS) систем доповнення. Точність позиціонування на рівні 1–3 см у режимі реального часу, висока продуктивність, можливість роботи без прямої видимості між пунктами та інтеграція з безпілотними літальними апаратами (БПЛА) перетворили GNSS-приймачі на основний інструмент маркшейдерських служб гірничодобувних підприємств.

Водночас з 24 лютого 2022 року умови застосування GNSS-технологій на території України кардинально змінилися. Внаслідок широкомасштабної воєнної агресії значні території перебувають у зоні постійного або періодичного впливу засобів радіоелектронної боротьби (РЕБ). За даними публічних спостережень GPSJam, EUROCONTROL та ICAO, у 2023–2025 рр. рівень глушіння та спуфінгу GNSS-сигналів у східних, південних і центральних областях України перевищує середньоєвропейський у десятки разів. Це створює нову інженерну проблему: забезпечення безперебійних маркшейдерських вимірювань в умовах часткової або повної відсутності надійних супутникових корекцій.

Метою дослідження є аналіз структури, можливостей та обмежень гібридних систем позиціонування, які забезпечують маркшейдерську зйомку в умовах глушіння та підміни GNSS-сигналу.

Слід розрізняти два типи навмисних завад. Перший – глушіння (jamming) – це випромінювання потужного шумового сигналу в діапазонах L1, L2, L5, що призводить до повної втрати супутникового зв'язку приймачем. Маркшейдер при цьому отримує очевидний індикатор проблеми: відсутність фіксованого рішення, тривога низького SNR, втрата RTK-фікса. Другий, значно небезпечніший тип – спуфінг (spoofing) – це передача підробленого GNSS-сигналу, який змушує приймач обчислювати неправильні координати. У режимі RTK спуфінг може давати відносно стабільне рішення зі зміщенням до сотень метрів, що при некритичному використанні приведе до системної помилки маркшейдерських даних. Звичайні GNSS-приймачі споживчого та геодезичного класу не мають вбудованого захисту від спуфінгу, тому втрачають достовірність саме там, де від них вимагається найвища точність.

Гібридна система позиціонування – це багатосенсорний комплекс, у якому супутникові вимірювання комбінуються з даними автономних та локальних джерел про положення в просторі. До типових компонентів такої системи належать:

1. Інерційні модулі (IMU). Сучасні MEMS-IMU тактичного класу (ADIS16490, KVH 1750) забезпечують короткочасну автономну навігацію з дрейфом 0,1–1°/год за курсом і 1–5 м/хв за положенням. Вони працюють незалежно від зовнішніх сигналів і є базовим резервом у разі втрати GNSS.

2. Візуальна одометрія та візуально-інерційні системи (VIO). Алгоритми ORB-SLAM3, VINS-Fusion, OpenVSLAM відновлюють траєкторію руху камери на основі послідовних кадрів. На відкритих кар'єрних просторах із текстурованою поверхнею VIO дозволяє утримувати позиціонування з точністю 0,1–0,5 % від пройденої відстані.

3. LiDAR-SLAM. Використання тривимірних лазерних сканерів (Velodyne Puck, Livox Mid-360, Ouster OS1) у поєднанні з алгоритмами LIO-SAM, FAST-LIO2, Cartographer забезпечує сантиметрову точність побудови траєкторії в умовах складного рельєфу та відсутності GNSS. Цей підхід уже довів свою ефективність у підземній маркшейдерії.

4. Локальні радіонавігаційні системи. Технології надширокосмугового радіозв'язку (UWB, IEEE 802.15.4a) – Pozyx, Decawave DW1000, Noooploop LinkTrack – забезпечують локалізацію об'єктів з точністю 5–30 см у радіусі 50–500 м від мережі стаціонарних якорів. Для маркшейдерії перспективним є розгортання UWB-якорів навколо периметра кар'єру.

5. Псевдолайти (pseudolites). Наземні передавачі, що випромінюють сигнал, аналогічний за структурою до GPS L1, але з більш потужним рівнем і захистом від спуфінгу. Працюють разом зі звичайним GNSS-приймачем, перекриваючи зону можливого ураження.

6. Магнітометри та барометричні висотоміри. Допоміжні сенсори для визначення курсу і висоти. Особливо важливі для БПЛА, оскільки замінюють GNSS-курс під час глушіння.

Об'єднання різнорідних вимірювань у єдину оцінку положення здійснюється алгоритмами сенсорної фузії. Найпоширенішим класичним підходом є розширений фільтр Калмана (Extended Kalman Filter, EKF), який забезпечує оптимальне об'єднання GNSS-, IMU- та одометричних даних у припущенні гаусових похибок. Більш сучасні рішення (Factor Graph Optimization, iSAM2, GTSAM) дозволяють здійснювати глобальну оптимізацію з урахуванням нелінійних залежностей та нелокальних зв'язків між точками траєкторії, що особливо важливо при тривалих сеансах роботи без GNSS.

Розрізняють три рівні інтеграції: слабку (loose coupling) – обмін готовими координатами між підсистемами; жорстку (tight coupling) – спільне опрацювання сирих вимірювань (псевдодальностей, фази несучої, кутових швидкостей); глибоку (deep coupling) – інтеграція на рівні слідкуючих контурів сигналу. Жорстка та глибока інтеграція забезпечують збереження працездатності системи навіть за наявності лише 2–3 видимих супутників, чого недостатньо для класичного RTK.

Сценарії застосування для маркшейдерських задач:

– аерофотозйомка БПЛА в зоні з підвищеним рівнем глушіння. Базовою конфігурацією є RTK-приймач + IMU + камера з функцією VIO. У разі втрати RTK-фікса позиціонування зберігається за рахунок IMU/VIO, а при поверненні зв'язку – корегується через жорстку фузію. Пройдена ділянка з втратою GNSS додатково контролюється наземними контрольними точками (GCP);

– наземна тахеометрична зйомка з використанням GNSS-приймача в умовах періодичного глушіння. Перехід в режим IMU-доповненого позиціонування з подальшим RTK-уточненням опорних пунктів;

– підземна маркшейдерська зйомка. LiDAR-SLAM як основний метод позиціонування з прив'язкою до маркшейдерських реперів виходу з підземних виробок.

Порівняльний аналіз основних підходів до позиціонування для маркшейдерських задач наведено в табл. 1.

Таблиця 1.

Порівняльна характеристика методів позиціонування для маркшейдерських задач

Метод	**Точність**	**Дрейф з часом**	**Незалежність від GNSS**	**Робота в підземних виробках**	**Орієнтовна вартість обладнання**
GNSS RTK	1–3 см	відсутній (при фікс. рішенні)	низька	неможлива	$5–15 тис.
GNSS RTK + MEMS IMU	2–5 см	1–5 м за 1 хв без GNSS	середня	неможлива	$7–20 тис.
Тактичний IMU автономно	1–10 м/хв (дрейф)	значний	повна	можлива	$15–50 тис.
Візуально-інерційна одометрія (VIO)	0,1–0,5 % від пройденої відстані	накопичується	повна	обмежена	$2–10 тис.
LiDAR-SLAM (наземний)	2–10 см	низький (замикання петель)	повна	основний метод	$20–80 тис.
UWB локальна мережа	5–30 см	відсутній	повна	можлива	$5–15 тис. на мережу
Псевдолайти	5–50 см	відсутній	часткова	можлива	від $30 тис.

Висновки. Глушіння та спуфінг GNSS-сигналу в умовах воєнного стану формують нові вимоги до маркшейдерського забезпечення гірничих робіт. Класична RTK-зйомка перестає бути достатньо надійною, що потребує переходу до гібридних систем позиціонування з кількома незалежними джерелами координатної інформації. Перспективним є комбінування MEMS-IMU тактичного класу з візуальною одометрією для БПЛА-зйомки та LiDAR-SLAM для наземних задач, з обов'язковим використанням алгоритмів детектування спуфінгу (RAIM, AIME, нейромережний аналіз сигнальних характеристик). Подальші дослідження доцільно спрямувати на розробку методики оцінки точності гібридних систем у конкретних виробничих умовах та на адаптацію відкритих SLAM-алгоритмів до специфіки кар'єрних об'єктів України.

Список використаних джерел:

1. Humphreys T.E. Detection Strategy for Cryptographic GNSS Anti-Spoofing // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. 2013. Vol. 49, № 2. P. 1073–1090. DOI: 10.1109/TAES.2013.6494402

2. GPSJam: Daily maps of GPS interference. URL: https://gpsjam.org

3. EUROCONTROL Voluntary ATM Incident Reporting (EVAIR) Bulletin: GPS Outages and Spoofing in Europe, 2024.

4. Shan T., Englot B., Meyers D., Wang W., Ratti C., Rus D. LIO-SAM: Tightly-coupled Lidar Inertial Odometry via Smoothing and Mapping // IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). 2020. P. 5135–5142.

5. Xu W., Cai Y., He D., Lin J., Zhang F. FAST-LIO2: Fast Direct LiDAR-Inertial Odometry // IEEE Transactions on Robotics. 2022. Vol. 38, № 4. P. 2053–2073.

6. Campos C., Elvira R., Rodríguez J.J.G., Montiel J.M.M., Tardós J.D. ORB-SLAM3: An Accurate Open-Source Library for Visual, Visual-Inertial and Multi-Map SLAM // IEEE Transactions on Robotics. 2021. Vol. 37, № 6. P. 1874–1890.

7. Скорик М.А., Гнітецький О.М., Котенко В.В. Практичний досвід використання GNSS-приймача Matrix II з IMU і технологію SMART Laser RTK для маркшейдерських робіт // Тези Всеукраїнської науково-практичної конференції до Дня науки. Житомир: «Житомирська політехніка», 2025.

8. Янович О.А., Левицький В.Г. Підвищення точності маркшейдерського забезпечення гірничих робіт шляхом застосування RTK-технологій в безпілотних літальних апаратах // Тези Всеукраїнської науково-практичної конференції до Дня науки. Житомир: «Житомирська політехніка», 2025.

УДК 622.271

Мисенко Я.В., аспірант
Науковий керівник: Фролов О.О., д.т.н., проф.,
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ОСНОВНІ ЗАСАДИ ОЦІНЮВАННЯ МЕТОДІВ ПІДВИЩЕННЯ НАФТОВІДДАЧІ ПЛАСТІВ

Останніми роками у світі дедалі більше погіршується структура залягання нафти, тобто частка родовищ із запасами, які важко видобути, зростає. Через це та через неефективність робіт щодо збільшення нафтовіддачі відбувається постійне зниження видобутку нафти. Частка складних світових запасів нафти останніми роками наближається до 60 %. Ефективність вилучення нафти сучасними промислово-освоєними методами збільшення нафтовіддачі (МЗН) нині вважається незадовільною, оскільки середня кінцева нафтовіддача пластів становить 35-40 %. Причому споживання нафти у світі постійно зростає.

На сьогоднішній день можливі два шляхи поповнення сировинної бази:

- ✓ розвідка, відкриття і освоєння нових родовищ;
- ✓ підвищення ступеня вилучення запасів на родовищах, що розробляються.

Відкриття та введення в експлуатацію нових родовищ пов'язано з дуже великими витратами, особливо з огляду на те, що ці родовища знаходяться в основному у важкодоступних районах.

Тому однією з найбільш актуальних завдань нафтової галузі є застосування нових сучасних технологій нафтовидобутку, що дозволяють значно збільшити нафтовіддачу покладів, які вже розробляються і на яких традиційними методами видобути значні залишкові запаси нафти вже неможливо.

З метою підвищення економічної ефективності розробки родовищ, зниження прямих капітальних вкладень та максимально можливого використання інвестицій весь термін розробки родовища прийнято поділяти на три основні етапи.

На першому етапі для видобутку нафти максимально можливо використовується природна енергія пласта (пружна енергія, енергія розчиненого газу, енергія законтурних вод, газової шапки, потенційна енергія гравітаційних сил). При визначенні доцільності первинної розробки покладу в природному режимі необхідно враховувати переваги цього режиму, які полягають у рівномірному розподілі пластової енергії по всьому об'єму пласта, що сприяє максимальному охопленню покладу процесом нафтовидобування. Це особливо важливо для неоднорідних тріщинуватих покладів, розробка яких методами, що передбачають штучний вплив на пласт, не забезпечує високої нафтовіддачі через низьке охоплення пласта впливом.

На другому етапі реалізуються вторинні методи підтримки пластового тиску шляхом закачування в пласт води або газу. Ці методи прийнято називати вторинними.

На третьому етапі підвищення ефективності розробки родовищ застосовуються третинні методи збільшення нафтовіддачі, які називають *сучасними*.

При виборі ефективного методу підвищення нафтовіддачі необхідно враховувати форми існування залишкової нафти у пласті. Враховуючи різноманіття форм існування залишкової нафти в пласті, а також велику відмінність властивостей нафти, води, газу та проникності нафтонасичених зон пластів, не може бути єдиного універсального методу збільшення нафтовіддачі. Для кожного покладу обґрунтування найбільш ефективного методу підвищення нафтовіддачі повинно проводитись на підставі комплексних досліджень, що включають лабораторно-експериментальні роботи, чисельне моделювання, дослідно-промислові роботи на дослідних ділянках покладу, техніко-економічний аналіз тощо [1].

Вибір застосовуваних технологій, як і вибір послідовності їх застосування, повинен визначатися окремо для кожного покладу з урахуванням геолого-фізичної характеристики пластів і всього комплексу досліджень, зазначених вище.

Слід зазначити, що при розробці покладів високов'язких нафт і бітумів другий етап розробки, що включає закачування води або газу в пласти, як правило, відсутній. А термічні методи застосовують у промисловому масштабі, як на першому, так і на другому етапах розробки покладу. Досвід показує, що якщо на ранній стадії починають застосовуватися третинні, зокрема термічні методи, то цим досягається більша ефективність.

За типом робочих агентів класифікація МЗН пластів може розглядатися наступним чином [2].

Гідродинамічні методи:

- зміна напряму фільтраційних потоків;
- залучення до розробки недренованих запасів;
- нестаціонарне (циклічне) заводнення;
- форсований відбір рідини.

Фізико-хімічні методи:

- витіснення нафти водними розчинами поверхнево-активних речовин (включаючи пінні системи);

• витіснення нафти розчинами полімерів;
• витіснення нафти лужними розчинами;
• витіснення нафти композиціями хімічних реагентів;
• витіснення нафти розчинниками.

Газові методи:
• вплив на пласт двоокисом вуглецю;
• вплив на пласт вуглеводневим газом;
• вплив на пласт азотом, димовими газами та ін.

Теплові методи:
• паротеплова дія на пласт;
• внутрішньопластове горіння;
• витіснення нафти гарячою водою;
• пароциклічні обробки свердловин.

Хвильові методи:
• вібросейсмічні;
• електромагнітні;
• акустичні.

Мікробіологічні методи.

Досвід показує – з точки зору впливу на пластову систему в більшості випадків реалізується комбінований принцип впливу, при якому поєднуються гідродинамічний та тепловий методи, гідродинамічний та фізико-хімічний, тепловий та хімічний (термохімічні) тощо.

Гідродинамічні методи застосовуються на родовищах, що розробляються із застосуванням холодного заводнення і належать до методів регулювання, спрямованих на збільшення охоплення пласта заводненням. Ці методи не належать до сучасних методів підвищення нафтовіддачі, тому що при їх застосуванні не змінюється механізм витіснення нафти в порівнянні, наприклад, з природним пружноводонапірним режимом. Тому застосування гідродинамічних методів дозволяє підвищити нафтовіддачу пласта лише на 5-8%.

До сучасних МЗН у всьому світі відносять теплові, фізико-хімічні та газові методи, які здатні кардинально підвищити нафтовіддачу пласта.

У зв’язку з підвищеною залучення в активну розробку у світі величезних ресурсів високов’язких нафт і бітумів, вважається, що основною технологією розробки таких покладів термічні методи.

Сучасні методи підвищення нафтовіддачі значно складніші та вартісні, ніж традиційні. При застосуванні цих методів у пластах відбуваються дуже складні процеси: фазові переходи, хімічні реакції та перетворення речовин, капілярні і гравітаційні процеси та ін. Ці процеси поки що недостатньо вивчені та вимагають спеціальних фундаментальних досліджень. Успішне застосування цих методів можливе лише на підставі науково-обґрунтованих рішень, для виконання яких необхідне детальне вивчення особливостей геолого-фізичних характеристик об’єкта, знання механізму процесів, що відбуваються у пласті та ролі цих процесів у нафтовидобуванні.

Також для кожного методу існують свої критерії застосування, які обумовлені особливостями реалізованого процесу розробки. Проте є загальні всім методів критерії, які визначають ефективність і доцільність застосування методів підвищення нафтовіддачі.

Слід особливо відзначити, що з важливих завдань, які вирішуються при розробці покладів, є об’єктивна оцінка ефективності застосовуваних методів підвищення нафтовіддачі за промисловими даними. Особливо це важливо на стадії дослідних робіт, у яких вирішується питання доцільності промислового застосування методу розробки усього родовища.

Ефективність методів повинна визначатись різними способами залежно від характеру прояву ефекту. При цьому повинні використовуватися тільки дані, що повною мірою характеризують технологію, що випробовується. Аналізувати та приймати рішення щодо застосування МЗН повинні визначати фахівці, які добре знають особливості геолого-фізичної характеристики родовища, а також розуміють механізм процесів, що відбуваються в пласті, а методика оцінки ефективності застосовуваних методів залежить від цього, який стадії розробки поклади вони застосовуються – у початковій чи пізній.

Слід зазначити, що кінцева нафтовіддача повинна визначатися економічними критеріями. По мірі розробки покладу на пізній стадії різко знижується видобуток нафти і одночасно зростає його обводненість. При цьому зростають витрати на видобування і видобуток нафти стає нерентабельним.

Список використаних джерел:

1. Купер, І. М. Підвищення нафтовилучення на родовищах України / І. М. Купер // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. - 2016. - № 3. - С. 19-25.

2. Рубель, В. П., А. О. Ворчак, Д. О. Куценок. "Сучасні методи підвищення нафтовіддачі." Матеріали круглого столу «основні тенденції розвитку нафтогазової галузі – 2024». - 2024.- С. 28-30.

УДК 622.235

Михайлов Є.К., магістр
Савчик Р.В., студент, 3 курс
Науковий керівник: Фролов О.О., д.т.н., проф.,
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ РУЙНУВАННЯ СКЕЛЬНИХ ПОРІД ВИБУХОМ У ПРОГРАМНОМУ КОМПЛЕКСІ WIPWARE

WipWare – це програмний комплекс, який спеціалізується на оптичному аналізі сипучих матеріалів. Застосовувані технології дозволяють оцінювати розмір, форму, колір та об'єм частинок, використовуючи фото- та відеоаналіз [1]. Аналіз результатів руйнування скельних порід виконано у модулі WipFrag, який призначено для аналізу фотографій матеріалу, зокрема – визначення гранулометричного складу (PSD); вимірювання форм та площ частинок; виділення наднормових фрагментів; аналіз великих скупчень матеріалу після вибухів або маленьких лабораторних зразків;

На рис. 1 наведено фотографія розвалу гірничої маси після масового вибуху на блоці кар'єра ПрАТ «Полтавський ГЗК». У WipFrag виконаємо фрагментацію шматків породи на поверхні блоку (рис. 2).

Рис. 1. Розвал гірничої маси на промисловому блоці після масового вибуху

Рис. 2. Фрагментація шматків гірничої маси на поверхні промислового блоку у WipFrag

На рис. 3 приведено результати аналізу гранулометричного складу гірничої маси на розвалі промислового блоку після виконання масового вибуху.

Показники D01, D20, D50, D80 та D99 – це характерні гранулометричні параметри [2]. Кожне зі значень Dxx означає розмір частинок, менший або рівний якому має певний відсоток матеріалу.

Для аналізу гранулометричного складу, наведеного на рис. 4.14 маємо:

- ✓ D01 = 52,91 мм – 1 % матеріалу має розмір 52,91 мм, це показник найдрібнішої частини вибірки;
- ✓ D20 = 188,42 мм – 20 % фрагментів мають розмір 188,42 мм і менше;
- ✓ D50 = 299,78 мм – медіанний розмір шматка, тобто 50 % матеріалу дрібніше нього, а 50 % – крупніше;

✓ D80 = 423,35 мм – 80 % частинок мають розмір 423,35 мм і менше. Це одне з ключових значень для контролю якості вибухових робіт та дроблення;

✓ D99 = 651,27 мм – 99 % фрагментів мають розмір менше приблизно 1 метра, тобто значення характеризує «негабарит» розподілу – найбільші шматки.

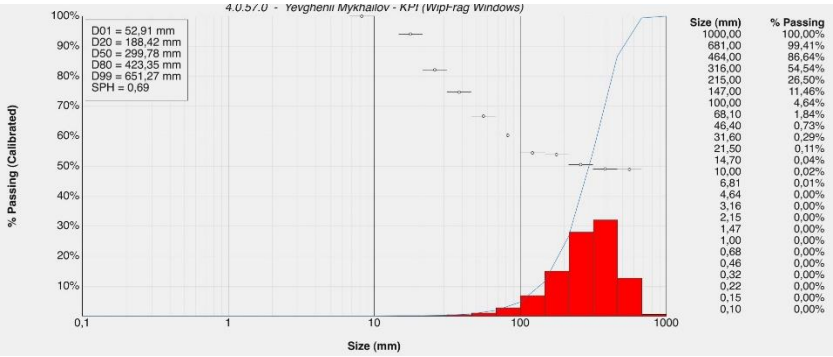


Рис. 3. Розподіл шматків гірничої маси на розвалі промислового блоку після вибуху за фракціями

Показник SPH (sphericity) на рисунку означає сферичність частинок. Якщо його значення становить 1,0, то це ідеальна сфера. В нашому випадку SPH = 0,69, тобто частинки помірно витягнуті або сплюснуті; по суті це показник лещадності.

На рис. 4 наведено фактичний графік гранулометричного розподілу гірничої маси на розвалі (синій колір) та усереднений (апроксимований) (червоний колір).

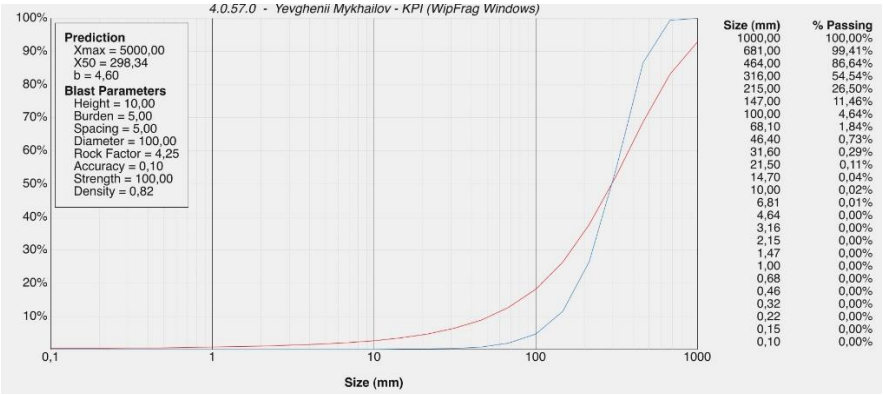


Рис. 4. Гранулометричний розподіл гірничої маси: синій колір – фактичний; червоний– усереднений

Показники на зображені в блоці Prediction (Прогноз) означають наступне:

- Xmax = 5000,00 – максимальний розмір фрагментів гірничої маси, що використовується в моделі прогнозу (верхня межа розподілу);
- X50 = 298,34 – прогнозоване медіанне значення (аналог D50): 50 % матеріалу очікується дрібніше 298,34 мм;
- b = 4,6 – коефіцієнт форми кривої розподілу: визначає «крутизну» та форму кривої гранулометрії.

В блоці Blast Parameters (Параметри вибуху): Height = 10,00 – висота забою, м; Burden = 5,00 – відстань від свердловини до вільної поверхні, м; Spacing = 5,00 – відстань між свердловинами в ряду, м; Diameter = 100,00 – діаметр свердловини, мм; Rock Factor = 4,25 – фактор гірської породи, що відображає міцність, тріщинуватість і структуру; Accuracy = 0,10 – похибка розрахунку; Strength = 100,00 – енергетична характеристика вибухової речовини; Density = 0,82 – щільність ВР, в г/см^3 або у відносній величині.

Таким чином, програмний комплекс WipWare, а саме його модуль WipFrag, дозволяє з достатньою точністю оцінити стан руйнування скельних гірських масивів вибухом свердловинних зарядів.

Список використаних джерел:

1. Jeong-Hun Han, Jae-Joon Song Statistical estimation of blast fragmentation by applying stereophotogrammetry to block piles // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2014, vol. 68, pp. 150-158.

2. Офіційний сайт - https://wipware.com/ru/products/wipfrag/.

УДК-528.72:551.435.62

Мітченко Д.В., Головний маркшейдер ПРАТ «ПІВНГЗК»,
Аспірант, 3 курс, ГР-23а,
Гірничо-металургійний факультет
Науковий керівник: Долгіх О.В., доц., к.т.н.
Криворізький національний університет

ОЦІНКА ТОЧНОСТІ ВИЗНАЧЕННЯ ОБ'ЄМНИХ ЗМІН ЗСУВНИХ МАС ЗА ДАНИМИ НАЗЕМНОГО ЛАЗЕРНОГО СКАНУВАННЯ

Зсувні процеси належать до найбільш небезпечних геодинамічних явищ, що призводять до значних деформацій рельєфу та можуть спричиняти пошкодження інженерних споруд, транспортної інфраструктури і гірничих об'єктів. Ефективний моніторинг таких процесів потребує отримання високоточної просторової інформації про зміни поверхні та об'єми переміщених мас. Традиційні геодезичні методи спостережень, зокрема тахеометричні та GNSS-вимірювання, забезпечують достатню точність визначення координат окремих контрольних точок, проте не дозволяють отримувати детальну просторову модель деформованої поверхні. У зв'язку з цим актуальним є застосування сучасних технологій тривимірного моделювання, зокрема наземного лазерного сканування, яке забезпечує формування щільних хмар точок та детальне відтворення геометрії досліджуваної ділянки [1].

Наземне лазерне сканування дозволяє отримувати високоточні тривимірні дані про поверхню схилів і техногенних відвалів, що створює передумови для визначення просторових деформацій та об'ємних змін зсувних мас шляхом порівняння моделей поверхні, побудованих у різні моменти часу. При цьому важливим завданням є оцінювання точності отриманих результатів, оскільки результати розрахунків можуть залежати від ряду факторів, зокрема точності геодезичної прив'язки сканів, щільності хмари точок, геометрії розташування станцій сканування, також методів обробки та інтерполяції просторових даних [2].

У роботі запропоновано підхід до оцінювання об'ємних змін зсувних мас на основі порівняння цифрових моделей поверхні, сформованих за результатами повторних циклів наземного лазерного сканування. Отримані хмари точок проходять попередню обробку, що включає фільтрацію шумів, класифікацію та приведення даних до єдиної системи координат. Після цього формуються цифрові моделі поверхні досліджуваної ділянки для різних етапів спостережень, а визначення змін рельєфу здійснюється шляхом аналізу різниці між відповідними моделями. Такий підхід дозволяє встановити просторовий розподіл деформацій та виконати розрахунок об'ємів переміщених мас у межах зсувної ділянки [3].

Аналіз точності визначення об'ємних змін базується на оцінці похибок побудови цифрових моделей поверхні та статистичному аналізі відхилень між наборами даних різних етапів спостережень. Встановлено, що найбільший вплив на результати розрахунків мають похибки геодезичної прив'язки сканів, нерівномірність щільності хмари точок та геометрія сканування, що визначає наявність зон затінення та різну точність відтворення поверхні. Підвищення точності визначення об'ємних змін досягається за рахунок оптимізації розташування станцій сканування, забезпечення достатнього перекриття сканів та використання високоточної геодезичної основи.

Для оцінювання достовірності результатів враховується сумарна похибка цифрових моделей, сформована похибками первинних вимірювань, реєстрації хмар точок та інтерполяції поверхні. Критерієм значущості змін є перевищення різниці висот між моделями подвоєного значення середньоквадратичної похибки, що дозволяє відокремити реальні деформації від шумів вимірювань.

Наукова новизна роботи полягає в удосконаленні підходу до оцінювання точності визначення об'ємних змін зсувних мас на основі аналізу похибок тривимірних моделей поверхні, сформованих за даними наземного лазерного сканування, що дозволяє підвищити достовірність результатів моніторингу деформацій рельєфу. Запропонований підхід забезпечує більш обґрунтовану інтерпретацію просторових змін поверхні та може бути використаний під час геодезичного моніторингу зсувних процесів, зокрема на схилах, у кар'єрах та на техногенних відвалах.

Отримані результати підтверджують високу ефективність застосування наземного лазерного сканування для дослідження зсувних процесів та оцінювання об'ємних змін деформованих мас. Використання тривимірних моделей поверхні забезпечує детальне відтворення характеру деформацій, визначення об'ємів переміщених порід і формування просторових карт змін рельєфу, що є важливою основою для прогнозування розвитку зсувних процесів та підвищення безпеки гірничо-технічних об'єктів.

Список використаних джерел:

1. Landslide detection, monitoring and prediction with remote-sensing techniques / Nicola Casagli, Emanuele Intrieri та ін. // *Nature Reviews Earth & Environment*. – 2023. – Vol. 4. – P. 51–64.

2. Landslide Deformation Extraction from Terrestrial Laser Scanning Data with Weighted Least Squares Regularization Iteration Solution / Yin Zhou, Guicheng Chen // *Remote Sensing*. – 2022. – Vol. 14, No. 12. – Article 2897.

3. Terrestrial laser scanning for deformation monitoring and surface change detection // *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. – 2018. – Vol. XLII-2. – P. 701–708.

УДК 622.1:528.024

Назаров Р.А., аспір. 1 курсу гр. ГР-25а гірничо-металургійного факультету
Науковий керівник: Долгіх О.В., к.т.н., доц.
Криворізький національний Університет

ВИКОРИСТАННЯ РУЧНИХ ЛАЗЕРНИХ СКАНЕРІВ ПРИ ВИЗНАЧЕННІ ОБ'ЄМІВ ГІРСЬКОЇ МАСИ НА СКЛАДАХ ТА ПУНКТАХ ЇЇ ПЕРЕВАНТАЖЕННЯ

Одним з важливих елементів ефективної роботи гірничодобувного підприємства є виконання обліку гірської маси на складах та пунктах перевантаження. Ця робота лягає на плечі маркшейдера, який використовує для цього, як правило, інструменти, які на даний час найбільш ефективні та є в наявності. До недавнього часу такими приладами були електронні тахеометри та GNSS-приймачі. Перевагу мають електронні тахеометри з безвідбивним режимом, які дозволяють дистанційно виконувати вимірювання недоступних місць. Головним їх недоліком є необхідність виконання перестановок приладу в умовах складного рельєфу на об'єкті, так як необхідно забезпечити пряму видимість на точки знімання та пункти опорної мережі. Також необхідно виконувати роботу з помічником, який ходить з віхою [1]. Щодо GNSS, які дозволяють отримувати координати точок у будь якому місці, де є зв'язок із супутниками, недоліком є потреба у встановленні приладу безпосередньо на точці, координати якої необхідно визначати, та неможливість виконувати вимірювання в місцях з обмеженим доступом [1]. Основним недоліком тахеометра та GNSS при зніманнях складних поверхонь, є необхідність фіксування великої кількості точок, що призводить до витрат великої кількості часу на виконання роботи.

В умовах гірничодобувних підприємств добре себе зарекомендували ручні лазерні сканери, які дозволяють швидко отримувати детальну 3D-модель поверхні, яка містить мільйони точок [2], що підвищує точність визначення об'ємів, особливо у випадку складного рельєфу об'єкту. Лазерні сканери не залежать від супутникового сигналу і можуть добре працювати в приміщеннях, де GNSS взагалі не працюють, а використання тахеометра може бути суттєво обмеженим через наявність великої кількості перешкод. Важливою перевагою використання лазерного сканера є можливість дистанційного вимірювання у зонах, в яких перебування людини небезпечне або обмежене. Також, завдяки високій швидкості виконання робіт з використанням лазерного сканеру, скорочується час простою обладнання, якщо на момент виконання маркшейдерського заміру є необхідність в його зупинці.

Особливість ручних лазерних сканерів полягає в тому, що вони компактні і дозволяють виконувати сканування в русі. Робота при цьому складається з таких основних етапів: встановлення сканера на початкову точку; обхід об'єкта сканування по периметру за принципом, що ми бачимо очима, те зможе «побачити» і сканер (під час обходу виконуємо зупинки для встановлення сканера на заздалегідь закоординовані марки для прив'язки до необхідної системи координат). Обхід слід виконувати спокійно, звичайним шагом, не допускаючи різких рухів зі сканером з одного боку до іншого, що запобігає виникненню геометричних викривлень повернення на початкову точку для «замикання» знімання; обробка результатів знімання за допомогою відповідного програмного забезпечення з подальшим опрацюванням цифрової моделі.

Іншим нюансом є тривалість сканування – вона не повинна перевищувати 20 хвилин [2] для запобігання виникнення ситуації, коли результати знімання не можна буде опрацювати. Слід також розумно використовувати можливості сканера та враховувати, що дальність сканування, заявлену виробником, необхідно ділити на 2, а інколи на 3 або 4, якщо роботи виконуються на об'єкті з поверхнею з низькою відбивною здатністю, що дозволить отримати реальну дальність впевненого сканування об'єкта. Підсумовуючи, можна виділити наступні переваги використання ручних лазерних сканерів: безпечність робіт зі сканування забезпечується виконанням знімання з безпечної відстані, без необхідності підійматися на рухомі штабелі; можлива робота в приміщеннях, якими можуть бути склади, де зберігається гірська маса та знаходиться велика кількість обладнання і металоконструкцій, що заважає при роботі з тахеометром; оперативність робіт при зніманнях складного рельєфу; висока точність та деталізація, так як при скануванні створюється щільна хмара, що містить сотні тисяч і навіть мільйони точок, які покривають усі нерівності поверхні.

Список використаних джерел:

1. Panasiuk, A. V.; Shlapak, V. O.; Tarnavskyi, D. O.; Shapar, Ya. R. (2025). Integration of GNSS technologies into the geodetic monitoring and mining transport management system. Technical Engineering, No. 2(96), pp. 305–312. DOI: 10.26642/ten-2025-2(96)-305-312 (date of access: 14.04.2026).
2. Determination of accuracy and usability of a SLAM scanner geoslam zeb horizon: a bridge structure case study / R. Urban et al. Applied sciences. 2024. Vol. 14, no. 12. P. 5258. URL: https://doi.org/10.3390/app14125258 (date of access: 14.04.2026).

УДК 528.48:004.932

Напіральський О.Г., студент 3 курсу
Юхимчук В.В., студент 3 курсу
Державний університет «Житомирська політехніка»

ЗАСТОСУВАННЯ SLAM-ТЕХНОЛОГІЙ У ВИКОНАННІ ГЕОДЕЗИЧНИХ ТА ЗЕМЛЕВПОРЯДНИХ РОБІТ

Розвиток технологій збору геопросторових даних протягом останнього десятиліття значною мірою змістив акценти у виборі інструментарію для виконання геодезичних та землевпорядних робіт. Класичні методи - тахеометрична та GNSS-зйомка - залишаються базовими, однак мають принципові обмеження в умовах щільної міської забудови, всередині будівель, на лісистих територіях та в підземних просторах. Тахеометричні вимірювання вимагають прямої видимості між пунктами та виконання послідовних станцій, GNSS-приймачі втрачають точність через багатошляхове поширення сигналу в каньйонах вулиць і взагалі непрацездатні в приміщеннях, наземне лазерне сканування (TLS) забезпечує високу точність, але є повільним і потребує зовнішньої прив'язки кожної установки приладу. У цьому контексті технології SLAM (Simultaneous Localization and Mapping - одночасна локалізація та побудова карти) забезпечують безперервне знімання у русі без зовнішніх опорних сигналів і відкривають нові можливості для геодезичної та землевпорядної практики.

Метою дослідження є аналіз можливостей, обмежень та доцільності застосування SLAM-технологій у виконанні геодезичних та землевпорядних робіт у конкретних виробничих сценаріях.

SLAM - клас алгоритмів, які забезпечують одночасну побудову карти невідомого середовища та оцінку положення сенсора в цій карті. Технологія базується на інтеграції даних кількох сенсорів (як правило: LiDAR, IMU, RGB-камера) у єдиний обчислювальний контур, що в реальному часі формує тривимірну хмару точок і траєкторію руху платформи. Принциповою особливістю SLAM, що відрізняє його від простої одометрії, є виявлення замикання петлі (loop closure) - розпізнавання повторного відвідування раніше пройдених ділянок. При замиканні петлі алгоритм оптимізує всю накопичену траєкторію та усуває дрейф, що забезпечує глобальну консистентність карти. Сучасні відкриті реалізації - LIO-SAM, FAST-LIO2, ORB-SLAM3, RTAB-Map, Cartographer - досягають реального часу обробки на стандартному обчислювальному обладнанні.

За типом основного сенсора SLAM-системи поділяються на чотири класи. LiDAR-SLAM, що використовує лазерні скани (Velodyne, Livox, Hesai, Ouster), забезпечує точність побудови траєкторії 2–5 см на сесіях довжиною до 200–500 м і є найнадійнішим у геометрично багатих сценах. Visual SLAM на базі звичайних RGB-камер є найдешевшим у реалізації, проте чутливим до освітлення та текстурованості сцени. Visual-Inertial SLAM (VIO), який поєднує камеру з інерційним модулем, забезпечує точність порядку 0,1–0,5 % від пройденої відстані. Мульти-сенсорний SLAM, що інтегрує LiDAR, IMU та камеру одночасно, є технологічним стандартом сучасних професійних сканерів.

За формою носія сучасні SLAM-сканери поділяються на ручні (GeoSLAM ZEB-Horizon, Leica BLK2GO), які оператор переносить у руці під час пішохідної зйомки; носимі (NavVis VLX) ранцевого типу, що забезпечують тривалі знімальні сесії; БПЛА-кріплені (Emesent Hovermap, DJI Zenmuse L2) для зйомки з висоти або всередині важкодоступних просторів; автомобільні мобільні картографічні системи для зйомки протяжних лінійних об'єктів. Найбільш розповсюдженими у геодезичній та землевпорядній практиці є ручні системи завдяки балансу між мобільністю, ціною та точністю.

На основі аналізу літературних джерел та практичного досвіду виконання геодезичних робіт визначено вісім типових сценаріїв доцільного застосування SLAM-технологій.

1. Кадастрові зйомки в умовах щільної міської забудови. У вуличних каньйонах між високими будівлями GNSS-приймачі демонструють похибки до 5–15 м через багатошляхове поширення сигналу, а тахеометрична зйомка ускладнена через необхідність множинних станцій. Ручний SLAM-сканер при пішохідному обході периметра ділянки за 10–15 хвилин фіксує як точки на земній поверхні, так і фасади оточуючих будівель, забезпечуючи планову точність 3–5 см без використання опорних точок та 1–2 см при інтеграції GCP.

2. Технічна інвентаризація будівель та споруд. Один прохід оператора зі SLAM-сканером через будівлю дає тривимірну модель усіх внутрішніх приміщень, придатну для автоматизованої побудови поверхових планів, обчислення площ та об'ємів, виявлення неузгодженостей з технічною документацією. Час зйомки звичайної квартири складає 5–7 хв, поверху багатоквартирного будинку - 25–40 хв.

3. Документування пошкоджених будівель. Високоактуальний для України сценарій. Швидке безконтактне фіксування стану частково зруйнованих споруд у небезпечних умовах, де класичні методи геодезичної зйомки практично нездійсненні. Сесія тривалістю 20–30 хвилин дає повноцінний 3D-запис стану об'єкта для документування збитків, проектних рішень з відновлення та юридичних процедур.

4. Землевпорядні роботи на лісистих та закритих рослинністю територіях. Робота під щільним кроновим намітом, де GNSS-сигнал затінений, а класичне нівелювання утруднене. SLAM-сканер забезпечує безперервну зйомку рельєфу та межових знаків.

5. Документування об'єктів культурної спадщини. Храми, фортечні споруди, історичні центри міст, археологічні розкопки. SLAM забезпечує комплексне 3D-фіксування об'єкта без втручання у його структуру.

6. Зйомка підземних споруд та інженерних мереж. Колекторні тунелі, підвальні приміщення, шахтні виробки, каналізаційні системи. У більшості з цих умов SLAM є практично єдиним мобільним методом тривимірної зйомки.

7. Моніторинг будівельних майданчиків. Контроль ходу робіт, обчислення обсягів виконаних робіт, верифікація відповідності проекту через регулярні SLAM-сесії, інтегровані з BIM-моделлю.

8. Кризова та аварійна геодезична зйомка. Ситуації, що вимагають негайного збору геопросторових даних: ділянки після стихійних лих, обвалів, провалів. Швидкість розгортання SLAM-системи (5–10 хвилин на місці) є критичною перевагою.

Порівняльна характеристика SLAM-технологій з основними альтернативними методами геодезичних та землевпорядних робіт наведена в табл. 1.

Таблиця 1.

Порівняння SLAM-технологій з традиційними методами геодезичних та землевпорядних робіт

Метод	Точність планова	Точність висотна	Робота в приміщеннях	Швидкість зйомки	Орієнтовна вартість
Тахеометр	1–3 мм	1–3 мм	так	низька	середня
GNSS RTK	1–3 см	2–4 см	ні	висока	середня
Наземний LiDAR (TLS)	2–5 мм	2–5 мм	так	середня	висока
Аеро-фотограмметрія	3–5 см	4–8 см	ні	висока	низька
Ручний SLAM-сканер	**3–5 см (1–2 з GCP)**	**3–5 см**	**так**	**дуже висока**	**середня**
БПЛА LiDAR-SLAM	**5–10 см**	**5–10 см**	**обмежено**	**висока**	**висока**

Серед основних обмежень технології SLAM слід відзначити: накопичення дрейфу при тривалих сесіях без замикання петлі (понад 0,5–1 % від пройденої відстані); зниження якості траєкторії в геометрично однорідних сценах (довгі коридори без виразних структурних особливостей, відкриті поля); чутливість до динамічних об'єктів у сцені (рух людей, транспорту), які можуть бути помилково сприйняті як стаціонарні елементи карти; необхідність перехресної прив'язки до державної геодезичної мережі для отримання абсолютних координат у системі координат УСК-2000.

Висновки. SLAM-технології не замінюють традиційні геодезичні методи, а доповнюють їх, забезпечуючи ефективність у тих сценаріях, де класичні підходи мають принципові обмеження: щільна забудова, інтер'єри будівель, лісисті та закриті простори, підземні споруди, аварійні зйомки. Для України особливо актуальним є застосування ручних SLAM-сканерів при документуванні пошкоджених війною будівель, оперативному оновленні кадастрових даних та інвентаризації об'єктів культурної спадщини. Перспективними напрямами є інтеграція SLAM з ГІС-платформами для автоматизованого формування землевпорядної документації, застосування методів машинного навчання для семантичної класифікації хмар точок (виділення меж земельних ділянок, конструктивних елементів будівель, рослинності) та розробка стандартизованих методик контролю якості SLAM-зйомок для офіційного включення цієї технології в нормативну базу геодезичних робіт України.

Список використаних джерел:

1. Cadena C., Carlone L., Carrillo H., Latif Y., Scaramuzza D., Neira J., Reid I., Leonard J.J. Past, Present, and Future of Simultaneous Localization and Mapping: Toward the Robust-Perception Age // IEEE Transactions on Robotics. 2016. Vol. 32, № 6. P. 1309–1332. DOI: 10.1109/TRO.2016.2624754

2. Shan T., Englot B., Meyers D., Wang W., Ratti C., Rus D. LIO-SAM: Tightly-coupled Lidar Inertial Odometry via Smoothing and Mapping // IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). 2020. P. 5135–5142.

3. Xu W., Cai Y., He D., Lin J., Zhang F. FAST-LIO2: Fast Direct LiDAR-Inertial Odometry // IEEE Transactions on Robotics. 2022. Vol. 38, № 4. P. 2053–2073.

4. Campos C., Elvira R., Rodríguez J.J.G., Montiel J.M.M., Tardós J.D. ORB-SLAM3: An Accurate Open-Source Library for Visual, Visual-Inertial and Multi-Map SLAM // IEEE Transactions on Robotics. 2021. Vol. 37, № 6. P. 1874–1890.

5. Lehtola V.V., Kaartinen H., Nüchter A., Kaijaluoto R., Kukko A., Litkey P., et al. Comparison of the Selected State-Of-The-Art 3D Indoor Scanning and Point Cloud Generation Methods // Remote Sensing. 2017. Vol. 9, № 8. 796. DOI: 10.3390/rs9080796

6. Городинська М.В., Котенко В.В. Докладне картування гірничих виробок за допомогою лазерного сканування (LiDAR) // Тези Всеукраїнської науково-практичної конференції до Дня науки. Житомир: «Житомирська політехніка», 2025.

7. Махно А.М., Башинський С.І. Застосування методів фотограмметрії у вимірюванні мікроструктур з використанням бінокулярного мікроскопу // Тези Всеукраїнської науково-практичної конференції до Дня науки. Житомир: «Житомирська політехніка», 2025.

8. Поліщук Д.С., Панасюк А.В. Використання програмного забезпечення Agisoft Metashape в гірництві // Тези Всеукраїнської науково-практичної конференції до Дня науки. Житомир: «Житомирська політехніка», 2025.

УДК 622; 691.5

Наумов Я.О., асистент
Шамрай В.І., к.т.н., доц.
Державний університет «Житомирська політехніка»

ВИСОЛОУТВОРЕННЯ У ГЕОПОЛІМЕРНИХ МАТЕРІАЛАХ: ПРИЧИНИ ВИНИКНЕННЯ ТА МЕТОДИ МІНІМІЗАЦІЇ

У геополімерах, висолоутворення розглядаєтясь не просто як білий наліт на поверхні, а як показник того, що всередині матеріалу, ще не повністю сформувалася структура виробу. Навіть коли зразок вже набрав початкову міцність, у напівзастиглому розчині продовжують залишатися вільні іони натрію або калію, які не встигли повністю зв'язатися в гелі. Саме вони разом із водою повільно рухаються до поверхні, а після випаровування води залишають кристалічні відкладення.[1]

У більшості геополімерних в'яжучих кількість активного лугу знаходиться приблизно в межах 4–8 % від загальної маси. При нижчих значеннях, це близько 4–5 %, структура уже зазвичай, більш стабільна, і висолоутворення слабке або майже непомітне. Але коли вміст піднімається, зростає і кількість вільних іонів у напівзастиглій суміші, і ризик утворення висолів стає значно вищим. Пояснюється це доволі просто: у матеріалі є пори, заповнені водним розчином.[4] Якщо пористість висока, це приблизно 20-25 %, то вода легше переміщується всередині структури і "виносить" іони на поверхню. У більш щільних системах, а саме 12–15 %, цей процес значно слабший, бо рух рідини обмежений і при цьому сама структура не розтікається, а тримає форму. Умовно це пояснюється трьома простими залежностями:

1) висолоутворення зростає зі збільшенням вмісту лугу;
2) зі збільшенням пористості;
3) тривалий контакт з водою і подальшому висиханні.

За експериментальними даними спостерігалася типова картина: при 4–5 % Na_2O маса висолів за 28 діб зазвичай знаходиться на рівні 0,2–0,4 г на 100 см². При 6–7 % цей показник зростає приблизно до 0,6–1,1 г/100 см², а при 7–8 % може досягати 1,5 г/100 см² і більше, особливо якщо матеріал має відкриту пористу структуру [5].

Однак сам по собі підвищений вміст лужного активатора не є єдиною причиною виникнення висолів. Важливу роль у цьому процесі відіграє внутрішня структура геополімерного матеріалу, яка формується на ранніх стадіях твердіння. У перші дні після приготування суміші всередині системи одночасно відбуваються процеси розчинення алюмосилікатних компонентів, перенесення іонів та поступового формування просторової гелевої структури. На цьому етапі матеріал ще не є повністю стабілізованим, а порова система залишається достатньо відкритою для переміщення рідкої фази.

Особливістю геополімерних систем є те, що частина лужних катіонів у початковий період не бере безпосередньої участі у формуванні полімерної сітки. Такі іони залишаються у поровому розчині й можуть вільно переміщуватися всередині структури. За наявності капілярної вологи виникають умови для їх транспортування у напрямку поверхні матеріалу. Подальше випаровування води супроводжується поступовим накопиченням солей та формуванням характерних кристалічних відкладень.

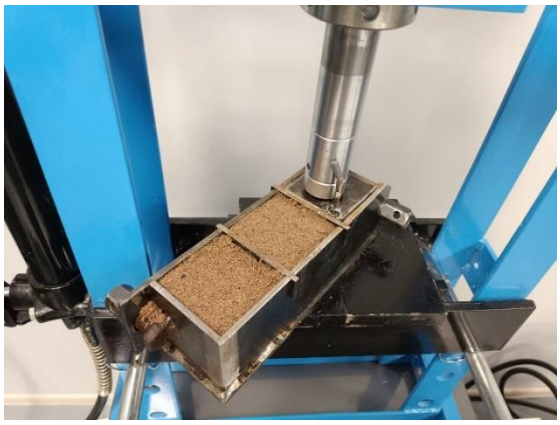
Суттєвий вплив на інтенсивність цього процесу має співвідношення між відкритою та закритою пористістю. Відкрита система пор створює безперервні канали для руху розчину, тоді як більш щільна структура обмежує перенесення вологи та іонів. Саме тому навіть матеріали з однаковим вмістом лугу можуть демонструвати різну схильність до висолоутворення. Практичні спостереження показують, що геополімери з більш компактною структурою характеризуються значно меншою інтенсивністю поверхневих відкладень навіть за однакового складу активатора.

Крім того, важливе значення мають умови навколишнього середовища. Періодичне зволоження та висушування створює циклічні процеси міграції розчинів усередині матеріалу. За таких умов інтенсивність перенесення іонів може збільшуватися, а процес висолоутворення набуває більш вираженого характеру. Особливо це проявляється на ранніх стадіях твердіння, коли структура геополімерного каменю ще не досягла достатнього ступеня ущільнення.

Рис. 1. Вплив структури геополімерного матеріалу на процеси міграції лужних іонів та утворення висолів: А – формування висолів; Б – ущільнення структури для зниження інтенсивності висолоутворення

Якщо коротко підсумувати, причина висолоутворення досить проста: у системі є надлишок лугу, який не повністю закріпився в структурі, і вода, яка переносить його до поверхні. Після випаровування води залишаються кристалічні солі у вигляді білого нальоту. Чим більш відкрита структура і чим вищий вміст лугу, тим інтенсивнішим стає цей процес [3].

А



Б

За для уникненння даної проблеми, необхідно поєднання кількох підходів. Найбільш ефективним вважається зниження кількості “вільного” лугу в складі. Це можна зробити через оптимізацію дозування активатора, тобто не перевищувати мінімально необхідний рівень Na_2O для повної полімеризації. Другий напрям - це ущільнення структури матеріалу. Чим менше відкритих пор, тим складніше воді переносити іони до поверхні. Третій підхід - це хімічне зв’язування лугу в більш стабільні форми. Наприклад, введення кальцієвмісних компонентів (шлаки, вапнякові добавки), вони мають сприяти утворенню більш щільних C-(A)-S-H структур, де частина Na^+ заміщується і стає менш рухомою. Це напряму зменшує кількість іонів, які можуть мігрувати до поверхні. І четвертий метод - це контроль твердіння. Вологе, але не сильно насичене середовище, з поступовим висиханням зменшує різкий перепад вологості, який є “рушійною силою” міграції солей. У багатьох лабораторних дослідженнях показано, що стабільне твердіння при контрольованій вологості може зменшити висолоутворення на 30–50 % [2, 5].

У підсумку можна сказати, що проблема висолоутворення в геополімерах вирішується не одним фактором, а балансом складу і структури. І саме цей баланс сьогодні є ключовим напрямом розвитку технології геополімерних матеріалів, де важливо не лише отримати міцний камінь, а й забезпечити його довготривалу стабільність без поверхневих дефектів.

Список використаних джерел:

1. Bernal, S. A., Provis, J. L., et al. (2012). *Durability of alkali-activated materials: Progress and perspectives*. Cement and Concrete Research .DOI: 10.1111/jace.12831

2. I. Khan, T. Xu, A. Castel, R.I. Gilbert, M. Babaee. Risk of early age cracking in geopolymer concrete due to restrained shrinkage. Constr. Build. Mater., 229 (2019), Article 116840. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116840

3. P. Delgado-Plana, A. García-Díaz, S. Bueno-Rodríguez, D. Eliche Quesada, Influence of NaOH molarity and Portland cement addition on performance of alkali activated cements based in silicomanganese slags, Construction and Building Materials, Dec 2023 https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133544

4. Shamrai V., Leonets I., Melnyk-Shamrai V., Patseva I., Naumov Y. Reuse of stone working enterprise slurry in geopolymer and concrete products. Mining of Mineral Deposits. 2024. Vol. 18(4). P. 10-17. https://doi.org/10.33271/mining18.04.010

5. Shamrai, V., Korobiichuk, V., Leonets, I., Melnyk-Shamrai, V., & Naumov, Y. (2025). Development of geopolymer concrete formulations based on activated stone processing sludge to reduce natural resource consumption. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, *5*(6 (137), 41–48. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2025.341720

УДК 666.32:622.785

Олійник О.В., аспірант
Державний університет «Житомирська політехніка»

ОБҐРУНТУВАННЯ РАЦІОНАЛЬНИХ ПАРАМЕТРІВ ВИКОРИСТАННЯ ГРАНІТНИХ ВІДСІВІВ У ВИРОБНИЦТВІ БУДІВЕЛЬНОЇ КЕРАМІКИ

Сучасні тенденції розвитку гірничодобувної промисловості характеризуються не лише збільшенням обсягів видобутку нерудної мінеральної сировини, але й інтенсивним накопиченням техногенних відходів, що супроводжує процеси переробки гірських порід. Однією з найбільш поширених категорій таких відходів є відсіви дроблення щебеневих кар'єрів, обсяг яких може становити до 20–30 % загальної маси переробленої сировини. Традиційно ці матеріали складуються у відвалах, що призводить до вилучення значних площ земель із господарського використання, погіршення екологічного стану територій та формування додаткових джерел пилового забруднення. Водночас сучасна концепція циркулярної економіки передбачає переорієнтацію підходів до використання техногенних матеріалів і розглядає їх як потенційний резерв вторинної мінеральної сировини [1].

Аналіз сучасних досліджень свідчить, що одним із найбільш перспективних напрямів утилізації відсівів дроблення є їх застосування у виробництві будівельної кераміки. Такий підхід зумовлений не лише екологічними аспектами, а й особливостями фізико-хімічної природи цих матеріалів. На відміну від багатьох інших видів техногенних відходів, відсіви магматичних порід характеризуються відносно стабільним мінералогічним складом та значним вмістом алюмосилікатних компонентів. Дослідження показали, що частка дрібнодисперсних фракцій розміром менше 0,63 мм сягає близько 30 %, що забезпечує високу питому поверхню та підвищену реакційну здатність матеріалу під час термічної обробки [2].

Особливий науковий інтерес становить механізм впливу відсівів дроблення на процеси структуроутворення керамічних матеріалів. Встановлено, що їх використання змінює співвідношення між пластичною та непластичною складовими формувальної маси. Зі збільшенням кількості техногенної добавки відбувається закономірне зниження пластичності керамічної шихти внаслідок зменшення частки глинистих компонентів і зростання вмісту алюмосилікатних зерен. Одночасно спостерігається зниження повітряної усадки, що позитивно впливає на стабільність геометричних параметрів сирцевих виробів та зменшує ймовірність виникнення тріщин у процесі сушіння [3].

Важливим аспектом проведених досліджень є аналіз поведінки матеріалу під час випалу. Отримані результати свідчать, що оксиди калію, натрію, кальцію та магнію, присутні у складі відсівів, виконують роль плавневих компонентів, які активізують процеси рідкофазного спікання. У процесі термічної обробки це сприяє формуванню склоподібної фази та структурному ущільненню керамічного черепка. При підвищенні температури випалу до 1100 °С інтенсифікація спікання супроводжується суттєвим зниженням відкритої пористості та збільшенням густини матеріалу. Такі зміни безпосередньо впливають на механічні характеристики виробів і свідчать про активне протікання процесів структурної перебудови.

Разом із цим встановлено, що вплив техногенної добавки не має лінійного характеру. Аналіз експериментальних даних показав екстремальну залежність між вмістом відсівів дроблення та міцністю керамічного матеріалу. Максимальні показники експлуатаційних властивостей досягаються при введенні 60–65 мас. % відсівів. За такого складу забезпечується оптимальний баланс між кількістю рідкої фази, що формується під час випалу, та жорстким кристалічним каркасом матеріалу. Подальше збільшення частки техногенної добавки призводить до надлишкового склоутворення та погіршення формостійкості виробів. Це підтверджує необхідність не лише використання вторинної сировини, а й ретельного обґрунтування її кількісного вмісту у складі шихти.

Таким чином, результати дослідження свідчать, що комплексна переробка відсівів дроблення повинна розглядатися не лише як спосіб утилізації техногенних відходів, а як інструмент керування процесами структуроутворення будівельної кераміки. Запропонований підхід дозволяє одночасно вирішувати екологічні та технологічні завдання: скорочувати обсяги техногенних накопичень, зменшувати споживання природної сировини та підвищувати експлуатаційні характеристики готових виробів. Отримані закономірності можуть бути використані як наукова основа для оптимізації технологічних режимів виробництва будівельної кераміки та розроблення ресурсозберігаючих виробничих систем.

Список використаних джерел:

1. Шамрай В.І., Мельник-Шамрай В.В., Темченко А.Г., Махно А.М., Ігнатюк Р.М. Дослідження якісних властивостей відходів каменевидобування та каменеобробки з метою їх використання як сировини для виготовлення геополімерного бетону. Технічна інженерія. 2023. Вип. 1(91). С. 385–397. https://doi.org/10.26642/ten-2023-1(91)-385-397

2. Коробійчук В.В., Леонець І.В., Шамрай В.І., Мельник-Шамрай В.В., Криворучко А.О. Шлам каменеобробних підприємств: перспективи використання як домішки в керамічній промисловості. Технічна інженерія. 2025. Вип. 1 (95). С. 138-144.

3. Terrones-Saeta, J.M.; Suárez-Macías, J.; Corpas-Iglesias, F.A.; Korobiichuk, V.; Shamrai, V. Development of Ceramic Materials for the Manufacture of Bricks with Stone Cutting Sludge From Granite. Minerals 2020, 10, 621.

УДК 624.131.4

Панарін В.І, аспірант, 1 курс, група ГС-51ф, НН ІЕЕ
Науковий керівник: Шайдецька Л.В., к.т.н., доц.
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ГЕОМЕХАНІЧНІ РИЗИКИ ТА БЕЗПЕКА ПІДЗЕМНОГО БУДІВНИЦТВА В УМОВАХ ЩІЛЬНОЇ ЗАБУДОВИ

Безпека будівництва і експлуатації споруд, оцінка рівня екологічної небезпеки, прийняття оптимальних проектних рішень повинні ґрунтуватись на достовірній інформації про стан і динаміку природно-техногенного геологічного середовища. В свою чергу геологічна будова Києва у поєднанні з високим рівнем техногенного навантаження створює унікальні геомеханічні виклики, які часто призводять до аварійних ситуацій (просідання поверхні, деформації тунелів метрополітену, активізація зсувів). Крім того, геомеханічні ризики будівництва безпосередньо залежать від берега Дніпра, а саме на Правобережжі це наявність лесових ґрунтів, які є просадними при замочуванні, глибокі розмиви або яри заповнені слабкими ґрунтами та особливу небезпеку становлять «Київські глини», які при порушенні режиму можуть спричиняти масштабні зсуви. В свою чергу на Лівобережжі переважають потужні товщі водонасичених пісків та високий рівень ґрунтових вод, де головним ризиком є пливуни та розрідження ґрунту при динамічних навантаженнях.

Тому значна частка аварій та деформацій будівель і споруд пов'язана з порушенням роботи системи «основа – фундамент» та недостатнім урахуванням інженерно-геологічних умов території. Серед усіх областей техніки цивільне будівництво, і особливо геотехніка, пов'язані з найбільш високим рівнем професійного ризику. Не дивлячись на детальні дослідження ґрунтів, складні обчислення, моніторинг майданчиків будівництва, аварії все одно відбуваються – вони неминучі, оскільки природа ґрунту та підземних вод дуже складна.

Сучасне підземне будівництво у великих містах, зокрема у місті Києві, дедалі частіше здійснюється в умовах так званої «вторинної підробки» ґрунтового масиву. Під цим поняттям доцільно розуміти повторне або багатократне техногенне порушення природного напружено-деформованого та гідрогеологічного стану геологічного середовища внаслідок попередньої забудови, прокладання інженерних мереж, улаштування підземних споруд, транспортних комунікацій, підземних переходів, колекторів, тунелів, фундаментів тощо [1, 2, 3].

У зв'язку з цим виникає необхідність у розробленні інтегрованого підходу до оцінки геомеханічних ризиків, який би враховував не лише локальні характеристики ґрунтів і конструкцій, а й системну взаємодію геологічного середовища, існуючої забудови, інженерної інфраструктури та нових підземних об'єктів.

Метою дослідження є систематизація геомеханічних ризиків підземного будівництва в умовах щільної міської забудови та обґрунтування комплексу організаційно-технічних і геотехнічних заходів, спрямованих на забезпечення безпеки підземних об'єктів в умовах інтенсивної вторинної підробки ґрунтового масиву.

Ключові геомеханічні фактори ризику в умовах Києва можна розділити за трьома ієрархічними рівнями: геоструктурним (базова стійкість масиву), урбаністичним (збереження існуючого середовища) та динаміко-техногенним (забезпечення тривалої експлуатаційної придатності). Такий підхід лежить в основі розробки інтегрованої методики оцінки безпеки підземних об'єктів у зонах інтенсивної вторинної підробки масиву». Схема розподілу геомеханічних ризиків за трьома ієрархічними рівнями (групами) наведена на рис.1.

Рис. 1. Схема розподілу за трьома ієрархічними групами (сформовано автором за допомогою ШІ ChatGPT)

Створення єдиної ГІС-моделі підземного простору Києва надало б можливість інтегрувати геологічні дані, схеми інженерних мереж та планів підземних об’єктів для прогнозування зон конфлікту. Використання методів превентивного зміцнення грунтових масивів дає можливість підготувати не придатні території до майбутнього будівництва. Окрему роль для забезпечення безпеки підземних обєктів є автоматизований моніторинг напружено-деформованого стану грунтових масивів для фіксації деформацій на ранніх стадіях, а завершальним етапом є проведення геомеханічного аудиту, тобто обов'язкова оцінка впливу нового будівництва на гідрогеологічний режим прилеглих територій [4, 5].

На основі визначених груп ризиків можна рекомендувати найпоширініші заходи щодо забезпечення безпеки підземного будівництва в умовах щільної забудови які наведено на рис. 2.

Рис. 2. Заходи щодо забезпечення безпеки підземного будівництва (сформовано автором за допомогою ШІ ChatGPT)

Геомеханічна безпека Києва залежить від переходу від точкового проектування до системного управління підземним простором. Врахування специфічних київських факторів (суфозія, зсуви, підтоплення) на етапі математичного моделювання дозволить мінімізувати ризики та забезпечити стійкість столичної інфраструктури, а розробка інтегрованої методики оцінки безпеки підземних об'єктів у зонах інтенсивної «вторинної підробки масиву» дозволить: уникнути раптових просадок ґрунту; зберегти історичні фасади будівель; зменшити вартість будівництва за рахунок точного (а не надлишкового) зміцнення тільки критичних зон.

Список використаних джерел:

1. Стовпник С. М., Ган А. Л., Шайдецька Л. В. Формування стійкості грунтового масиву навколо тунелів мілкого закладання. *Молодий вчений*. 2019. № 2 (66). С. 228–232. DOI: https://doi.org/10.32839/2304-5809/2019-2-66-51

2. Оптимізація параметрів геотехнічних споруд для стабілізації напружено деформованого стану масиву / Н. В. Зуєвська, В. Є. Губашова, Л. В. Шайдецька, М. Алталабані. *Збірник наукових праць НГУ*. 2021. № 65. С. 130–141. DOI: https://doi.org/10.33271/crpnmu/65.130

3. Прогнозування зон зі змінними фізико-механічними характеристиками грунтових масивів / Н. В. Зуєвська, Л. В. Шайдецька, Т. В. Косенко, І. О. Матвійчук. *Збірник наукових праць НГУ*. 2024. № 77. С. 118–125. DOI: https://doi.org/10.33271/crpnmu/77.118

4. Кривда К. Формування наукових основ для системного моніторингу в умовах просторової та функціональної трансформації урбанізованих територій. *Шляхи підвищення ефективності будівництва*. 2025. Вип. 56, № 2. С. 170–182. DOI: https://doi.org/10.32347/2707-501x.2025.56(2).170-182

5. Куликова Е., Іванников А. Геоінформаційні системи в геологічному моніторингу під час будівництва міських підземних споруд. *Monitoring 2019: Conference Proceedings*. 2019. Vol. 2019. P. 1–5. DOI: https://doi.org/10.3997/2214-4609.201903192

УДК 622.271

Пилипчук Д.І., аспірант
Лебеденко В.В., аспірант
Науковий керівник: Григор'єв Ю.І., к.т.н., доц.
Криворізький національний університет

СТОХАСТИЧНА ОПТИМІЗАЦІЯ ПАРАМЕТРІВ МДПК З УРАХУВАННЯМ ПОГЛИБЛЕННЯ КАР'ЄРУ ТА ШИХТУВАННЯ РУД

Впровадження систем конвеєрного транспорту у складі мобільних дробарно-перевантажувальних комплексів (МДПК) є важливим інструментом суттєвого зниження експлуатаційних витрат у глибоких залізорудних кар'єрах. Традиційно ефективність МДПК оцінюється через пряму економію на транспортуванні, проте такий підхід не відображає комплексного впливу технології на загальну економіку гірничодобувного підприємства. До того ж, впровадження МДПК супроводжується високими капітальними витратами, тому економічне обґрунтування доцільності їх використання має бути максимально детальним та всебічним.

Зниження вартості транспортування відкриває шляхи для збільшення чистої приведеної вартості (NPV). Відповідно, це дозволяє економічно обґрунтувати збільшення граничного коефіцієнта розкриву та поглиблення кар'єру, що, у свою чергу, вимагає своєчасного визначення кроку передислокації МДПК на нижні горизонти. Це забезпечує збереження стабільних обсягів видобутку багатої руди і одночасно дає змогу знизити економічний бортовий вміст для транспортування бідних руд, відпрацювання яких із застосуванням виключно автотранспорту було б нерентабельним. Раціональне поєднання цих двох потоків на буферних складах для збагачувальної фабрики сприяє збільшенню загального випуску товарної продукції. Багата руда виступає необхідним компонентом для шихтування з бідною рудою для досягнення нормативних вимог фабрики.

Проте цей процес створює технологічні обмеження. По-перше, загальні обсяги залучення бідної руди обмежуються швидкістю видобутку багатої руди для її усереднення. По-друге, використання єдиної конвеєрної лінії для транспортування обох типів сировини створює конкуренцію за пропускну здатність. Надмірний потік бідної руди може обмежити подачу багатої руди або вимагатиме закладання надлишкової потужності конвеєра, що невиправдано збільшить початкові капітальні витрати. Неконтрольоване завантаження системи бідною рудою без урахування цих обмежень призводить до накопичення некондиційних залишків та заморожування інвестицій.

Оскільки ринкова вартість готової продукції постійно змінюється, детерміновані підходи не здатні ефективно розв'язати цю багатокритеріальну задачу. У розвиток попередніх досліджень авторів [1, 2] пропонується використання гібридної стохастичної моделі. Застосовуючи метод Монте-Карло, модель враховує волатильність ринку, шихтувальні обмеження та ліміти продуктивності конвеєра як ключові змінні.

Практична цінність такого підходу полягає у забезпеченні раціонального використання надр та подовженні загального терміну експлуатації родовища. Замість безповоротних втрат мінеральної сировини у відвалах підприємство формує активний резерв. Гнучкість стохастичної моделі дозволяє адаптувати режим гірничих робіт до постійних коливань ринкових цін на сировину. У періоди сприятливої цінової кон'юнктури алгоритм максимізує залучення бідних руд з поточних горизонтів. Під час спаду цін модель концентрує транспортні потужності МДПК на пріоритетному вивезенні багатих руд для підтримки стабільної рентабельності підприємства.

Запропонований методичний підхід передбачає динамічну оптимізацію календарного плану гірничих робіт, управління рудопотоками та визначення оптимального моменту передислокації МДПК на нижні горизонти. Це дозволяє своєчасно розкривати багату руду для безперервного шихтування і при цьому не перевантажувати конвеєрну систему надлишковою бідною рудою на верхніх горизонтах. У підсумку, застосування стохастичної моделі дозволяє синхронізувати вимоги збагачувальної фабрики до якості шихти із пропускною здатністю конвеєрів, забезпечуючи максимізацію чистої приведеної вартості проєкту в умовах ринкової невизначеності.

Список використаних джерел:

1. Пилипчук Д.І., Григор'єв Ю.І., Лебеденко В.В. Стохастичне моделювання розвитку циклічно-поточної технології при відпрацюванні глибоких горизонтів залізорудних кар'єрів. *Збірник наукових праць. – 2025*.
2. Пилипчук Д. І., Григор'єв Ю. І. Стратегічна оптимізація інвестицій у МДПК: визначення моменту передислокацій, управління динамічним бортовим вмістом та оптимізація обсягу буферного складу. *Матеріали III Всеукраїнської науково-практичної конференції «Сучасні проблеми гірництва та будівництва»*.

УДК 622

Поліщук Д.С., PhD 184-23-3
Панасюк А.В., к.т.н., доц. кафедри маркшейдерії
Державний університет «Житомирська політехніка»

ПАРАМЕТРИ ЩО ВПЛИВАЮТЬ НА ВИКОНАННЯ МАРКШЕЙДЕРСЬКО-ГЕОДЕЗИЧНИХ ВИМІРЮВАНЬ ЗА ДОПОМОГОЮ БПЛА

У роботі розглянуто основні параметри, що впливають на точність маркшейдерської зйомки з використанням безпілотних літальних апаратів (БПЛА). Проведено систематизацію та опис регульованих і нерегульованих факторів впливу: висоти та швидкості польоту, перекриття знімків, кількості наземних контрольних точок, а також погодних умов та освітленості. Визначено роль кожного параметра у формуванні точності фотограмметричної моделі та підрахунку об'ємів гірничих виробок.

Застосування БПЛА в маркшейдерському забезпеченні відкритих гірничих розробок є одним із найбільш перспективних напрямків розвитку галузі. Аерофотозйомка дозволяє суттєво скоротити час виконання польових вимірювань, підвищити безпеку персоналу та мінімізувати вплив людського фактора на результат. Водночас якість і точність отриманої фотограмметричної моделі залежить від сукупності технічних та зовнішніх параметрів. Розуміння природи цих параметрів та механізму їх впливу на похибку є необхідною передумовою для грамотного планування і виконання маркшейдерської зйомки за допомогою БПЛА.

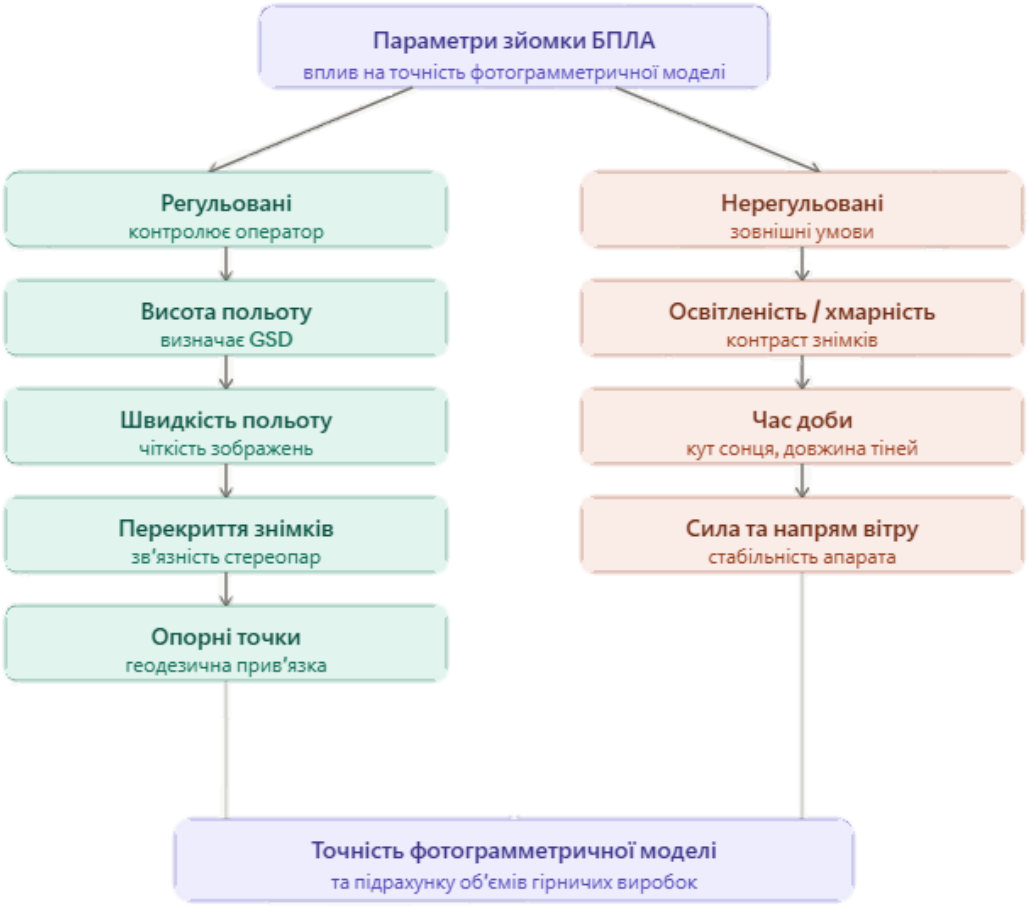


Рис. 1. Перелік параметрів що впливають на маркшейдерську зйомку за допомогою БПЛА

Усі параметри, що впливають на точність зйомки, поділяють на дві групи. Регульовані параметри – ті, якими фахівець може керувати під час планування та виконання польоту: висота та швидкість польоту, поздовжнє й поперечне перекриття знімків, кількість наземних контрольних точок (GCP), а також налаштування камери. Нерегульовані параметри – зовнішні умови, що не залежать від оператора: погодний режим, рівень освітленості, сила вітру та час доби.

Висота польоту є одним із ключових параметрів, що безпосередньо визначає розмір пікселя на місцевості (GSD – Ground Sample Distance). Зі збільшенням висоти польоту зростає GSD, тобто кожен піксель знімку охоплює більшу ділянку поверхні, що призводить до зниження деталізації та збільшення похибки моделі. На малих висотах (60–80 м) досягається GSD близько 1,5–3,0 см/піксель, що є достатнім для точного маркшейдерського моделювання сипучих відвалів та підрахунку об'ємів. На висотах понад 100 м GSD зростає до 4–6 см/піксель, що супроводжується втратою дрібних деталей рельєфу та зниженням якості стереомоделі.

Швидкість польоту впливає на чіткість зображень: надмірна швидкість за недостатньої витримки камери призводить до змазування знімків та погіршення результатів автоматичного пошуку ключових точок при фотограмметричній обробці. Рекомендована швидкість для зйомки в маркшейдерських цілях становить 5–8 м/с залежно від висоти польоту та характеристик камери.

Перекриття знімків визначає ступінь перекриття суміжних аерофотознімків – поздовжнє (вздовж маршруту) та поперечне (між маршрутами). Достатнє перекриття забезпечує формування надійних стереопар та якісну фотограмметричну прив'язку. Рекомендоване поздовжнє перекриття для маркшейдерських задач становить 75–80 %, поперечне – 65–70 %. Зменшення перекриття нижче цих значень підвищує ризик виникнення прогалин у хмарі точок та локальних деформацій моделі, тоді як надмірне перекриття збільшує кількість знімків і час обробки без суттєвого приросту точності.

Кількість наземних контрольних точок (GCP) визначає точність геодезичної прив'язки фотограмметричної моделі до системи координат. GCP – це точки з відомими координатами, визначеними за допомогою тахеометра або GNSS-приймача, які розпізнаються на знімках і використовуються для корекції моделі. Мінімальна кількість GCP для надійної прив'язки становить 5–6 точок, оптимальна – 8–12, рівномірно розподілених по периметру та всередині ділянки зйомки. Недостатня кількість або нерівномірне розміщення GCP призводить до систематичних деформацій моделі – так званого «банан-ефекту» – особливо помітного при зйомці витягнутих ділянок.

Погодні умови та освітленість є найбільш значущими нерегульованими факторами. Рівень освітленості визначає якість текстури на знімках: при сонячній погоді (освітленість 90 000–110 000 лк) знімки мають чіткий контраст, що сприяє надійному автоматичному пошуку ключових точок при фотограмметричній обробці. За хмарної погоди (освітленість нижче 35 000–40 000 лк) контраст знімків знижується, що ускладнює визначення ключових точок і збільшує похибку стикування (reprojection error) на 30–50 %. Особливо негативний ефект хмарність справляє на зйомку поверхонь з однорідною текстурою – сипучих відвалів, піщаних кар'єрів – де втрата деталізації безпосередньо погіршує точність підрахунку об'ємів.

Час доби пов'язаний з освітленістю та кутом падіння сонячних променів. Зйомка в полуденні години забезпечує рівномірне освітлення поверхні та мінімальну довжину тіней, що покращує якість фотограмметричної реконструкції. Ранкові та вечірні години, навпаки, характеризуються довгими тінями, які можуть маскувати деталі рельєфу та ускладнювати побудову хмари точок у затінених зонах.

Сила та напрям вітру впливають на стабільність БПЛА під час польоту. При вітрі понад 8–10 м/с можливі відхилення від запрограмованого маршруту, нахил апарата та, як наслідок, геометричні спотворення знімків. Крім того, сильний вітер може спричиняти вібрацію камери, що призводить до розмиття зображень навіть при достатній витримці.

Точність маркшейдерської зйомки за допомогою БПЛА визначається сукупністю регульованих та нерегульованих параметрів. Серед регульованих найбільший вплив мають висота польоту та кількість GCP: оптимальний діапазон висот для маркшейдерських задач становить 60–80 м, а кількість контрольних точок – 8–12. Серед нерегульованих параметрів ключову роль відіграє освітленість: зйомку слід виконувати в умовах сонячної погоди та уникати годин з різким косим освітленням. Врахування всіх зазначених параметрів при плануванні польоту дозволяє забезпечити точність визначення об'ємів у межах нормативно допустимих значень та успішно впровадити БПЛА-зйомку в практику маркшейдерського забезпечення відкритих гірничих розробок.

Список використаних джерел:

1. Burdziakowski P. UAV Photogrammetry under Poor Lighting Conditions – Accuracy Considerations. Sensors, 2021, 21(10), 3531.

2. Hassanalian M., Abdelkefi A. Classifications, applications, and design challenges of drones: A review. Progress in Aerospace Sciences, 2017, Vol. 91, pp. 99–131.

3. Nguyen Quoc Long et al. Influence of Flight Height on The Accuracy of UAV Derived Digital Elevation Model at Complex Terrain. Inzynieria Mineralna, 2020, Vol. 1, pp. 101–127.

4. Shahmoradi J. et al. A Comprehensive Review of Applications of Drone Technology in the Mining Industry. Drones, 2020, 4, 34.

5. Поліщук Д. С., Панасюк А. В., Кальчук С. В. Оптимізація маршрутів польотів при обробці даних за допомогою програмного забезпечення Agisoft Metashape. Технічна інженерія. 2025. Вип. 1(95). С. 206–211.

УДК 699.86:721.012:620.92

Постернак О.С., студент групи ПЦБ-531мп Інженено-будівельного інституту
Науковий керівник: Постернак І.М., к.т.н., доц.
Одеська державна академія будівництва та архітектури

БУДІВЕЛЬНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТЕПЛОІЗОЛЯЦІЙНОЇ ОБОЛОНКИ, ЩО ДОЗВОЛЯЮТЬ ДОСТЯГНУТИ ПОКАЗНИКІВ СТАНДАРТУ БУДІВЛІ NZEB

Згідно з глобальними кліматичними цілями та Директивою ЄС 2010/31/EU, будівельний сектор переходить на стандарти NZEB. Це будівлі з надвисокою енергопродуктивністю, де за умови мінімальних витрат енергії комфорт забезпечується переважно за рахунок пасивних методів. Центральним елементом такої системи є теплоізоляційна оболонка. Якщо традиційне будівництво допускає значні втрати через огороджувальні конструкції, то NZEB вимагає створення безперервного, герметичного та високоопірного "термоса", що відокремлює кондиціонований простір від зовнішнього середовища [1].

Методологія та параметричні вимоги. Для досягнення статусу NZEB в умовах помірно-континентального клімату України, оболонка повинна задовольняти наступні технічні умови: коефіцієнт теплопередачі стін ≤0,15 Вт/м^2·К; коефіцієнт теплопередачі покрівлі та підлоги ≤0,10 Вт/м^2; герметичність не більше 0,6 обмінів повітря за годину при тиску 50 Па; відсутність лінійних містків холоду ≤0,01 Вт/м·К.

Матеріали теплоізоляції. Залучення інноваційних ізоляторів з наднизькою теплопровідністю. Традиційні матеріали вимагають значної товщини шару. Альтернативою є вакуумні ізоляційні панелі (VIP): мають найнижчий коефіцієнт теплопровідності λ≈0,007 Вт/м·К. Це дозволяє зменшити товщину стіни в декілька разів порівняно з пінополістиролом. Аерогелі: використовуються у вигляді матів або штукатурок, при λ≈0,0114 Вт/м·К вони є незамінними при реновації історичних фасадів та ізоляції віконних укосів. Екструдований пінополістирол (XPS) з графітовим наповненням: покращує теплоізоляцію до 20%.

Системи фасадного утеплення. Найбільш ефективною технологією для NZEB визнано ETICS (системи скріпленої теплоізоляції) з використання кріпильних елементів з терморозривом для уникнення точкових втрат тепла та навісні вентильовані фасади з використанням двошарової мінеральної вати.

Герметичність та управління пароперенесом. Герметичність – найменш помітний, але найважливіший фактор. Навіть мікротріщина у шарі ізоляції може призвести до конвективного перенесення тепла, що нівелює 30…50% ефективності утеплювача. Технологічна схема створення герметичного шару: внутрішній контур (використання інтелектуальних пароізоляційних мембран); герметизація стиків (застосування спеціалізованих адгезивних стрічок та герметиків, що зберігають еластичність протягом 50 років); двічі обов'язковий контроль якості: після монтажу мембран та після завершення оздоблення.

Світлопрозорі конструкції та монтажні вузли. У будівлях NZEB вікна виконують роль "пасивних сонячних колекторів". Компоненти енергоефективного вікна: профіль (камери, заповнені спіненим утеплювачем, або композитні матеріали (фіброволокно); склопакет двокамерний з двома енергозберігаючими напиленнями (Low-E) та заповненням криптоном; дистанційна рамка з тільки "теплий край" (пластик або нержавіюча сталь). Технологія виносного монтажу: для виключення містків холоду вікно монтується безпосередньо в шар утеплювача за допомогою консольних систем (наприклад, система Triotherm), що зміщує ізотерму всередину конструкції та запобігає конденсації вологи.

Ліквідація теплових містків (Thermal bridge-free). Критичні вузли, що потребують особливої уваги: примикання фундаменту до стіни (використання піноскла або термовкладишів з високою міцністю); балконні плити (застосування термовідсікачів, що розривають залізобетонну конструкцію ізоляційним шаром); парапети та дахові виходи (повна обгортка виступаючих елементів ізоляційним матеріалом).

Активні та адаптивні оболонки. Сучасний розвиток технологій NZEB рухається до створення "розумних" фасадів: фазозмінні матеріали (PCM) для поглинання надлишків тепла вдень і віддачі вночі; фотоелектричні фасади (BIPV) (використання сонячних панелей як облицювального матеріалу вентильованого фасаду); автоматизовані сонцезахисні системи (зовнішні жалюзі, що регулюються сенсорами сонячної активності, запобігаючи перегріву будівлі влітку без використання кондиціонерів).

Економічний та екологічний аспект. Хоча вартість будівництва NZEB на 10…15% вища, ці витрати компенсуються: відсутністю потреби в потужних системах опалення, зниженням експлуатаційних витрат на 80…90% та збільшенням терміну служби конструкцій завдяки стабільному температурному режиму.

Висновки. Впровадження цих технологій є єдиним шляхом до створення енергетично незалежного житлового фонду та виконання міжнародних екологічних зобов'язань. Подальший розвиток пов'язаний з інтеграцією динамічних систем, що дозволяють будівлі адаптуватися до змін навколишнього середовища.

Список використаних джерел:

1. Литвин В. Огляд будівельних технологій для забезпечення відповідності стандартам NZEB: *аналітичний звіт*. Київ: Громадська мережа «Опора», 2024. 17с. URL: https://rehouse.org.ua/sites/default/files/5_oglyad_budivelnikh_tekhnologii_litvin_ekf.pdf

УДК 624.138.24:622.257

Приз С.С., магістр, 1 курс, група ГС-51мп, НН ІЕЕ
Науковий керівник: Шайдецька Л.В., к.т.н., доц.
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

СУЧАСНІ МЕТОДИ ЗАКРІПЛЕННЯ ГРУНТОВИХ МАСИВІВ З ВИКОРИСТАННЯМ ІН'ЄКЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ НОВОГО ПОКОЛІННЯ

Сучасне підземне будівництво у великих містах, зокрема у м. Києві, характеризується складними гірничо-геологічними умовами та високим рівнем техногенного навантаження. Освоєння підземного простору під споруди подвійного призначення, транспортні розв'язки та паркінги вимагає будівництва на ділянках із водонасиченими пісками, лесовими просадними ґрунтами та зонами «вторинної підробки» масиву [1]. Традиційні методи закріплення, такі як звичайна цементація або силікатизація, часто не забезпечують необхідної проникної здатності та екологічної безпеки. Це зумовлює актуальність впровадження ін'єкційних матеріалів нового покоління.

Останнє десятиліття ознаменувалося переходом від макро- до мікро- та наноструктурних складів для зміцнення ґрунтів. Основними групами сучасних матеріалів є: мікроцементи (тонкодисперсні в'яжучі), полімерні смоли (поліуретанові та епоксидні), біополімерні та біомінеральні склади.

На відміну від портландцементу, частинки мікроцементу мають розмір 1–10 мкм. Це дозволяє розчину проникати у дрібнозернисті піски та мікротріщини в породах, куди доступ звичайним розчинам закритий. Використання мікроцементів забезпечує високу міцність (до 15–20 МПа на стиск) та довговічність закріпленого масиву. Для порівняння зерновий склад мікроцементу та звичайного цементу наведений на рис. 1.

КОМПОНЕНТ	МІКРОЦЕМЕНТ	ЗВИЧАЙНИЙ ЦЕМЕНТ
ЦЕМЕНТНА ОСНОВА	Високоякісний білий цемент (портландцемент)	Портландцемент (сірий)
МІНЕРАЛЬНІ НАПОВНЮВАЧІ	Мікронізовані мінеральні наповнювачі (кварцовий пісок дуже дрібної фракції, мармурова мука, мінеральні пігменти)	Природний пісок (середньої/крупної фракції), вапняк, глина та інші мінерали
ПОЛІМЕРНІ ДОБАВКИ	Полімерні модифікатори (покращують адгезію, еластичність, водостійкість та зносостійкість)	Зазвичай відсутні або мінімальні (можуть додаватись окремо як пластифікатори)
ДОДАТКОВІ ДОБАВКИ	Диспергатори, загусники, стабілізатори, гідрофобізатори, пігменти (для кольору та стабільності)	Можуть містити гіпс (регулятор тужавіння) та інші базові добавки
ПРИЗНАЧЕННЯ КОМПОНЕНТІВ	Забезпечують високу міцність, адгезію, тонкий шар нанесення, естетику, водо- та зносостійкість, гнучкість покриття	Забезпечують міцність, довговічність та базові будівельні властивості
СТРУКТУРА МАТЕРІАЛУ	Дуже дрібна фракція (< 100 мкм), тонкодисперсний порошок	Більша фракція (від 100 мкм і більше), грубодисперсний порошок

Рис. 1. Порівняльний аналіз зернового (гранулометричного) складу звичайного портландцементу та мікроцементу (сформовано автором за допомогою ШІ ChatGPT)

Застосування мікроцементів для закріплення ґрунтів є ефективним методом, особливо для слабких та малопроникних ґрунтів завдяки високій проникаючій здатності. Однак ця технологія має низку суттєвих недоліків, зумовлених як фізико-хімічними властивостями матеріалу, так і складністю ін'єкційних робіт [2].

На відміну від мікроцементів полімерні смоли (поліуретанові та епоксидні) це матеріали які характеризуються наднизькою в'язкістю та можливістю регулювання часу твердіння (від кількох секунд до кількох годин). Вони є незамінними при ліквідації аварійних припливів води, стабілізації пливунів та герметизації обробок тунелів. Поліуретанові склади мають здатність до розширення, що створює ефект «самоущільнення» масиву. Полімерні смоли проникають у пористу структуру грунту, заповнюють пори та після твердіння формують міцний водостійкий каркас, підвищуючи носійну здатність грунтів (рис.2).

Рис.2. Порівняльна характеристика поліуретанових і епоксидних смол (сформовано автором за допомогою ШІ ChatGPT)

Найбільш інноваційним напрямком є застосування біополімерних та біомінеральних складів, який заснований на використанні бактерій, які в процесі життєдіяльності виділяють кальцит, що зв'язує частинки ґрунту на мікрорівні. Метод є абсолютно екологічним і не змінює гідрогеологічний режим територій. Процес біомінералізації заснований на здатності специфічних бактерій виділяти фермент уреазу, який виступає каталізатором для гідролізу сечовини.

В результаті реакції в порах ґрунту виділяються іони карбонату (CO_3^{2-}) та іони амонію (NH_4^+):

$$CO(NH_2)_2 + 2H_2O \xrightarrow{\text{уреаза}} 2NH_4^+ + CO_3^{2-}$$

При введенні в розчин солей кальцію (наприклад, $CaCl_2$), іони кальцію (Ca^{2+}) взаємодіють з карбонатом, утворюючи твердий осад кальцит:

$$Ca^{2+} + CO_3^{2-} \rightarrow CaCO_3 \downarrow \text{(кальцит)}$$

Кристали кальциту формуються безпосередньо на поверхні піщинок та, що найважливіше, на контактах між зернами. Кальцит створює так звані «цементаційні містки». Вони жорстко зв'язують окремі частки ґрунту між собою, перетворюючи розсипчастий матеріал на стійкий штучний піщаник. В результаті суттєво зростає міцність на зсув та стиск. Зменшується пористість, але, на відміну від цементації, ґрунт зберігає певну проникність, що важливо для природного дренажу [3].

Застосування новітніх ін'єкційних матеріалів не може вцілому вирішити проблему закріплення ґрунтових масивів без зміни та вдосконалення методів та технології проведення робіт. Тому ефективність застосування нового покоління матеріалів впершу чергу повинно реалізуватися через вдосконалення технологічних схем.

Так, наприклад, для струминної цементації використання високого тиску (до 400-500 атм) дозволяє руйнувати структуру ґрунту та перемішувати його з мікроцементним розчином, створюючи ґрунтобетонні колони заданої геометрії. Це дозволяє формувати захисні екрани в зонах впливу на існуючу забудову [4].

Застосування вищевказаних матеріалів дозволяє вирішити ряд специфічних геомеханічних проблем м. Києва. Зокрема, зміцнення лесових ґрунтів мікроцементами дозволяє перетворити їх з просадних на стабільні основи, стійкі до техногенного замочування, а використання полімерних смол під час будівництва метрополітену в районах з високим рівнем підземних вод дозволяє мінімізувати ризики розрідження пісків та деформації тунелів.

Впровадження ін'єкційних матеріалів нового покоління (мікроцементів та полімерів) є необхідною умовою забезпечення безпеки підземного будівництва в умовах щільної міської забудови. Використання мікроцементів дозволяє на порядок підвищити якість зміцнення дрібнопористих ґрунтів порівняно з традиційними методами.

Технології біомінералізації представляють перспективний екологічний напрямок для стабілізації схилів та історичних зон Києва, де хімічне втручання є небажаним. Подальші дослідження мають бути спрямовані на створення інтегрованих систем моніторингу, які б поєднували процес нагнітання розчинів із цифровим моделюванням напружено-деформованого стану масиву.

Список використаних джерел:

1. Гайко Г. І. Розвиток підземної урбаністики як системи освоєння георесурсів великих міст : звіт про НДР (№ держреєстрації 0117U002414). Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. URL: https://report.kpi.ua/files/2019_2008_0.PDF
2. Pantazopoulos I. A., Atmatzidis D. K. Dynamic properties of microcement-grouted sands. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 2012. Vol. 42. P. 17–31. DOI: https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2012.05.017
3. Whiffin V. S., van Paassen L. A., Harkes M. P. Microbial Carbonate Precipitation as a Soil Improvement Technique. *Geomicrobiology Journal*. 2007. Vol. 24, Iss. 5. P. 417–423. DOI: https://doi.org/10.1080/01490450701436505
4. Зуєвська Н. В., Шайдецька Л. В., Губашова В. Є. Вплив виконання елементів струменевої цементації на фізико-механічні характеристики навколишнього ґрунтового масиву. *Енергетика: економія, технології, екологія*. 2019. № 4. С. 27–34. DOI: https://doi.org/10.20535/1813-5420.4.2019.200474

УДК 622.25:532.5

Рибак А.В., аспірант, 185А-24-10, АСП
Науковий керівник: Коровяка Є.А., к.т.н., доц., завідувач кафедри НГІБ
Національний технічний університет «Дніпровська політехніка»

ОБҐРУНТУВАННЯ РАЦІОНАЛЬНИХ ПАРАМЕТРІВ ПРИСТРОЮ ДЛЯ ГІДРОДИНАМІЧНОЇ ОБРОБКИ ПРИВИБІЙНОЇ ЗОНИ ГІДРОГЕОЛОГІЧНИХ СВЕРДЛОВИН

Гідрогеологічні свердловини є основним джерелом водопостачання для питних, промислових, сільськогосподарських і технічних потреб. Під час експлуатації в привибійній зоні (ПЗ) свердловин відбувається поступова кольматація фільтра та прифільтрової зони пласта механічними частинками, хімічними осадами (залізо, карбонати, сульфати), біологічними плівками та продуктами корозії. Це призводить до зниження дебітів свердловин на 30–70 %, погіршення якості води та збільшення енергетичних витрат на підйом води [1, 2].

Гідродинамічна обробка привибійної зони є одним із найефективніших і екологічно безпечних методів відновлення продуктивності свердловин. Вона базується на створенні в привибійній зоні імпульсних перепадів тиску, пульсацій потоку, кавітаційних ефектів та турбулентних коливань, які руйнують кольматуючі відкладення, розширюють пори та тріщини, відновлюють природну проникність колектора без застосування агресивних хімічних реагентів [3].

Ефективність гідродинамічної обробки значною мірою залежить від раціональних параметрів спеціального пристрою (гідродинамічного генератора, пульсатора або імпульсного насоса). Основними параметрами, що підлягають обґрунтуванню, є: амплітуда та частота пульсацій тиску, витрата робочої рідини, діаметр і кількість сопел, глибина занурення пристрою, тривалість обробки одного інтервалу та загальна тривалість циклу [4].

Процес гідродинамічного впливу на привибійну зону описується рівняннями нестаціонарної фільтрації та гідродинаміки. Зміна тиску в привибійній зоні під час пульсацій можна представити як гармонічну функцію:

$$\Delta P(t) = \Delta P_0 \sin(2\pi f t), \tag{1}$$

де ΔP_0 – амплітуда перепаду тиску (МПа), f – частота пульсацій (Гц), t – час.

Раціональна частота пульсацій для більшості водоносних горизонтів лежить у діапазоні 5–25 Гц. Нижчі частоти (1–5 Гц) забезпечують глибше проникнення хвиль тиску в пласт, тоді як вищі частоти (20–50 Гц) ефективніше руйнують щільні кольматуючі відкладення безпосередньо біля фільтра. Амплітуда перепаду тиску зазвичай обирається в межах 0,5–2,5 МПа залежно від міцності колектора, щоб уникнути руйнування фільтра або обвалення стінок свердловини [5].

Важливим параметром є витрата робочої рідини (Q) через пристрій. Оптимальна витрата розраховується за формулою:

$$Q = \mu \cdot A \cdot \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}}, \tag{1}$$

де μ – коефіцієнт витрати сопла (0,6–0,95), A – сумарна площа сопел (м²), ΔP – перепад тиску, ρ – густина рідини.

Дослідження показують, що для свердловин діаметром 150–300 мм раціональна сумарна площа сопел становить 1,5–4,0 см², а оптимальна витрата робочої рідини – 8–25 л/с. Занадто висока витрата призводить до непродуктивних енергетичних втрат, а надто низька – до недостатньої інтенсивності очищення.

У пластичних глинистих і піщаних колекторах ефективніше працюють пристрої з низькочастотними пульсаціями та великою амплітудою, що сприяє розтріскуванню та виносу дрібних частинок. У міцних тріщинуватих породах (вапняки, пісковики) кращі результати дають високочастотні пульсації з кавітаційними ефектами, які інтенсифікують локальне руйнування кольматуючих відкладень.

В умовах України, де значна частина гідрогеологічних свердловин експлуатується понад 20–40 років, а деякі – понад 50 років, проблема кольматації привибійної зони є особливо гострою. Більшість свердловин, пробурених у радянський період, мають виражену механічну, хімічну та біологічну кольматацію фільтра і прифільтрової зони. Це призводить до зниження дебітів на 40–80 %, а в окремих випадках – до повної втрати продуктивності свердловини. Обґрунтування раціональних параметрів пристрою для гідродинамічної обробки дозволяє ефективно відновлювати дебіт свердловин на 40–120 % від початкового значення, а в деяких випадках навіть перевищувати проектний дебіт [3]. При цьому метод не потребує застосування дорогих і екологічно небезпечних хімічних реагентів (кислот, лугів, комплексонів), що є суттєвою перевагою.

Гідродинамічний метод особливо актуальний для свердловин питного водопостачання населення. На відміну від хімічних і електрохімічних способів обробки, гідродинамічна обробка не вводить у водоносний горизонт сторонніх речовин, не змінює хімічного складу води та не погіршує її органолептичних і санітарно-гігієнічних показників. Це дозволяє використовувати метод без ризику вторинного забруднення підземних вод, що особливо важливо для джерел централізованого питного водопостачання в умовах жорстких вимог Державних санітарних норм та правил.

Типова конструкція пристрою для гідродинамічної обробки включає декілька основних елементів: циліндричний корпус, систему сопел (круглих або щілинних), клапанний або роторний механізм створення пульсацій тиску, систему герметизації (манжети або пакери), пристрій для спуску-підйому та систему подачі робочої рідини. Клапанний механізм забезпечує різкі імпульсні перепади тиску, тоді як роторний – більш стабільні пульсації з можливістю регулювання частоти.

Раціональна глибина занурення пристрою становить 0,5–2,0 м нижче нижньої межі робочого фільтра. Обробка проводиться з поступовим переміщенням пристрою вгору по інтервалу фільтра зі швидкістю 0,2–0,5 м/хв. Тривалість обробки одного метра фільтра коливається від 10 до 30 хвилин залежно від ступеня кольматації, типу колектора та обраних параметрів пульсацій. Для сильно закольматованих свердловин рекомендується проводити дво- або трицикловий режим обробки з інтервалом між циклами 24–48 годин.

Обґрунтування раціональних параметрів пристрою для гідродинамічної обробки привибійної зони дозволяє не тільки суттєво підвищити дебіт свердловин, але й значно продовжити міжремонтний період їх експлуатації – з 3–5 до 8–15 років. Крім того, відновлення природної проникності привибійної зони знижує енергоспоживання на підйом води на 15–35 %, що безпосередньо впливає на собівартість водопостачання. У масштабах України, де експлуатується понад 50 тисяч експлуатаційних свердловин, навіть часткове впровадження ефективних гідродинамічних технологій може дати значний економічний ефект.

У сфері вищої освіти інтеграція таких досліджень у навчальні курси з технології буріння та експлуатації свердловин, гідрогеології, водопостачання та гірничих технологій має велике практичне значення. Студенти отримують можливість поєднувати теоретичні знання з реальними інженерними задачами, набувати навичок обґрунтування технологічних параметрів, проведення лабораторних і промислових випробувань, а також аналізу ефективності відновлювальних робіт. Це сприяє формуванню компетентностей, необхідних сучасному інженеру-гідрогеологу та фахівцю з водогосподарського комплексу.

Для водогосподарського комплексу України впровадження сучасних пристроїв гідродинамічної обробки є важливим стратегічним напрямом підвищення ефективності використання підземних водних ресурсів. У умовах зміни клімату, зменшення природного живлення водоносних горизонтів та постійного зростання антропогенного навантаження на довкілля раціональне відновлення продуктивності існуючих свердловин набуває особливої актуальності. Воно дозволяє зменшити потребу в бурінні нових свердловин, знизити техногенне навантаження на підземні води та забезпечити стабільне водопостачання населення і промисловості.

Перспективним напрямом розвитку є створення універсальних модульних пристроїв, адаптованих до різних діаметрів свердловин (від 89 мм до 426 мм) і різноманітних геологічних умов. Такі пристрої повинні мати можливість швидкої зміни частоти та амплітуди пульсацій, оснащуватися датчиками тиску і витрати, а також мати компактну конструкцію для зручного транспортування та використання в польових умовах.

Подальші наукові роботи доцільно спрямовувати на експериментальне визначення оптимальних параметрів пристроїв для різних типів водоносних колекторів (піщані, гравелисті, тріщинуваті, карстові), розробку цифрових моделей гідродинамічного впливу на привибійну зону з урахуванням реальних геофільтраційних параметрів, поєднання гідродинамічної обробки з ультразвуковими, магнітними або імпульсно-електричними ефектами, а також створення автоматизованих систем моніторингу ефективності обробки в реальному часі з можливістю дистанційного управління процесом.

Список використаних джерел:

1. Рибак А. В. Обґрунтування використання гідродинамічної обробки привибійної зони гідрогеологічних свердловин / А. В. Рибак // Наукові праці Національного гірничого університету. – 2025.
2. Орловський В. М. Буріння нафтових і газових свердловин : підручник / В. М. Орловський. – Х. : Вид-во НТУ «ХПІ», 2024. – 456 с.
3. Орловський В. М., Білецький В. С., Сіренко В. І. Нафтогазовилучення з важкодоступних і виснажених пластів. Харків: Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова, НТУ «Харківський політехнічний інститут», ТОВ НТП «Бурова техніка», Львів, Видавництво «Новий Світ – 2000», 2023. – 312 с.
4. Видобування геотермальної енергії: монографія / Ю. П. Морозов. – Київ: ІВЕ, 2022. – 245 с.
5. Орловський В. М., Білецький В. С., Сіренко В. І. Технологія видобування газу і газового конденсату: навчальний посібник. Редакція «Гірничої енциклопедії», Полтава: НТП «Бурова техніка», Львів, Видавництво «Новий Світ – 2000», 2023. – 359 с.

УДК 622

Романчук В.О., студент, ІІІ курс, група 31-З,
Геодезія та землеустрій
Науковий керівник: Русіна Н.Г., к.п.н., викладач
Відокремлений структурний підрозділ
Рівненський фаховий коледж Національного університету
природокористування і біоресурсів України

СУКУПНІСТЬ МЕТОДІВ І ПРОЦЕСІВ ВИДОБУВАННЯ КОРИСНИХ КОПАЛИН ІЗ НАДР ЗЕМЛІ

Сучасний етап розвитку економіки України характеризується зростаючою потребою в мінерально-сировинних ресурсах, що обумовлює стратегічну важливість гірничої галузі. Видобування корисних копалин є базовим елементом функціонування промисловості, оскільки саме воно забезпечує первинну сировину для металургії, енергетики, будівництва, хімічної промисловості та інших секторів господарства. Сукупність методів і процесів видобування корисних копалин із надр Землі являє собою складну інтегровану систему, яка охоплює геологічні, технічні, технологічні, економічні та екологічні аспекти.

Гірниче виробництво починається з геологічного вивчення надр, яке включає пошук, розвідку та оцінку запасів корисних копалин. На цьому етапі застосовуються методи геофізичних досліджень, буріння розвідувальних свердловин, лабораторного аналізу зразків порід. Саме геологічна інформація визначає доцільність подальшого освоєння родовища та вибір оптимальної технології видобування. За даними Державної служби геології та надр України, мінерально-сировинна база України включає понад 20 тисяч родовищ, серед яких значну частку становлять залізні руди, вугілля, уран, марганець та будівельні матеріали [1]

Після завершення розвідувальних робіт здійснюється етап підготовки родовища до розробки. Він включає будівництво інфраструктури, проведення гірничих виробок, встановлення обладнання та організацію систем транспортування і вентиляції. Саме на цьому етапі формується технологічна схема видобування.

Основними способами видобування корисних копалин є відкритий, підземний і свердловинний. Відкритий спосіб (кар'єрний) є найбільш поширеним у світі завдяки своїй економічній ефективності. Його застосовують у випадках неглибокого залягання корисних копалин. Процес передбачає видалення розкривних порід, формування уступів кар'єру та послідовне вилучення корисної копалини. Перевагами відкритого способу є висока продуктивність, можливість використання потужної техніки та відносно низька собівартість. Однак цей спосіб має значний вплив на довкілля: порушення рельєфу, знищення ґрунтового покриву, пилове забруднення. Згідно з дослідженнями Національної академії наук України, відкритий спосіб видобування забезпечує до 70% загального обсягу видобутку твердих корисних копалин у світі. [2]

Підземний (шахтний) спосіб використовується у випадках глибокого залягання родовищ. Він передбачає створення складної системи підземних виробок, які забезпечують доступ до корисної копалини. Основними елементами є вертикальні стволи, горизонтальні штреки, камери та лави. Підземний видобуток є значно складнішим і небезпечнішим, ніж відкритий. Він потребує постійного контролю стану гірничих виробок, систем вентиляції, водовідливу та протипожежного захисту. За матеріалами Інституту геотехнічної механіки імені М. С. Полякова НАН України, основними небезпеками підземного видобування є обвали порід, вибухи газу та пилу, а також підвищена температура на великих глибинах [2].

Свердловинний спосіб застосовується для видобування рідких і газоподібних корисних копалин, а також для деяких твердих ресурсів шляхом підземного вилуговування. Основою цього методу є буріння свердловин, через які здійснюється підйом корисної копалини або закачування реагентів для її розчинення.

Технологічні процеси видобування включають буріння, вибухові роботи, механічне руйнування порід, навантаження, транспортування та первинну переробку. Буріння є ключовим етапом, оскільки забезпечує підготовку порід до подальшого руйнування. Вибухові роботи дозволяють ефективно подрібнювати тверді масиви, що значно підвищує продуктивність.

За даними Міністерства захисту довкілля та природних ресурсів України, використання сучасних вибухових матеріалів і технологій дозволяє знизити негативний вплив на довкілля та підвищити контрольованість процесу руйнування порід [1]. Важливою складовою є транспортування гірничої маси. У відкритих кар'єрах використовуються великовантажні самоскиди, екскаватори та конвеєрні системи. У підземних умовах застосовуються вагонетки, стрічкові конвеєри та підйомні установки.

Значного розвитку в останні десятиліття набула автоматизація гірничих процесів. Використання сучасних інформаційних технологій, геоінформаційних систем і дистанційного управління дозволяє підвищити ефективність видобування та зменшити ризики для працівників.

Відповідно до досліджень Державної служби геології та надр України, впровадження цифрових технологій у гірничій галузі сприяє оптимізації використання ресурсів і зниженню виробничих витрат. ГІС дозволяють інтегрувати величезні масиви різнорідних просторових даних для пошуку корисних копалин. Так, аналіз мультиспектральних знімків дистанційного зондування Землі (Sentinel-2 або Landsat) допомагає виявляти геологічні розломи, спектральні аномалії гірських порід та зміни у рослинному покриві, що можуть вказувати на поклади руди. Побудова геологічних моделей або просторова інтерполяція даних розвідувального буріння дозволяє створювати блочні моделі родовищ для точного підрахунку обсягів запасів. Сучасна маркшейдерія практично повністю спирається на цифрові технології просторового аналізу. Так, застосування наземного, повітряного (з БПЛА) лазерного сканування дозволяє створювати високоточні 3D-моделі кар'єрів, відвалів та підземних виробок. Завдяки регулярному оновленню цифрових моделей рельєфу (ЦМР) в середовищі ГІС, швидко та з високою точністю розраховують об'єми вийнятої гірської маси та складованих корисних копалин. ГІС-аналіз зміщень поверхні допомагає прогнозувати зсуви та обвали у кар'єрах. Гірниче виробництво має значний вплив на довкілля, і ГІС є ключовим інструментом для мінімізації цих наслідків. Картування зон пилового забруднення, моніторинг стану поверхневих та підземних вод, а також оцінка деградації ґрунтів навколо гірничого відводу. У робочих проектах землеустрою за допомогою ГІС розраховують ухили для створення протиерозійних гідротехнічних споруд, планують нанесення родючого шару ґрунту та проєктують залісення відвалів. Проєктування оптимальних транспортних розв'язок, ухилів технологічних доріг у кар'єрі для зменшення витрат пального кар'єрними самоскидами, забезпечує логістику відкритого та підземного видобутку. Управління земельним відводом здійснюється через ведення земельного кадастру гірничого підприємства, контроль за межами гірничих та земельних відводів, санітарно-захисних зон.

Окрему увагу необхідно приділити екологічним аспектам видобування корисних копалин. Гірнича діяльність супроводжується значними змінами природного середовища: порушенням земель, забрудненням водних ресурсів, викидами пилу та газів. Тому важливим етапом є рекультивація земель, яка передбачає відновлення їх родючості та господарського використання. Цей процес традиційно поділяється на гірничотехнічний етап, що включає планування рельєфу та нанесення родючого шару ґрунту. Його виконує саме гірниче підприємство за допомогою важкої техніки (бульдозерів, скреперів, екскаваторів). Головна мета – створити безпечний, геометрично правильний і стабільний рельєф. Біологічний етап (Відновлення родючості), який передбачає фітомеліорацію та залісення відвалів. Його мета – відновити структуру ґрунту та запустити природні ґрунтоутворювальні процеси. Агротехнічна підготовка та меліорація передбачає глибоке розпушування ущільненого технікою ґрунту та боронування. Для швидкого відновлення мікробіологічної активності та балансу поживних речовин обов'язковим є внесення не лише мінеральних, а й значних обсягів органічних добрив (зокрема гною, сидератів, торфокомпостів), а також хімічних меліорантів (вапнування кислих ґрунтів). На початкових стадіях висівають спеціально підібрані суміші багаторічних бобових і злакових трав (люцерна, буркун, еспарцет, костриця). Вони швидко нарощують біомасу, збагачують ґрунт азотом, а їхня потужна коренева система виконує роль «біологічної арматури», надійно закріплюючи схили. Залежно від обраного напряму, територію заліснюють (висадка саджанців дерев і чагарників, стійких до бідних ґрунтів, таких як сосна чи акація), готують під повноцінну ріллю або перетворюють на рекреаційну зону (наприклад, затоплення залишку кар'єру для створення водойми та облаштування берегів). Для раціонального розподілу цих ресурсів на великих площах ефективно застосовують технології точного землеробства.

Згідно з Кодексом України про надра, підприємства, що здійснюють видобування корисних копалин, зобов’язані забезпечувати відновлення порушених земель і мінімізацію шкоди довкіллю [2] Крім того, актуальним є питання раціонального використання ресурсів. Це включає зменшення втрат корисної копалини, комплексне використання родовищ і впровадження безвідходних технологій. За оцінками Національної академії наук України, впровадження ресурсозберігаючих технологій дозволяє підвищити коефіцієнт вилучення корисних копалин на 10–15%. [1]

Отже, сукупність методів і процесів видобування корисних копалин із надр Землі є багатогранною системою, що поєднує різні технології та підходи. Ефективне функціонування цієї системи можливе лише за умови гармонійного поєднання економічної доцільності, технічної досконалості та екологічної безпеки. Подальший розвиток гірничої галузі України пов’язаний із впровадженням інноваційних технологій, цифровізацією виробництва та дотриманням принципів сталого розвитку.

Список використаних джерел:

1. Шехунова С.Б. Стратегічна мінеральна сировина для відновлення України. *Вісник НАН України*. 2025. № 7. С.77-85. doi: https://doi.org/10.15407/visn2025.07.077.

2. Красножон М. Д. Мінерально-сировинна база України: стаття 4. Паливно-енергетичні ресурси та перспективи їх нарощування. Мінеральні ресурси України. 2015. № 4. С.3-15.

УДК 622:528.7

Самійлик К.О., студентка 2-го курсу, група ГЗ-2
Куницька М.С., PhD, доц. кафедри маркшейдерії
Державний університет «Житомирська політехніка»

ЗАСТОСУВАННЯ НАЗЕМНОГО ЛАЗЕРНОГО СКАНУВАННЯ ДЛЯ СТВОРЕННЯ 3D-МОДЕЛЕЙ ОБ'ЄКТІВ СКЛАДНОЇ АРХІТЕКТУРИ

У сучасній геодезичній практиці вимоги до повноти, точності та оперативності отримання просторових даних про архітектурні та інженерні об'єкти постійно зростають. Традиційні методи знімання - електронні тахеометри та GNSS-приймачі, попри високу точність окремих вимірювань залишаються трудомісткими при зніманні об'єктів складної геометричної форми, історичних пам'яток або промислових споруд із насиченим технологічним обладнанням [1]. У таких умовах доцільним є застосування технології наземного лазерного сканування (НЛС), яка принципово змінює підхід до виконання інженерно-геодезичних вишукувань.

Сутність НЛС полягає у безвідбивачевому визначенні просторових координат точок поверхні об'єкта з частотою від 500 тис. до 2 млн вимірів за секунду. Результатом є «хмара точок» (Point Cloud) - масив координат (X, Y, Z) з додатковими атрибутами: інтенсивністю відбитого сигналу та кольором (R, G, B). Висока щільність вимірювань забезпечує повну фіксацію геометрії об'єктів, включаючи дрібні архітектурні елементи, деформації конструкцій і дефекти. Технологічний процес наземного лазерного сканування включає польовий етап, який передбачає рекогносцировку об'єкта, проєктування мережі сканувальних станцій та розміщення спеціальних марок, необхідних для подальшої прив'язки та узгодження даних[2]. Після цього здійснюється безпосереднє сканування об'єкта, у процесі якого відбувається збір просторової інформації з отриманням щільної хмари точок для подальшої обробки та побудови тривимірної моделі.

Сучасні прилади підтримують технологію SLAM і VIS-системи автоматичної суміщення сканів у режимі реального часу, що суттєво скорочує час польових робіт. Камеральний (ключовий) етап охоплює: імпорт даних, фільтрацію «шумів» (рослинність, транспорт), реєстрацію сканів та побудову 3D-моделі. На основі хмари точок створюються плани поверхів, розрізи, фасади та топографічні плани масштабу 1:500. Важливим напрямом є технологія Scan-to-BIM - інтеграція хмари точок у середовище BIM (Building Information Modeling). Шляхом накладання фактичної хмари на проєктну модель виявляють колізії, визначають відхилення конструкцій від проєктних параметрів і розраховують фактичні об'єми виконаних робіт. Дистанційний характер вимірювань дозволяє знімати аварійні та важкодоступні об'єкти без риштування, що суттєво знижує ризики виробничого травматизму [3].

Таблиця 1

Порівняння НЛС із традиційними методами знімання

Критерій	Тахеометр / GNSS	НЛС
Швидкість збору даних	~1 точка / 0,3 с	до 2 000 000 т/с (Leica RTC360)
Точність (50 м)	1–3 мм (окремі точки)	2–5 мм (середня по хмарі)
Складна геометрія	Трудомістко, поетапно	Повна фіксація за один сеанс
Безпека персоналу	Потрібен прямий доступ	Дистанційне знімання
Повторне використання даних	Обмежено	Необмежено (цифрова модель)
Вартість обладнання	Нижча	У 3–5 разів вища

Наземне лазерне сканування є сучасною та ефективною технологією для вирішення задач архітектурних обмірів, реставрації та інженерної геодезії. Попри вищі початкові витрати на обладнання та потребу в потужних обчислювальних ресурсах, його економічна доцільність забезпечується скороченням тривалості польових робіт, зменшенням впливу людського чинника та можливістю багаторазового використання цифрових моделей.

Таким чином, технологія дозволяє отримувати точні тривимірні моделі об'єктів складної архітектури, зокрема важкодоступних, забезпечуючи підвищення ефективності, безпеки та якості геодезичних і маркшейдерських досліджень.

Список використаних джерел:

1. Hubar, Yu. Using terrain laser scanning for determining real estate physical deterioration. Geodesy, cartography and aerial photography, 2017, 85: 104-117.

2. Kurdi, Fayez Tarsha, et al. Efficiency of terrestrial laser scanning in survey works: Assessment, modelling, and monitoring. arXiv preprint arXiv:2312.03254, 2023.

3. Kovalchuk, I., Yukhymyuk, V., Bogdanets, V. Methodology and results of creating 3D models of historical and cultural objects using a smartphone equipped with a LiDAR scanner. Land Management, Cadastre and Land Monitoring, 2024.

УДК 622.552.1

Семенюк В.В., аспірант
Науковий керівник: Корнієнко В.Я., д.т.н., проф.
Національний університет водного господарства та природокористування

ДОСЛІДЖЕННЯ ОСНОВНОГО ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ РОЗРОБКИ БУРШТИТНОВИХ РОДОВИЩ

Основні поклади бурштину знаходяться на Поліссі – Прип'ятському бурштиноносному басейні (північна частина Волинської, Рівненської, Житомирської та Київської областей). Промислова розробка ведеться в Рівненській області на родовищах в Сарненському (Клесівське, Вільне) та Володимирецькому районах. Світовий запас бурштину в Україні становить близько шести відсотків [1].

Бурштинова сировина широко застосовується в народному господарстві. Основним напрямом використання бурштину є ювелірно-виробнича галузь, широко застосовуються продукти його хімічної переробки в медичній та хімічній промисловостях. У ювелірній справі використовуються фракції бурштину великих та середніх розмірів для виготовлення прикрас. У медицині застосовують бурштинову кислоту. Для того, щоб її отримати, бурштин подрібнюють у порошок. Розробка бурштинових родовищ в Україні має свою специфіку: від «традиційного» для Полісся гідромеханічного видобутку (часто асоційованого з нелегальним промислом) до сучасних промислових кар'єрних методів. Для початку як вести видобувні роботи, то необхідно провести геолого-розвідувальні роботи, щоб знайти «бурштиноносні лінзи» (жили) за допомогою георадарів та бурових установок. Георадари використовують радіоімпульси для сканування ґрунту. Вони дозволяють побачити аномалії в структурі піщаних та глинистих шарів на глибині до 10–15 метрів. Це дозволяє уникати «сліпого» буріння. Після проведених робіт вже застосовують один з способів розробки бурштинового родовища. Найбільш поширеними способами є механічний або гідравлічний [1;2].

Механічний спосіб включає в себе механічну розробку масиву ґрунту у відкритому кар'єрі або під землею. Даний спосіб включає наступні етапи: розкриття продуктивного шару ґрунту, екскаваційні роботи, транспортування породи від місця розробки до грохоту, де відбувається відділення бурштину від породи шляхом миття, рекультивацію земель. Недоліками механічного способу є: великі експлуатаційні та економічні затрати, винос породи на поверхню і негативні екологічний вплив на навколишнє середовище [2].

Гідравлічний спосіб (або метод гідророзмиву) – це найбільш розповсюджений метод видобутку бурштину в Україні, особливо на Поліссі. Його популярність пояснюється фізичними властивостями самого бурштину та структурою місцевих ґрунтів. Оскільки бурштин лише трохи важчий за прісну воду, у насиченій піщано-водяній суміші (пульпі) він поводиться як поплавок – під тиском води він виноситься на поверхню, тоді як важке каміння та пісок осідають на дно [2].

За допомогою мотопомпи та спеціальної металевої труби (штиці) у ґрунті робиться вертикальний прокол. Вода під високим тиском розмиває верхні шари (пісок), доки штиця не досягне «бурштиноносного горизонту» (зазвичай це залягання глини або дрібного гравію на глибині від 3 до 10 метрів). Коли труба досягає потрібної глибини, оператор починає інтенсивно подавати воду. Струмінь води під тиском 10–12 атмосфер створює під землею порожнину. Вода розмиває породу, перетворюючи її на рідку кашу. Легкі фракції (гумус, деревина і бурштин) піднімаються вгору по стовбуру води. На поверхні утворюється велика калюжа або невелике «озеро» з бурхливою водою. Бурштин, що вимивається знизу, спливає на поверхню. У цей момент його виловлюють сачками з дрібною сіткою.

На легальних кар'єрах гідравлічний розмив проводиться інакше. Екскаватор знімає верхній шар («пусту» породу). Гідромонітор (стаціонарна установка) розмиває тільки цільовий пласт. Пульпа насосами подається на збагачувальну фабрику, де замість сачків працюють автоматичні вібросита та басейни з соляним розчином. Це дозволяє зібрати до 99% бурштину, включаючи найменшу фракцію.

Отже, після проведеного аналізу можна сказати, що відомі способи розробки бурштинових родовищ мають або досить значні недоліки, які завдають негативні наслідки навколишньому середовищу (механічний, гідравлічний) та незначні, які у процесі дослідження та вдосконалення можна вирішити.

Список використаних джерел:

1. Корнієнко В. Я. Аналіз сучасних технологій та вибір обладнання для вилучення бурштину із піщаних родовищ з найменшим техногенно-екологічним впливом на навколишнє середовище / В. Я. Корнієнко // Вісник НУВГП, Збірник наукових праць, № 2 (38). Рівне. 2007. С. 352-358.

2. Корнієнко В.Я., Семенюк В.В., Кучерук М.О., Прощарук О. А. Аналіз основних технологічних методів розробки бурштинових родовищ. Вісник НУВГП. Сер. Технічні науки : зб. Наук. Праць. Рівне : НУВГП, 2024. Вип. 3 (107). С. 357-366.

УДК 622.1, 528.7

Скорик М.А., аспірант, 3 курс, PhD-184-23-2
Гнітецький О.М., аспірант, 3 курс, PhD-184-23-1
Факультет гірничої справи, природокористування та будівництва
Котенко В.В., к.т.н., доц.
Державний університет «Житомирська політехніка»

АВТОМАТИЗОВАНИЙ РОЗРАХУНОК ОБ'ЄМУ БЛОКІВ ГАБРО ЗА ДАНИМИ SLAM-СКАНУВАННЯ: ПОРІВНЯННЯ З РУЧНОЮ ПОБУДОВОЮ В AUTOCAD

Актуальність теми. В умовах воєнної економіки точність обліку блочної сировини на складах каменеобробних підприємств набуває першочергового значення: підприємець потребує оперативної відповіді щодо об'єму, маси та комерційної (товарної) частини кожного блока, оскільки ці параметри безпосередньо визначають вартість продукції та логістичні обмеження (перевищення осьового навантаження тягне штрафні санкції). Тому навіть невелика похибка у визначенні товарного об'єму суттєво змінює оцінку економічної ефективності складу. Це обумовлює потребу в програмному рішенні, що автоматично визначає за хмарою точок загальний об'єм блока, об'єм максимального вписаного паралелепіпеда (товарного блока), масу та коефіцієнт виходу.

Аналіз існуючих рішень. Програмне забезпечення, що використовується маркшейдерськими службами, можна умовно поділити на дві групи. До першої належать пакети, які обчислюють об'єм безпосередньо за полігональною (mesh) моделлю - Topocad (Adtollo), Micromine Origin, CloudCompare, спеціалізований 3D-BlockExpert. Однак Topocad працює виключно за DTM-логікою (об'єм між поверхнями), Micromine Origin - за wireframe та блочними моделями родовища, а 3D-BlockExpert аналізує in-situ блоки в масиві за моделлю тріщин; жоден з них не призначений для роботи з реальним сканом окремого видобутого блока і не реалізує пошуку максимального вписаного паралелепіпеда. До другої групи належить найпоширеніший виробничий інструмент - Autodesk AutoCAD, який не вміє розраховувати об'єм безпосередньо за mesh-моделлю чи хмарою точок, тому оператор змушений вручну будувати каркасну 3D-модель за характерними точками поверхні і лише після цього обчислювати об'єм командою MASSPROP. Цей підхід є трудомістким, суб'єктивним і не масштабується.

Постановка задачі. Метою роботи є експериментальне порівняння типового виробничого розрахунку об'єму блоків габро в AutoCAD за хмарою точок з результатами авторського алгоритму, що реалізує каскадний розрахунок об'єму та автоматичний пошук максимального вписаного паралелепіпеда.

Виклад основного матеріалу. Дослідження проведене на складі блоків габро Кам'янобрідського родовища (північніше с. Кам'яний Брід, Житомирська обл.), густина породи $\rho = 2{,}95$ т/м³. SLAM-сканування виконано сканером Alfa-geo L1 з обходом периметра складу; опрацювання хмари точок та сегментація на окремі блоки виконані в Lixel Studio з експортом окремої хмари (.ply) для кожного блока. Сканування проводилось на непідготовленій площадці, де блоки стоять близько один до одного, тому коректне формування замкнутої mesh-моделі вдалося виконати лише для частини блоків. Для деталізованого порівняльного аналізу обрано 6 блоків (№ 1, 2, 18, 21, 26, 37), що охоплюють форми від близьких до правильного паралелепіпеда (№ 2, 21) до клиноподібних з відколами та навісними площинами (№ 1, 26, 37).

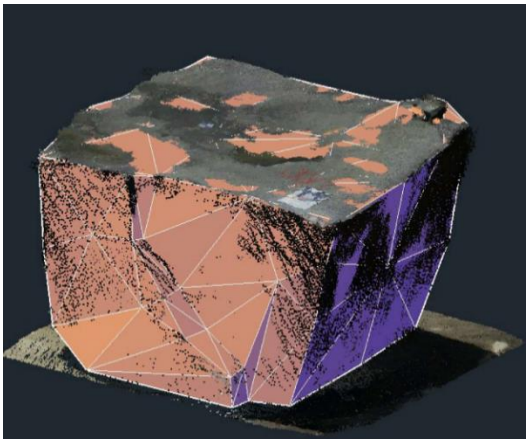


Рис. 1. Каркасна 3D-модель блока, побудована вручну в AutoCAD

Метод 1 (AutoCAD). Хмару точок підключено в AutoCAD через формат (rcp). Оператор вручну будував каркасну 3D-модель: трикутні грані створювалися командою 3DFACE по характерних точках поверхні, об'єднувалися в поверхню (CONVTOSURFACE), перетворювалися у замкнуте тіло (SURFSCULPT). Об'єм визначено командою MASSPROP, маса - як $V \times \rho$. Середній час роботи оператора - 15 хв на блок.

Метод 2 (власний алгоритм). Алгоритм реалізовано на Python з використанням trimesh та Open3D. Робочий процес: 1) каскадний розрахунок об'єму Vз (замкнута сітка → fill_holes → convex hull); 2) автоматичний вибір опорної площини розпилу серед TOP-N кандидатів за площею граней опуклої оболонки; 3) пошук максимального вписаного паралелепіпеда у моделі (розмір кроку 2 см) за алгоритмом histogram-based 2D rectangle на горизонтальних перерізах, який дає Vт, габарити (Д×Ш×В) та коефіцієнт виходу Y = Vт / Vз. Загальний час обробки 6 блоків з формуванням зведеного PDF-звіту склав 2 хв 04 с (≈ 21 с/блок).

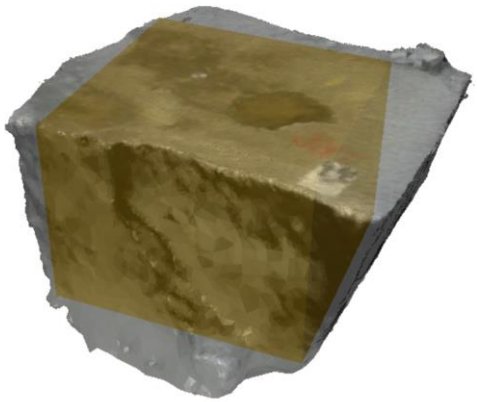


Рис. 2. Візуалізація блока у власній програмі: mesh-модель з вписаним максимальним паралелепіпедом (товарним блоком)

Як видно з таблиці 1, AutoCAD систематично занижує об'єм блоків на 2,4 - 20,9 %, при цьому максимальні відхилення зафіксовано для блоків малого об'єму з нестандартною геометрією (№ 37 - 20,9 %, № 26 - 18,2 %, № 1 - 13,8 %). Причиною є спрощення геометрії під час ручного побудування 3D-Faces: оператор апроксимує криволінійні поверхні мінімальною кількістю плоских граней і вручну інтерполює лінію основи (оскільки бічні поверхні близько розташованих блоків не сканувалися повністю). Для блоків малого об'єму ця похибка має посилений вплив, оскільки відхилення ребра моделі на 1 - 2 см дає відсотково більший внесок у загальний об'єм. Сумарна різниця маси по 6 блоках склала +5,37 т (10,5 %), що при типовому навантаженні фури 20 - 25 т відповідає значенню, яке безпосередньо впливає на коректність планування транспортування.

Таблиця 1. Порівняння об'ємів та параметрів 6 блоків габро (AutoCAD vs власний алгоритм)

№	AutoCAD, м³	Алгоритм Vз, м³	Δ V, %	Vт (товар.), м³	Габарити Д×Ш×В, м	Y, %	Δ маси, т
1	1,579	1,831	-13,8	0,7290	0,90×0,90×0,90	39,8	+0,74
2	2,795	2,863	-2,4	1,6072	0,82×1,40×1,40	56,1	+0,20
18	5,264	5,457	-3,5	3,1622	1,22×1,62×1,60	57,9	+0,57
21	2,196	2,266	-3,1	1,0979	1,38×1,02×0,78	48,5	+0,21
26	4,830	5,907	-18,2	2,6463	1,02×1,38×1,88	44,8	+3,18
37	0,600	0,759	-20,9	0,3748	0,52×1,06×0,68	49,4	+0,47
Σ	**17,264**	**19,083**	**-9,5**	**9,617**	-	**49,4**	**+5,37**

Коефіцієнт виходу Y у вибірці склав 39,8 - 57,9 %, середнє 49,4 % (це відношення товарного об'єму до загального об'єму вже видобутого блока). Маси блоків у діапазоні 1,77 - 15,53 т важливі для планування навантаження транспорту, а сумарний товарний об'єм 9,617 м³ (28,37 т) безпосередньо визначає комерційну вартість досліджуваної партії.

Звіт по блоку: 18

Матеріал: gabbro (ρ = 2.95 т/м³)

Параметри:

Об'єм меш-моделі (загальний)	5.4570 м³ (16.10 т)
Об'єм товарного блоку	3.1622 м³ (9.33 т)
Габарити товарного блоку (Д × Ш × В)	1.22 × 1.62 × 1.60 м
Коефіцієнт виходу (товарний / загальний)	57.9 %

Розкрій товарного блоку на сляби:

Товщина сляба	60 мм
Товщина пилки (kerf)	1.0 мм
Напрямок різу	вісь Y, довжина 1.62 м
Кількість слябів	26 шт.
Розмір одного сляба	1220 × 60 × 1600 мм
Площа одного сляба	1.952 м²
Сумарна площа всіх слябів	50.75 м²
Маса одного сляба (середня)	345.5 кг
Сумарна маса слябів	8.98 т
Втрати на пропил	0.0488 м³ (1.5 %)
Залишок після останнього сляба	35.0 мм

Згенеровано автоматично: 2026-05-08 03:29:50

Рис. 3. Електронний паспорт блока № 18(автоматично сформований)

Окрім параметрів самого блока, алгоритм автоматично виконує розкрій товарного паралелепіпеда на сляби заданої товщини з урахуванням ширини пилки (kerf) і визначає кількість слябів, розмір та площу одного сляба, сумарну площу і масу слябів, втрати на пропил та залишок після останнього сляба. Для кожного блока окремо формується електронний паспорт у форматі PDF, що містить 3D-візуалізацію блока з вписаним товарним паралелепіпедом та повний перелік параметрів розкрою. Приклад електронного паспорту блока наведено на рис. 3.

Висновки. 1. Для блоків габро з нестандартною геометрією AutoCAD систематично занижує об'єм у порівнянні з автоматичним обчисленням за реальною mesh-моделлю на 13,8 - 20,9 %, для блоків правильної форми - на 2,4 - 3,5 %. Сумарна різниця маси по 6 блоках вибірки склала +5,37 т (10,5 %), що є економічно значущою величиною для планування логістики. 2. Особливо суттєвий вплив похибки спостерігається для блоків малого об'єму, де відхилення ручно побудованого ребра на 1 - 2 см дає відсотково більший внесок у результат. 3. Авторський алгоритм додатково забезпечує автоматичне визначення максимального вписаного паралелепіпеда (товарного блока), його маси та коефіцієнта виходу - функції, що не реалізовані в типових САПР та маркшейдерських ПЗ і є визначальними для оцінки економічної ефективності видобутку. 4. Перспектива - розширення вибірки на повний склад (57 блоків) після проведення повторного сканування на підготовленій площадці з достатнім розносом блоків.

УДК 622.233:551.49

Судаков А.К., д.т.н., проф.
Шумов А.С, ас.
Національний технічний університет «Дніпровська політехніка»

ІННОВАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ ОБЛАДНАННЯ ГІДРОГЕОЛОГІЧНИХ СВЕРДЛОВИН БЛОКОВИМИ ГРАВІЙНИМИ ФІЛЬТРАМИ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ ПОЛІЛАКТИДУ

У сучасних умовах розвитку енергетичного комплексу України та зростання навантаження на водні ресурси актуальним є вдосконалення технологій спорудження і експлуатації гідрогеологічних свердловин, зокрема їх водоприймальної частини. Надійність функціонування свердловин значною мірою визначається ефективністю фільтрувального обладнання, яке забезпечує стабільність дебіту, запобігає винесенню піску та впливає на якість підземних вод. Метою роботи є розробка інноваційної технології обладнання гідрогеологічних свердловин блоковими гравійними фільтрами із застосуванням біополімерного в'яжучого на основі полілактиду (PLA) [1].

Для досягнення поставленої мети використано комплекс експериментальних і аналітичних методів дослідження. Технологія виготовлення біополімерно-гравійного композиту передбачала підготовку гравійного матеріалу, введення PLA у кількості 4–16 % від маси суміші та формування циліндричних блокових елементів. Як наповнювач застосовувався гравій фракції 0,5–0,75 мм, що відповідає умовам експлуатації у слабкозцементованих піщаних породах. Оцінка фізико-механічних властивостей матеріалу здійснювалася шляхом визначення межі міцності на одноосьове стискання у сухому стані та після витримки у водному середовищі. Додатково виконано аналіз процесів зміни міцності композиту в часі під впливом води, що дозволило оцінити характер гідролітичного руйнування полімерної матриці [2, 3].

Отримані результати свідчать, що зі збільшенням концентрації PLA від 4 до 16 % відбувається суттєве зростання міцності біополімерно-гравійного композиту, що забезпечує надійність транспортування блокових елементів по стовбуру свердловини. Водночас встановлено, що при контакті з водним середовищем відбувається поступове зниження міцності матеріалу, що пов'язано з гідролітичними процесами деструкції полімеру. Така поведінка матеріалу забезпечує реалізацію принципу контрольованого розмонолічування, при якому після встановлення фільтра у продуктивному інтервалі формується високопористе гравійне середовище з покращеними фільтраційними характеристиками. Визначено, що оптимальний діапазон вмісту PLA дозволяє досягти компромісу між міцністю на етапі транспортування та швидкістю формування проникної структури в умовах свердловини.

Конструктивно блоковий гравійний фільтр включає перфорований трубчастий каркас, робочу частину з біополімерно-гравійних елементів та відстійник для акумулювання механічних домішок. Запропонована конструкція забезпечує рівномірний розподіл фільтраційного потоку, зменшує ризик замулювання та підвищує довговічність роботи свердловини. Важливою перевагою є можливість транспортування фільтра у вигляді монолітної конструкції з подальшим переходом у розсипний стан без виконання додаткових технологічних операцій.

Отримані результати підтверджують ефективність використання біополімеру PLA як тимчасового в'яжучого матеріалу для виготовлення блокових гравійних фільтрів. Запропонована технологія дозволяє підвищити надійність транспортування фільтрувальних елементів, забезпечити формування високопористого середовища безпосередньо у свердловині та зменшити негативний вплив на довкілля. Таким чином, застосування біополімерних матеріалів у технологіях спорудження гідрогеологічних свердловин є перспективним напрямом розвитку інноваційних рішень у енергетичній галузі.

Список використаних джерел:

1. Судаков, А.К., Шумов, А.С. (2025). Інноваційне в'яжуче блокових гравійних фільтрів глибоких експлуатаційних свердловин. Науковий вісник ДонНТУ, (1), 246–254. https://doi.org/10.31474/2415-7902-2025-1-14-246-254

2. Судаков, А. К., Дреус, А. Ю., Гапіч, Г. В., Шумов, А. С. (2025). Технологія обладнання бурових свердловин біорозчинними блоковими гравійними фільтрами. Інструментальне матеріалознавство, (28), 28–39. https://doi.org/10.33839/2708-731X-28-1-28-39

3. Судаков, А. К., Ратов, Б. Т., Шумов, А. С., & Сарбопеєва, М. Д. (2025). Дослідження фізико-механічних властивостей біополімерного гравійного композиту блокових фільтрів гідрогеологічних свердловин. Мінеральні ресурси України, (4), 48-53. https://doi.org/10.31996/mru.2025.4.48-53

УДК 622.1

Таран Я.Г., бакалавр 3 курс, група ГСм-24-1п,
гірничо-металургійний факультет
Науковий керівник: Назаренко В.О., д.т.н., проф.
Технічний університет «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»

АНАЛІЗ ВИКОРИСТАННЯ СУЧАСНОГО МАРКШЕЙДЕРСЬКО-ГЕОДЕЗИЧНОГО ОБЛАДНАННЯ ПІД ЧАС МОНІТОРИНГУ ЗРУШЕНЬ ЗЕМНОЇ ПОВЕРХНІ

Підземний видобуток вугілля у Західному Донбасі супроводжується інтенсивним техногенним впливом на масив гірських порід, що призводить до зрушень і деформацій земної поверхні. Дані процеси становлять серйозну загрозу для промислових об'єктів, житлової забудови, транспортної інфраструктури та природного середовища. У зв'язку з цим особливого значення набуває організація ефективного маркшейдерського моніторингу зрушень земної поверхні.

Актуальність дослідження зумовлена необхідністю підвищення точності та оперативності спостережень за деформаціями поверхні в умовах ускладненої геодинамічної обстановки Західного Донбасу. Традиційні методи маркшейдерських знімань часто є трудомісткими та обмеженими за площею охоплення. Тому впровадження сучасних технологій, зокрема знімань із використанням безпілотних літальних апаратів (БПЛА), відкриває нові можливості для підвищення ефективності маркшейдерського контролю.

Мета дослідження – аналіз та узагальнення методів маркшейдерського моніторингу зрушень земної поверхні при підземному видобутку вугілля в Західному Донбасі з обґрунтуванням доцільності застосування БПЛА.

Західний Донбас характеризується складними гірничо-геологічними умовами, зокрема значною потужністю осадових порід, наявністю водоносних горизонтів і розгалуженою мережею гірничих виробок. Підземний видобуток вугілля призводить до порушення природної рівноваги гірського масиву, що проявляється у вигляді осідань, нахилів, горизонтальних зсувів та розтріскування земної поверхні.

Форма та величина зрушень залежать від глибини розробки, потужності вугільних пластів, системи розробки, фізико-механічних властивостей порід та гідрогеологічних умов. У Західному Донбасі часто спостерігаються протяжні мульди осідання, що потребують систематичного контролю. Саме маркшейдерські спостереження є основним джерелом кількісної інформації про параметри цих деформацій.

Класичний маркшейдерський моніторинг ґрунтується на створенні та спостереженні спеціальних маркшейдерських мереж – профільних ліній, реперів і маркшейдерських знаків. Основними методами є:

- Геометричне нівелювання, яке забезпечує високу точність визначення вертикальних зрушень;
- Тахеометричні знімання, що дозволяють фіксувати планові та висотні зміщення;
- Спостереження за деформаціями будівель і споруд, розташованих у зоні впливу гірничих робіт.

Незважаючи на високу точність, ці методи мають обмеження щодо оперативності та безпеки виконання робіт, особливо на великих і важкодоступних територіях.

Останніми роками все більшого поширення набувають GPS/GNSS-спостереження, які дають змогу фіксувати повільні горизонтальні та вертикальні деформації поверхні. Однак їх точність та детальність просторового покриття часто є недостатніми для локальних зон активних зрушень.

Особливу актуальність у сучасних умовах набуває використання БПЛА для виконання маркшейдерських знімань. Аерофотознімання з дронів дозволяє оперативно отримувати ортофотоплани і цифрові моделі рельєфу з високою просторовою роздільною здатністю.

Перевагами БПЛА для маркшейдерського моніторингу є:

- можливість швидкого охоплення значних площ;
- висока детальність фіксації мікрорельєфу;
- зменшення ризиків для персоналу;
- можливість регулярного повторного знімання для аналізу динаміки зрушень.

У районах Західного Донбасу БПЛА є особливо ефективними для виявлення зон інтенсивного осідання, тріщин і деформацій поверхні, які можуть залишатися непоміченими при традиційних методах. Інтеграція даних БПЛА з класичними маркшейдерськими спостереженнями суттєво підвищує інформативність моніторингу.

Ще одним цікавим інструментом є інтеграція даних аерознімання (LiDAR та фотограмметрія) з AI-алгоритмами обробки в Trimble Business Center (TBC), що дозволяє радикально пришвидшити побудову цифрових моделей рельєфу (DTM).

Впровадження AI-технологій трансформує роль маркшейдера з виконавця рутинних операцій у аналітика-контролера інтелектуальних систем. Ефективність моніторингу в Західному Донбасі суттєво підвищується завдяки принципу «менше кліків – більше аналізу».

Точність деформаційних моделей тепер забезпечується алгоритмами «розумного» проріджування (Smart Downsampling), які динамічно адаптуються до складності мікрорельєфу, зберігаючи деталі мульд зрушення. Автоматизація процесів за допомогою eCogAI™ забезпечує об'єктивність даних, що є критичним для прогнозування геомеханічних ризиків. Подальша індустріальна імплементація цих методів є необхідним кроком для забезпечення сталого розвитку гірничодобувного комплексу регіону. Використання 3D Deep Learning класифікаторів (табл. 1) дозволяє маркшейдеру зосередитися на аналізі зон осідання, отримуючи високоточні векторизовані дані про зміщення об'єктів інфраструктури.

Таблиця 1

Вплив функцій AI-обробки на можливий функціонал обробки результатів маркшейдерського моніторингу

Функція AI-обробки (TBC/eCogAI™)	Специфікація та вплив на моніторинг деформацій
Smart Downsampling	Проріджування даних із динамічним розміром комірки, що автоматично зменшується при різких змінах нахилу. Це дозволяє зберігати критичні деталі рельєфу (тріщини, борти мульд зрушення).
Bare Ground Filter	Видалення низької рослинності для підготовки «ідеальної основи» під 3D Deep Learning класифікацію земної поверхні.
Classification (Outdoor Aerial)	3D Deep Learning класифікатор, що автоматично розділяє ґрунт, будівлі, рослинність та лінії електропередач для аналізу інфраструктурних ризиків.
Stockpile Extraction	Функція «Stockpile picker» дозволяє одним кліком визначити межу териконів чи складів вугілля, замінюючи десятки ручних операцій для розрахунку об'ємів.
Tunneling Classifier	Автоматичне розпізнавання елементів у виробках: гірська порода, торкрет-бетон, арматурна сітка та анкерне кріплення (rock bolts).
Railway Classifier	Класифікація елементів залізничної інфраструктури (рейки, шпали, баласт), що є життєво важливим для моніторингу підроблюваних колій.

Таким чином, впровадження AI-технологій трансформує роль маркшейдера з виконавця рутинних операцій у аналітика-контролера інтелектуальних систем. Точність отриманих моделей поверхні забезпечується алгоритмами «розумного» проріджування (Smart Downsampling), які динамічно адаптуються до складності мікрорельєфу, зберігаючи деталі мульд зрушення. Автоматизація процесів за допомогою eCogAI™ забезпечує об'єктивність даних, що є критичним для прогнозування геомеханічних ризиків.

Висновки. Маркшейдерський моніторинг зрушень земної поверхні є невід’ємною складовою безпечного ведення підземних гірничих робіт у Західному Донбасі. Традиційні методи знімань забезпечують високу точність, але потребують доповнення сучасними технологіями.

Застосування безпілотних літальних апаратів у поєднанні з впровадження AI-технологій є перспективним напрямом розвитку маркшейдерських досліджень, оскільки дозволяє підвищити оперативність, наочність і комплексність контролю зрушень. Поєднання класичних та інноваційних методів створює надійну основу для прогнозування деформацій і зменшення негативних наслідків підземного видобутку вугілля.

Список використаних джерел:

1. Colomina I., Molina P. Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing // ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2014. P. 79-97. https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2014.02.013

2. Nex F., Remondino F. UAV for 3D mapping applications // Applied Geomatics, 2014. DOI:10.1007/s12518-013-0120-x.

3. Trimble Business Center. Field-to-finish survey CAD software. https://geospatial.trimble.com/en/products/software/trimble-business-center.

4. Nazarenko V., Brui.H., Kuchin O. Determination of design indicators of earth surface deformations for mineable buildings and structures. Збірник наукових праць. №167 (2023) "Геотехнічна механіка". ІГТМ НАН України. 119-128 С. https://doi.org/10.15407/geotm2023.167.119.

5. Назаренко В.О., Бруй Г.В., Панасюк А.В., Молокова С.В., Куницька М.С. Вдосконалення методики прогнозування впливу очисних гірничих робіт на земну поверхню за даними маркшейдерських інструментальних вимірювань. Науковий журнал Метінвест Політехніки, №6, 2026, 185-192 с. DOI https://doi.org/10.32782/3041-2080/2026-6-23.

6. Sakhno, I.; Sakhno, S.; Petrenko, A.; Barkova, O.; Kobylianskyi, B. Numerical simulation of the surface subsidence evolution caused by the flooding of the longwall goaf during excavation of thin coal seams. IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci. 2023, 1254, 012057. https://doi.org/10.3390/app14135733.

УДК 622.271:622.235

Тітов Д.А., аспірант кафедри відкритих гірничих робіт
Науковий керівник: Єременко Г.І., к.т.н., доц.
Криворізький національний університет

ТЕХНОГЕННИЙ ЧИННИК КОРИГУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ГІРНИЧИХ РОБІТ КАР'ЄРІВ ЦЕНТРАЛЬНОЇ ЧАСТИНИ КРИВБАСУ

На території сучасного Кривбасу розташовані два суміжних кар'єри, унікальність яких полягає в тому, що вони розробляють частину виключно складного за своєю геологічною будовою та структурою покладів Саксаганського родовища залізних руд. Така обставина є наслідком надзвичайно тривалої розробки (понад 100 років) надр, локалізованих в подекуди спільних кар'єрних полях, а також того, що значна частина покладів наразі включає в себе зони бувших шахтних полів сусідніх підземних рудників, з яких до початку розробки відносно бідних залізистих кварцитів відкритим способом вівся видобуток багатих руд підземним.

Внаслідок перерахованих й інших обставин і ознак дана частина Саксаганської свити визнана зоною вищої категорії складності будови та їй надано статус техногенного родовища окремого типу (Протокол ДКЗ України №4472 від 15.09.2018 р.) [1]. Крім того, дані кар'єри ведуть свою промислову діяльність фактично в густозаселеній центральній частині міста, що, враховуючи сейсмічні прояви періодичних масових вибухів (МВ) та шкідливі викиди в атмосферу, зумовлює цілий ряд ще й соціальних проблем. Тому цілком закономірно, що за даних умов головні складнощі розробки покладів зумовлюються структурними аномаліями розглянутих породних масивів, що, власне, й спонукало нас до перегляду ряду науково-методичних підходів щодо обґрунтування параметрів технологічних процесів у них, насамперед – буро-підривних робіт (БПР), проєктування яких за умов подекуди хаотично перемішаних гірських масивів надзвичайно ускладнилося та змусило зрештою надрокористувачів піти на значні фінансові витрати задля створення науково обґрунтованої бази останнього.

Детальне ознайомлення з новими поглибленими дослідженнями геологічного середовища кар'єру «Північний», виконаними ДУ «ІГНС НАН України» на підставі договору № 03/2023 від 12.06.2023 р., укладеного на замовлення ТОВ «Українська гірничодобувна компанія» [1] змусило вкотре, але вже зовсім по-новому, не тільки звернути увагу на те, що експериментальні МВ з реєстрацією реальних деформацій та напружень у породному масиві навколо зарядів ВР продовжують виявляти нижчі показники, порівняно з розрахунковими [2, 3], головним чином внаслідок особливого стану системних макротріщин, які розділяють масив на окремості-блоки, але й суттєво відкоригувати трактування механізму розвитку фізичних процесів за даних умов. Зокрема, на наше переконання, домінуючим фактором, за умов техногенного повного розділення блочного масиву на окремості, стає не пружне, а пластичне деформування перетертого матеріалу заповнення макротріщин, за якого вони виявляють властивості більше демпфера, чим передавача енергії удару зіткнення між цими окремостями, на основі чого нами було відкориговано спрощений метод урахування даного фактора в розрахунках шляхом уточнення відомого коефіцієнта k_{cm}, запропонованого проф. С. Жуковим [2], в тому, що враховується не тільки рівень заповнення тріщин мінеральним дріб'язком та вплив попередньої кінетики вибуху й інерційного фактору за проходження пружною хвилею через макроріщину, але й насиченість заповнювача водою та динаміка процесу, яка визначається бризантністю вибухової речовини свердловинного заряду.

Даними факторами можна загалом нехтувати за умов розробки типових для Кривбасу родовищ, але коли рівень техногенного катаклазу гірських порід наближається до виявленого на розглянутих об'єктах, де проробка початково системних макротріщин вимірюється вже не частками міліметру і навіть не самими міліметрами, а нерідко – сантиметрами, традиційні методи розрахунку параметрів технологічних процесів, особливо БПР, стають здебільшого неадекватними. З цим постійно зіштовхуються інженерні підрозділи, це – зумовлює зниження економічної й екологічної ефективності відкритих гірничих робіт у цілому, а відтак – вимагає якомога швидшого й радикального покращення ситуації, що, власне, й зумовлює та мотивує позитивно налаштоване керівництво розглянутих кар'єрів до широкого залучення гірничої науки в їхнє внутрішнє виробниче середовище.

Список використаних джерел:

1. Звіт з НДР: «Геологічне дослідження Саксаганського родовища залізних руд в межах кар'єру «Північний» та його західного флангу (м. Кривій Ріг) з вивченням техногенної порушеності первинного геологічного середовища внаслідок тривалої експлуатації родовища відкритим і підземним способами видобутку» (у рамках договору № 03/2023 р. від 12.06.2023 року). – К.: ДУ «Інститут геохімії навколишнього середовища НАН України». 2023. -279 с.

2. Скачков А.А. Просторова спрямованість енергії комбінованих свердловинних зарядів за диференційованого енергонасичення масиву порід // Розробка родовищ корисних копалин. НГУ, №55. 2018. – С. 88-96.

3. Матвійчук В.В., Чурсалов В.П. Вибухові роботи. ISBN: 5-8291-0261-7. Академічний Проект, 2002. – 384 с.

УДК 622.3:553.9

Фурман К.Я., студент 2 курсу, групи ГР-21,
навчально-науковий механічний інститут
Науковий керівник: Семенюк В.В., ст. викладач
Національний університет водного господарства та природокористування

ДОСЛІДЖЕННЯ УМОВ ЗАЛЯГАННЯ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ПРОМИСЛОВОЇ РОЗРОБКИ ГАЗОГІДРАТІВ В УКРАЇНІ

На сучасному етапі розвитку енергетики України питання пошуку альтернативних джерел вуглеводнів набуває критичного значення для забезпечення енергетичної незалежності держави. Враховуючи виснаження традиційних родовищ нафти і газу, особливу увагу привертають газогідрати Чорного моря, запаси яких оцінюються як колосальні.

Проте відсутність промислових технологій видобутку та недостатня вивченість геологічних умов їх залягання стримують освоєння цього ресурсу. Тому комплексне дослідження умов формування, термобаричної стабільності та перспектив промислової розробки газогідратів є своєчасним і необхідним завданням вітчизняної геології та гірничої науки.

Газогідрати – це унікальні кристалічні сполуки, що утворюються з метану та води. Вони існують у природі за умов низьких температур та високого тиску, здебільшого на морському дні та в зоні вічної мерзлоти. Їхня структура нагадує лід, але замість чистої води у решітці утримуються молекули метану. Ці «горючі льоди» вважаються одним з найперспективніших джерел природного газу майбутнього. За оцінками, світові запаси газогідратів можуть перевищувати сумарні запаси традиційного природного газу та інших вуглеводнів, що робить їх ключовим елементом довгострокової енергетичної стратегії [1;2].

Найбільш перспективними для залягання газогідратів в Україні є шельф Чорного моря, Причорноморська та Прикарпатська області. Ці регіони характеризуються сприятливими геологічними та геотермічними умовами. Численні геологічні та геофізичні дослідження підтвердили наявність відповідних температурно-тискових умов для формування та стабільного існування газогідратів у зазначених регіонах. Виявлено кілька потенційних родовищ зі значним обсягом передбачуваних запасів, що вказує на великий потенціал України як країни, що володіє газогідратними ресурсами [1;2].

Виконано значний обсяг геофізичних та геохімічних досліджень, включаючи сейсморозвідку, гравіметрію та магніторозвідку. Активно використовується 3D-моделювання родовищ для точнішої оцінки обсягів та характеру залягання газогідратів. Розробка газогідратів є надзвичайно складною задачею, що вимагає інноваційних підходів та значних інвестицій. Основні виклики полягають у наступному: Газогідрати є стабільними лише за певних умов тиску та температури. Будь-яка зміна цих параметрів може призвести до їхнього швидкого розпаду, що ускладнює процес видобутку та створює ризики для безпеки. Існуючі технології видобутку традиційного газу не придатні для газогідратів. Необхідна розробка абсолютно нових методів дестабілізації, збору та безпечного транспортування метану з цих утворень. Незважаючи на значні запаси природного газу, Україна залишається залежною від імпорту. Розробка газогідратів може стати ключовим кроком до зменшення цієї залежності та підвищення рівня енергетичної безпеки країни. Газогідрати можуть слугувати додатковим, альтернативним джерелом енергоресурсів, розширюючи енергетичний мікс України. Це дозволить знизити ризики, пов'язані з коливаннями цін на традиційні енергоносії та геополітичною нестабільністю. Інвестиції в розробку газогідратів стимулюватимуть розвиток інноваційних технологій, що включає глибоководні дослідження, нові методи буріння та переробки. Це сприятиме створенню нових високотехнологічних робочих місць та зміцненню науково-технічного потенціалу країни [1;2].

Отже, газогідрати – новий етап енергетичної безпеки України. Газогідрати відкривають значні перспективи для розширення джерел енергопостачання України та зниження залежності від імпорту традиційних видів палива. Сучасні геологічні та геофізичні дослідження в Україні підтверджують реальний та значний потенціал вітчизняних родовищ газогідратів.

Промислова розробка газогідратів є водночас і складним викликом, і унікальною можливістю для України стати лідером у галузі новітніх енергетичних технологій у XXI столітті. Інвестиції в цю галузь стимулюватимуть економічне зростання, створення робочих місць та розвиток науково-технічного потенціалу.

Список використаних джерел:

1. Смірнов Л.Ф. Технологічне використання газових гідратів. «Природні і техногенні газові гідрати». Сб. наук. праць. М.: ВНІЇГАЗ, 1990. С.127-166.

2. Мала гірнича енциклопедія : у 3 т. / за ред. В. С. Білецького. Д. : Донбас, 2004. Т. 1 : А – К. 640 с. ISBN 966-7804-14-3/

УДК 553.98:671.152:620.19

Шепель П.В., студент гр. РР-52
Державний університет «Житомирська політехніка»

ТЕХНОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ ТА ДЕФЕКТОЛОГІЯ ОБРОБКИ БУРШТИНУ В УМОВАХ МАЛОЇ МАЙСТЕРНІ

Обробка бурштину в умовах малої майстерні поєднує ремісничі підходи з необхідністю врахування складних фізико-хімічних властивостей матеріалу. На відміну від більшості мінералів ювелірного призначення, бурштин є органічним полімерним утворенням, що сформувалося внаслідок фосилізації смоли давніх хвойних рослин. Його специфічна структура визначає не лише декоративні характеристики, але й особливості технологічної поведінки під час механічної обробки. Аналіз сучасних джерел свідчить, що основні проблеми виготовлення виробів із бурштину пов'язані не стільки зі складністю формоутворення, скільки з високою чутливістю матеріалу до температурних і механічних впливів [1–3].

Встановлено, що бурштин характеризується низькою твердістю на рівні 2,0–2,5 за шкалою Мооса, однак одночасно демонструє підвищену крихкість та схильність до утворення раковистого зламу. Додаткову складність створює його низька теплопровідність і термочутливість: розм'якшення матеріалу може починатися вже при температурі близько 150 °C. Це створює характерний ефект локального перегріву, коли тепло, що виникає внаслідок тертя, не відводиться в об'єм матеріалу, а концентрується у зоні контакту інструмента з поверхнею. У практичних умовах малої майстерні такий ефект суттєво підвищує ризик поверхневого оплавлення, втрати прозорості та виникнення мікротріщин. Саме тому під час роботи електричним інструментом рекомендовано використовувати знижені режими обертання – у межах 3000–7000 об/хв при мінімальному контактному навантаженні.

Аналіз технологічних схем механічної обробки показує, що однією з поширених причин дефектоутворення є неправильна послідовність шліфувальних операцій. Початкове формування виробу традиційно здійснюється із використанням абразивів середньої зернистості, однак жорсткі абразивні матеріали залишають на поверхні бурштину глибокі V-подібні подряпини, які у випадку прозорих або напівпрозорих різновидів стають критичними дефектами. Особливо важливо, що такі пошкодження не усуваються безпосереднім поліруванням, оскільки мікротріщини залишаються відкритими й стають зонами накопичення сторонніх речовин.

Окрему увагу привертає так званий «зелений дефект», пов'язаний із використанням пасти ГОЯ. Аналіз механізму його виникнення показує, що проблема має не лише механічну, але й фізико-хімічну природу. Під час полірування на високих обертах стеаринові компоненти пасти розм'якшуються та проникають у мікротріщини разом із частинками оксиду хрому. Після охолодження відбувається фіксація пігменту в дефектних ділянках, що візуально проявляється у вигляді стійкого зеленого забарвлення поверхневих дефектів. Важливо, що використання органічних розчинників для очищення є небезпечним, оскільки може спричиняти помутніння поверхні або структурні пошкодження матеріалу [4–6].

З огляду на це сучасні підходи до обробки бурштину орієнтовані на застосування більш делікатних методів фінішної обробки. Практичний інтерес становить технологія безабразивного полірування, яка базується на термопластичному вигладжуванні поверхні за допомогою щільних тканинних матеріалів. Такий підхід не супроводжується інтенсивним видаленням матеріалу та дозволяє мінімізувати ризик виникнення нових мікродефектів. Крім того, критично важливим етапом залишається свердління виробів, під час якого рекомендовано застосовувати водяне охолодження, низькі швидкості обертання та переривчастий режим подачі інструмента.

Таким чином, дефектологія обробки бурштину безпосередньо пов'язана з його органічною природою та специфічними фізико-механічними властивостями. Аналіз технологічних ризиків свідчить, що якість готового виробу визначається не лише вибором інструменту, але й правильним розумінням механізмів утворення дефектів. В умовах малої майстерні саме адаптація технологічних параметрів до особливостей матеріалу є ключовою умовою забезпечення високої якості обробки та мінімізації виробничих втрат.

Список використаних джерел:

1. Polishing Amber – Jewelry Discussion – Ganoksin Orchid. URL: https://orchid.ganoksin.com/t/polishing-amber/9953
2. Amber. Wikipedia. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Amber
3. Properties of Baltic Amber. Forever Amber Jewellery. URL: https://www.foreveramber.au/about-baltic-amber/properties-of-baltic-amber
4. The Properties of Amber. Ancient Carved Ambers in the J. Paul Getty. URL: https://www.getty.edu/publications/ambers/intro/6/
5. Amber Value, Price, and Jewelry Information. International Gem Society. URL: https://www.gemsociety.org/article/amber-jewelry-and-gemstone-information/
6. How To Work With Amber. Amberica West. URL: https://www.ambericawest.com/working/

УДК 622.271:562:622.34

Шпанко І.В., аспірант, 2 курс
гірничо-металургійний факультет
Науковий керівник: Луценко С.О., к.т.н..,
доц. каф. відкритих гірничих робіт
Криворізький національний університет

МОДЕЛЮВАННЯ ТРАНСПОРТНИХ РУДОПОТОКІВ НА ЗАЛІЗОРУДНИХ КАР'ЄРАХ КРИВБАСУ З ВИКОРИСТАННЯМ НЕОРІЄНТОВАНИХ ГРАФІВ

Основною виробничою одиницею на залізорудних кар'єрах є екскаваторно-автомобільний комплекс (ЕАК), який включає гірничий екскаватор, кар'єрні автосамоскиди та систему технологічного транспорту. Ефективність ЕАК складає 65–75% собівартості видобутку залізної руди в кар'єрах. На підставі аналізу вітчизняних та закордонних науковців автор [2] справедливо зазначає, що «існують різні підходи до забезпечення ефективної роботи екскаваторно-автомобільних комплексів на відкритих гірничих роботах». Удосконалюються методи моделювання [4], впроваджується інструментарій генеративного штучного інтелекту в кар'єрах [5], покращується якість планування гірничих робіт. Кожний кар'єр має власні геологічні особливості, гірничо-технологічні умови тощо, тому практично неможливо застосувати єдиний комплексний підхід, і «проблему роботи екскаваторно автомобільних комплексів слід вирішувати в кожному випадку окремо» [2].

При детальному розгляді формування кар'єрного вантажопотоку, як результату узгодженої роботи екскаваторно-автомобільного комплексу (ЕАК), сукупність окремих технологічних завдань переростає в узагальнену проблему, вирішення якої дозволить максимально ефективно стабілізувати якість руди, що надходить з кар'єру на збагачення [3]. Також авторами [3] доведено, що при формуванні рудопотоків у кар'єрі врахування якісних показників залізорудної сировини «дає можливість визначитися з оптимальними параметрами видобутку та транспортуванням залізорудної сировини для формування оптимального вихідного рудопотоку з кар'єру на дробарно-збагачувальну фабрику з метою отримання кінцевої продукції запланованої якості».

Отже, у складі існуючих систем оперативного управління ЕАК на залізорудних кар'єрах можна виділити наступні взаємопов'язані проблеми: пошук найкоротших шляхів; оптимізація вантажопотоків; ефективне управління транспортними потоками у реальному часі; управління якістю залізорудної сировини. Вирішенню деяких з цих науково-практичних завдань присвячене дане дослідження.

В Першотравневому кар'єрі ПРАТ ПІВНГЗК на видобутку в основному задіяний автотранспорт. Розгалужена мережа автомобільних доріг поєднує точки навантаження (екскаватори) та розвантаження (дробарка, автомобільний відвал, перевантажувальний пункт тощо). Основним завданням транспортної мережі кар'єру є ефективне перевезення гірничої маси транспортними засобами (автосамоскидами). Основні транспортні потоки в кар'єрі поділяються на рудний та скельний (розкрив). Рудний та скельний потік в свою чергу також поділяються на два напрямки: один рудний потік прямує на колодязь дробарки ККД (конусна дробарка крупного подрібнення), інший на перевантажувальний пункт (ПП). Якщо розділити всю мережу автошляхів на ділянки, то маємо відокремити ділянки які обслуговують лише окремі екскаватори, тобто по цих ділянках рухаються автосамоскиди які вантажаться у певного окремого екскаватора і ділянки спільного користування, тобто автосамоскиди перетинаючи так звану точку примикання рухаються по ділянках які є спільними для декількох екскаваторів. Особливу увагу маємо приділяти саме ділянкам спільного користування, адже якщо по тій чи іншій причині буде незадовільний, або взагалі припинений рух на цій ділянці дороги, то негативний вплив на виробничий процес у кар'єрі буде в рази більший, порівняно з втратою ділянки яка обслуговує окремий екскаватор. Головним завданням організації роботи (ЕАК) є збалансований розподіл вантажопотоків при ритмічній роботі гірничо-транспортного обладнання.

Для оптимізації транспортних рудопотоків запропоновано використовувати неорієнтований граф. Під графом будемо розуміти структуру даних, за допомогою якої моделюємо зв'язки між різними об'єктами. Вершини графа складаються з множини пунктів навантаження, розвантаження та примикань. Окремо введено вершину пункту обслуговування та передачі автосамоскидів наступній зміні. В залежності від застосовуваних критеріїв оптимізації або їх комбінації, ваги ребер відображають: відстань і середньозважені ухили ділянок доріг між вершинами; час руху автосамоскидів між пунктами навантаження і розвантаження; вартість транспортування та ін. Основним показником є відстань між вершинами графа. Відстані визначаються за допомогою геодезичних даних або координат з плану гірничих робіт кар'єру. Кількість координат між вершинами графа необмежена і залежить від необхідної точності та профілю доріг. Додавання точок зазвичай припиняється, якщо це вже не змінює заплановану похибку. Використання графа дозволяє визначати підграфи всіх можливих маршрутів між пунктами навантаження – розвантаження й навпаки. Транспортний маршрут складається з переліку вершин графа.

Застосовуючи алгоритм Дейкстра знаходимо найкоротші шляхи автосамоскидів від місця навантаження до місця розвантаження. Цей алгоритм дозволяє побудувати маршрути при закріпленні автосамоскидів за певним екскаватором і місцем розвантаження. Визначаємо всі шляхи автосамоскидів від конкретного екскаватора до різних пунктів розвантаження, а також маршрути від конкретного місця розвантаження до різних екскаваторів. За результатами розрахунків встановлено, що таких маршрутів може бути декілька.

В кар'єрі протягом зміни автосамоскиди виконують транспортну роботу за простими та комбінованими схемами маршрутів. Зазвичай використовують прості схеми роботи (рис. 1), коли за окремим екскаватором закріплена певна кількість автосамоскидів. Автосамоскиди на початку зміни починають рух з площадки передачі змін (Ппз) до певного екскаватора (Е) відповідно до наряду, де і працюють протягом всього часу зміну. Автосамоскиди після навантаження рушають до точки розвантаження (Р), після чого повертаються назад до екскаватора. Наприкінці робочої зміни автосамоскиди після останньої ходки повертаються на Ппз.

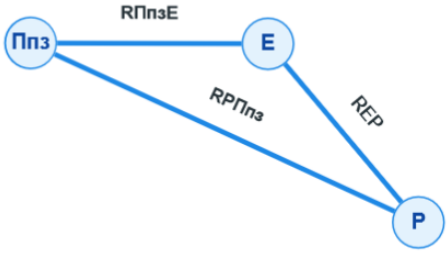


Рис. 1. Фрагмент графа

Позначення: $RП_{пз}E$ – ребро «пункт передачі змін → екскаватор»; REP – ребро «екскаватор → розвантаження»; $RPП_{пз}$ – ребро «розвантаження → передача зміни»; RPE – ребро «розвантаження → екскаватор».

Маршрут визначається шляхом послідовного перерахування ребер графа, кожне з яких задається впорядкованим набором вершин. Розглянемо приклад. Маршрут руху автосамоскида від пункту $П_{ПЗ}$ до екскаватора ЕКГ-1 описується послідовністю вершин: $П_{ПЗ}$ → 14 → 13 → ЕКГ-1. Довжина цього маршруту становить $L_{ППЗ}$–Е1 = 773 м. У разі, якщо після навантаження автосамоскид здійснює розвантаження на пункті ККД, маршрут набуває вигляду: ЕКГ-1 → 13 → 14 → $П_{ПЗ}$ → 16 → 22 → ККД. Довжина такого маршруту становить 3442 м. Відповідно, загальна довжина маршруту $П_{ПЗ}$ → ЕКГ-1 → ККД дорівнює: L = 773 м + 3442 м = 4215 м. Надалі автосамоскид функціонує за циклічним маршрутом ЕКГ-1 → ККД → ЕКГ-1. Таким чином, довжина циклу становить: Lр = 3442 м + 3442 м = 6884 м. При цьому на першій половині маршруту автосамоскид рухається завантаженим, а на другій – порожнім. Наприкінці зміни автосамоскид здійснює рух за маршрутом ККД → $П_{ПЗ}$, проходячи шлях ККД → 22 → 16 → $П_{ПЗ}$ довжиною $L_{ППЗ}$–ККД. Отже, загальний шлях, пройдений автосамоскидом протягом зміни, визначається за формулою: $L_{заг}$ = $L_{ППЗ}$Е1 + n $L_{р}$Е1ККД + $L_{ППЗ}$ККД, де n – кількість транспортних циклів (ходок).

Змінюючи значення вагів ребер графа застосовуємо різні критерії оптимізації. При розрахунках маршрутів і моделюванні транспортних потоків використовувалась програма Graph Online.

Список використаних джерел:

1. Темченко А.Г., Темченко О.А., Коробійчук В.В., Шевчук Н.А., & Піскун І.А..(2022). Оцінка енергоефективності збагачуваності залізорудної сировини в умовах формування екоіндустріальних парків. *Технічна інженерія*, (2(90), 170–182. https://doi.org/10.26642/ten-2022-2(90)-170-182.

2. Фролов О.О., Литвинчук І.Д. & Остапчук А.О. (2023). Оптимізація роботи екскаваторно-автомобільного комплексу при відробці флювіогляціальних відкладів розкриву на кар'єрі Соснівського родовища гранітів. *Технічна інженерія*, (1(91), 366–376. https://doi.org/10.26642/ten-2023-1(91)-366-376.

3. Жуков С.О., Азарян В.А. Дослідження процесів стабілізації амплітудних коливань якості рудопотоків залізорудних кар'єрів. *Вісник ЖДТУ.* 2018. № 1 (81) с.240 - 245 https://doi.org/10.26642/tn-2018-1(81)-240-245.

4. Xiaowei Wang, Qi Dai, Yougang Bian, Guotao Xie, Biao Xu & Zeyu Yang. Real-time truck dispatching in open-pit mines, International Journal of Mining, 2023. https://doi.org/10.1080/17480930.2023.2201120.

5. Zamalloa, L.J., Dağdelen, K. New Approach on the Development of Operational Fleet Management Systems Using Adaptative AI Techniques: Analysis of Adaptative Goal Weights. *Mining, Metallurgy & Exploration* (2024). https://doi.org/10.1007/s42461-024-01089-w.