

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

УДК 624.19:[625.42:622.235.43]

М. М. КОНОНЕНКО^{1*}, О. Є. ХОМЕНКО², С. М. ГАПЄСВ³, Р. М. ТЕРЕЩУК⁴

^{1*}Кафедра «Транспортних систем та енергомеханічних комплексів», Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», просп. Д. Яворницького, 19, Дніпро, Україна, 49005, тел. +38 (067) 662 62 05, ел. пошта kmn211179@gmail.com, ORCID 0000-0002-1439-1183

²Кафедра «Гірничої інженерії та освіти», Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», просп. Д. Яворницького, 19, Дніпро, Україна, 49005, тел. +38 (067) 950 66 35, ел. пошта gudana.in.ua@gmail.com, ORCID 0000-0001-7498-8494

³Кафедра «Будівництва, геотехніки і геомеханіки», Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», просп. Д. Яворницького, 19, Дніпро, Україна, 49005, тел. +38 (050) 362 04 47, ел. пошта harpiev.s.m@nmu.one, ORCID 0000-0003-0203-7424

⁴Кафедра «Будівництва, геотехніки і геомеханіки», Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», просп. Д. Яворницького, 19, Дніпро, Україна, 49005, тел. +38 (095) 751 25 26, ел. пошта tereshchuk.r.m@nmu.one, ORCID 0000-0003-4509-2511

НОВА МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ ПАРАМЕТРІВ БУРОПІДРИВНИХ РОБІТ ПРИ СПОРУДЖЕННІ ПЕРЕГІННИХ ТУНЕЛІВ МЕТРОПОЛІТЕНУ

Мета. Метою даної роботи є розробка нової методики розрахунку параметрів буропідривних робіт (БПР) для проведення перегінних тунелів метрополітену з урахуванням діаметру шпуру, тиску продуктів вибуху, межі міцності порід на стискання, їх структурної будови, тріщинуватості та ущільнення під дією гірського тиску. **Методика.** Для розробки методики розрахунку параметрів БПР при спорудженні перегінних тунелів метрополітену використовували загальновідомі закони теорії пружності та основні положення квазістатично-хвильової гіпотези механізму руйнування твердого середовища під дією вибуху, в основу якої покладено принцип розміщення груп шпурів за площами, які вони займають у вибою тунелю та розташування їх за відбійними контурами. **Результати.** Розроблено нову методику розрахунку параметрів БПР при спорудженні перегінних тунелів метрополітену, в основу якої покладено принцип розміщення груп шпурів за площами, які вони займають у вибою тунелю та розташування їх за відбійними контурами. Перший етап методики містить у собі розрахунок і проектування прямих врубів, відстань між шпурами в яких визначається за радіусом зони зминання. Другий етап методики включає розрахунок: питомих і загальних витрат вибухової речовини (ВР) на вибій, величину лінії найменшого опору (ЛНО) для шпуру за радіусом зони інтенсивного подрібнення, площ груп шпурів, кількість шпурів, розрахунок та фактичну відстань між шпурами, фактичну величину заряду на шпур, фактичні питомі і загальні витрати ВР на вибій. **Наукова новизна.** Параметри розташування шпурів у вибої перегінного тунелю реалізовано за степеневою залежністю зміни ЛНО залежно від діаметру шпуру, тиску продуктів вибуху, межі міцності порід на стискання, їх структурної будови, тріщинуватості та ущільнення під дією гірського тиску. **Практична значимість.** Розроблена методика визначення параметрів БПР, для спорудження перегінних тунелів метрополітену, дозволяє раціоналізувати розташування шпурів у вибою та здійснити ресурсозбереження при виконанні прохідницьких робіт до 14 %.

Ключові слова: перегінний тунель; шпур; вибухова речовина; буропідривні роботи; зона інтенсивного подрібнення; лінія найменшого опору

Вступ

Будівництво все більшої кількості будинків і муніципалітетів, подальший розвиток дорожньо-транспортної мережі, зведення нових інженерних об'єктів, споруд і промислових підприємств вимагають виділення значної частини території, дефіцит якої з кожним роком стає все більш гострим, особливо в міських центрах. У

той же час у великих містах зростає дефіцит ділянок для нових скверів, парків, пішохідних зон, спортивних майданчиків тощо. Це призводить до збільшення щільності забудови, створення нових рівнів штучності та використання об'ємного містобудування (Haiko, Savchenko, & Haiko, 2023).

За рахунок наземних і підземних просторів сучасні міста розширюються не тільки горизон-

тально, але й вертикально. Саме вертикальне зонування допомагає розмежувати транспортний і пішохідний потік, місцевий і громадський транспорт, швидкісний і регулярний рух. При цьому розташування транспортних магістралей і тротуарів може мати найрізноманітніші варіанти, такі як наземний, надземний або підземний. Успішному вирішенню транспортних проблем міст сприяє комплексне освоєння та використання підземного простору (Pankratova, Haiko, & Savchenko, 2024a). Це означає розміщення під землею різноманітних об'єктів і споруд для проходження транспорту і прокладання інженерних комунікацій, включаючи тимчасові і постійні паркінги, інженерні споруди, комерційні та громадські об'єкти. Саме тому одним з важливих кроків розвитку міської підземної транспортної інфраструктури у великих містах і мегаполісах є будівництво метрополітену. Метро допомагає зменшити вплив шкідливих викидів від автотранспорту та оптимізувати використання муніципальних доріг, використовуючи підземний простір для перевезень (Pankratova, Haiko, & Savchenko, 2024b).

Наразі м. Дніпро стикається з серйозними транспортними проблемами. Наземний транспорт не справляється з пасажиропотоком, що призводить до сильних заторів у центрі міста. Люди, які живуть у віддалених районах, змушені витрачати величезну кількість часу на дорогу до центру міста, не кажучи вже про безпеку (Cheberiachko, Yavorska, Deryugin, et al., 2023), на яку вони наражаються, подорожуючи міськими дорогами в переповнених маршрутних таксі (Pankratova, Haiko, & Savchenko, 2024c). Аналізом розвитку міста та функціонування міського пасажирського транспорту встановлено, що в короткостроковій перспективі транспортні послуги, які надаються наземним транспортом, не зможуть забезпечити достатній приріст пасажирських перевезень, що підтверджує необхідність розвитку міського підземного транспорту. Таким чином, враховуючи значні перспективи розвитку м. Дніпро, як одного з найважливіших промислових, наукових, освітніх, культурних, фінансових та ділових центрів України, його подальше підвищення міжнародного іміджу та інвестиційної привабливості, завершення будівництва метрополітену має велике значення для вирішення проблем соціально-економічного розвитку міс-

та, покращення транспортної інфраструктури, підвищення якості транспортних послуг та досягнення високої функціональності і рентабельності. Ще одним вагомим чинником актуальності будівництва метрополітену є використання його підземної інфраструктури у якості укриття. Це пов'язано із російською військовою агресією, що заподіяла нашій країні суттєвих руйнувань інфраструктури населених пунктів.

Будівництво лінії метрополітену є особливо небезпечний, технічно складний, унікальний об'єкт (Белікова, & Тютюкін, 2023), який має І рівень відповідальності. Наразі перша черга Дніпровського метрополітену має шість станцій, гілку до електродепо та електродепо. Довжина діючої лінії становить 7,076 км. Продовження першої черги від станції «Вокзальна» до станції «Музейна» передбачає з'єднання діючої лінії з центральною частиною міста (Тютюкін, Банніков, Мірошник, & Гелетюк, 2021). Положення траси в плані та профілі визначено розміщенням станцій в основних пасажироутворюючих вузлах з урахуванням забудови, що склалася, а також геологічних і гідрогеологічних умов. Траса лінії, що продовжується, проходить під проспектом Дмитра Яворницького, де будуть розташовані станції «Театральна», «Центральна» та «Музейна» (Avanoğlu-Çetin, & Öztürk, 2019). Усі станції запроєктовані з острівними платформами, довжина яких розрахована на зупинку п'яти вагонних поїздів. Вестибюлі станцій – підземні та поєднані з підвуличними переходами. Аналізом архітектурно-будівельних рішень спорудження вестибюлів (Alkhdour, Yasin, & Tiutkin, 2023), похилих ходів (Radkevych, Tiutkin, Kuprii, & Bielikova, 2022; Тютюкін, Купрій, & Белікова, 2021; Petrenko, Bondarenko, Miroshnyk, Burskyi, & Konoval, 2023) та перегінних тунелів (Petrenko, Tiutkin, Heletiuk, & Tkach, 2020) встановлено, що для підвищення ефективності будівництва Дніпровського метрополітену необхідно розглянути технологічні рішення щодо інтенсифікації технології спорудження перегінних тунелів. Таким технологічним рішенням є застосування раціональних параметрів БПР, що дозволить підвищити безпеку робіт та призведе до ресурсозбереження при їх спорудженні (Zhang, Yao, Jiang, Xie, & Wang, 2024). Ще одним напрямом удосконалення технології ведення БПР, є не тільки підвищення безпеки підричних ро-

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

біт (Lyashenko, Vorob'ev, Nebohin, Vorob'ev, 2018), а й зниження їх впливу на довкілля (Myronova, 2016) шляхом заміщення тротилівмісних ВР на емульсійні вибухові речовини (ЕВР) вітчизняного виробництва (Krysin, Ishchenko, Klimenko, Piven, & Kuprin, 2004), які є безпечні у транспортуванні й зберіганні (Kholodenko, Ustimenko, Pidkamenna, & Pavlychenko, 2014), економічно вигідні (Kholodenko, Ustimenko, Pidkamenna, & Pavlychenko, 2015) та екологічно чисті (Myronova, 2015).

Мета

Метою наукової статті є розробка нової методики розрахунку параметрів БПР для проведення перегінних тунелів метрополітену з урахуванням діаметру шпурів, тиску продуктів вибуху, межі міцності порід на стискання, їх структурної будови, тріщинуватості та ущільнення під дією гірського тиску.

Методика

На вибір технологічної схеми та способу руйнування гірських порід при проведенні перегінних тунелів впливають інженерно-геологічні умови ділянки будівництва, водонасиченість пересічних порід, гірський тиск тощо. Виходячи із інженерно-геологічних умов спорудження перегінних тунелів, вони розташовані на глибині 68 м в скельних породах (гранітах), що мають межу міцності на стискання 49-123 МПа, тому їх будівництво буде проводитись закритим (підземним) способом за допомогою БПР. Для будівництва перегінних тунелів від ствола №16-біс до станції «Музейна» прийнято схему проведення тунелів суцільним вибоєм. Означена технологічна схема застосовується для проведення тунелів у стійких породах з межею міцності на стискання при $\sigma_{cm} \geq 40$ МПа, що мають висоту до 10 м та ширину до 20 м. Обмеження за висотою та шириною пов'язане з можливістю використання бурового та допоміжного обладнання, а також з небезпекою розкриття за один прийом незакріпленого прольоту, що має значну висоту.

Як відомо, БПР – це сукупність робочих процесів, що пов'язані з відділенням гірських порід від масиву за допомогою дії енергії вибуху. Сам термін БПР виник з метою підкреслення нерозривності, взаємозв'язку та взаємозале-

жності таких робочих процесів як буріння, заряджання та безпосередньо підривання. В залежності від того, наскільки раціонально розраховані параметри БПР, вони можуть вагомо змінювати техніко-економічні показники проведення підземних гірничих виробок. На теперішній час існує багато різноманітних методик розрахунку параметрів БПР для проведення підземних гірничих виробок. Означені методики мають більш-менш складні алгоритми розрахунку та нерідко демонструють абсолютно різні результати. Тому розглянемо деякі з існуючих методик, які запропоновані провідними вченими різних країн.

Перший клас методик передбачає першочергове визначення питомої витрати ВР, яка визначається за даними практики, розраховується за емпіричними формулами або приймається за табличними даними, що наведені у довідниках. На підставі визначеної питомої витрати ВР розраховується кількість шпурів у вибої виробки, а далі наступні параметри БПР. Суттєвим недоліком такого підходу є те, що коефіцієнти, які використовуються при розрахунках мають великий широкий діапазон значень, прийняття яких залежить від кваліфікації проєктувальника. У результаті параметри БПР встановлюють за усередненими значеннями, а це в свою чергу негативно позначиться на ефективності підричних робіт, а саме призводить до проведення додаткових експериментальних підривань для уточнення раціональних параметрів БПР (Kononenko, Khomenko, et al., 2023). Авторами означених методик є Протод'яконов М. М., Богомолів В. І., Покровський М. М., Мінделі Е. О., Суханов А. Ф., Ібраєв Ш. І., Таранов П. Я., Лангефорс У., Борисова С. С., Рогинським В. М., Бокий Б. І., Барон Л. І. та інші. Аналізом найбільш розповсюджених методик, які передбачають першочергове визначення питомої витрати ВР, встановлено, що у всіх існуючих методиках визначення питомої витрати ВР і кількості шпурів у вибої виробки, ключовими факторами є міцність гірської породи та площа поперечного перерізу виробки. Рідше у формулах зустрічається працездатність ВР, її щільність заряджання та глибина комплексу шпурів. Всі формули у методиках були отримані протягом 20-х – 60-х років минулого століття, та були тільки удосконалені послідовниками, а деякі формули використовуються у своєму первин-

ному вигляді й дотепер. Їх головним недоліком є те, що вони були розроблені при застосуванні тротилівмісних ВР, та не враховують детонаційні характеристики сучасних ЕВР.

Принципово відрізняються методики, які відносяться до другого класу. Ці методики передбачають визначення зон зминання та тріщиноутворення навколо шпуру в залежності від фізико-механічних властивостей гірських порід та детонаційних характеристик ВР. На підставі визначення цих зон, розраховується ЛНО між групами шпурів і відстань між ними у рядах, після чого їх розміщують у вибої виробки. Так, Андрієвський О.П. (Andrievskii, 1993) запропонував методику розрахунку та складання паспорту БПР при проведенні підземних гірничих виробок, згідно якої розраховуються радіуси зон зминання та тріщиноутворення, а за останньою визначається ЛНО шпурів. Шпури у вибою виробки розташовують за сіткою на розрахованих відстанях. Контурні шпури розташовують рівномірно за периметром виробки на відстані, що не перевищує радіусу зони тріщиноутворення, а відстань між контурними шпурами розраховується окремо. Взявши за основу методику Андрієвського О. П., колектив авторів (Вохмін С. А., Курчін Г. С. і Кірсанов О. К.) запропонував її удосконалити за рахунок введення додаткової емпіричної формули визначення швидкості детонації аміачно-селітряних ВР залежно від діаметру заряду та щільності заряджання. Також ними було запропонована послідовність розрахунку та складання паспорту БПР при проведенні гірничих виробок графоаналітичним методом.

Тому спираючись на спільну дію квазістатичної та хвильової гіпотез дії вибуху в масиві гірських порід (Kononenko, & Khomenko, 2021) та комбінацію двох попередніх вище означених підходів потрібно розробити нову методику розрахунку параметрів БПР для спорудження перегінних тунелів метрополітену, яка б враховувала вплив фізико-механічних властивостей середовища та детонаційні характеристики ВР.

Розробка методики визначення параметрів БПР для спорудження перегінних тунелів метрополітену містила у собі виконання таких етапів:

- проектування та послідовність розрахунку прямих врубів за радіусом зони зминання;
- розробка методики розрахунку параметрів

БПР для проведення перегінних тунелів метрополітену в основу якої буде покладено принцип розміщення груп шпурів за площами, які вони займають у вибою виробки та розташування їх за відбійними контурами.

Результати

При спорудженні перегінних тунелів підземним способом за допомогою БПР найбільшого поширення набули овоїдна або кругла форми їх поперечного перерізу. Тому методику розрахунку параметрів БПР при спорудженні перегінних тунелів буде розроблено для цих двох форм виробок.

Порядок розрахунку параметрів БПР за новою методикою буде складатися з виконання таких основних етапів. Перший етап містить у собі розрахунок і проектування прямого врубу (Kononenko, Khomenko, Cabana, et al., 2023), а другий – безпосередньо розрахунок кількості шпурів, розміщення їх у вибою виробки та загальні витрати ВР на вибій (Khomenko, Kononenko, Myronova, & Savchenko, 2019).

За результатами досліджень, що наведено у роботі (Kononenko, Khomenko, Sadovenko, et al., 2023), пробивна відстань між шпурами прямого врубу дорівнює величині радіуса зони зминання та визначається за формулою

$$R_{zm} = 0,5 \cdot d \cdot \sqrt{1 + \frac{\rho \cdot D^2 \cdot K_{\partial z}}{2 \cdot \sigma_{cm} \cdot K_{cn} \cdot K_c \cdot K_y}}, \text{ м}; \quad (1)$$

де d – діаметр шпуру, м; ρ – щільність ВР або густина ЕВР, кг/м³; D – швидкість детонації ВР, м/с; σ_{cm} – межа міцності порід на стискання, Па; $K_{\partial z}$ – коефіцієнт, що враховує зміну тиску продуктів вибуху на стінки зарядної порожнини залежно від діаметру заряду ВР (Kononenko, Khomenko, Sadovenko, et al., 2023); K_{cn} – коефіцієнт структури породи, який залежить від властивостей масиву (Kononenko, Khomenko, Sadovenko, et al., 2023): для в'язких, пружних і пористих порід $K_{cn} = 2,0$, для дислокованих, з мінливим заляганням та дрібною тріщинуватістю $K_{cn} = 1,4$, для сланцевих, з мінливою міцністю та напластуванням, перпендикулярним напрямку зарядної порожнини $K_{cn} = 1,3$, для масивних, крихких $K_{cn} = 1,1$, для монолітних $K_{cn}=1,0$, для дрібнопористих, нещільних $K_{cn}=0,8$; K_c – коефіцієнт структурного ослаблення масиву, що визначається за однією з формул наданих у роботі (Kononenko, Khomenko,

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

2021); K_y – емпіричний коефіцієнт ущільнення порід під дією гірського тиску (Kononenko, Khomenko, 2021).

Мінімальну площу прямого врубу визначається за емпіричною залежністю

$$S_{ep} = 0,45 \cdot (l_{ш} \cdot \eta)^{0,91}, \text{ м}^2, \quad (2)$$

де $l_{ш}$ – довжина комплексу шпурів, м; η – коефіцієнт використання шпурів (КВШ), що дорівнює 0,8...0,95.

Мінімальна кількість шпурів у врубі, без урахування компенсаційних (холостих)

$$N_{ep} = S_{ep} / (\pi \cdot R_{зм}^2), \text{ шт.} \quad (3)$$

Згідно другого етапу виконується розрахунок: ЛНО для шпуру, площ груп шпурів, кількості шпурів, відстані між ними, величину заряду на шпур, питомі і загальні витрати ВР на вибій перегінного тунелю (Kononenko, Khomenko, Kosenko, Myronova, Bash, & Razynich, 2024). Визначення працездатності ВР за ступенем реалізації швидкості детонації, виконується згідно методики, що подано у роботі (Kononenko, Khomenko, Kovalenko, Kosenko, Zagorodnii, & Dychkovskiy, 2023).

Розрахункові питомі витрати ВР визначаються за найбільш універсальною формулою проф. Покровського М. М. (Kononenko, Khomenko, Kosenko, Myronova, Bash, & Razynich, 2024)

$$q = 0,01 \cdot \sigma_{cm} \cdot K_{cn} \cdot k_{зам} \cdot e, \text{ кг/м}^3, \quad (4)$$

де σ_{cm} – межа міцності порід на стискання, МПа; $k_{зам}$ – коефіцієнт затиску породи, який змінюється у межах 1,2–1,5; e – коефіцієнт відносної працездатності ВР, що розраховується за методикою поданою у роботі (Kononenko, Khomenko, Kovalenko, Kosenko, Zagorodnii, & Dychkovskiy, R. 2023).

Об'єм висадженої породи у масиві складає

$$V = S_{np} \cdot l_{ш}, \text{ м}^3, \quad (5)$$

де S_{np} – площа перегінного тунелю у проходці

$$S_{np} = 0,25 \cdot \pi \cdot B_{np} \cdot H_{np}, \text{ м}^2, \quad (6)$$

де B_{np} – ширина перегінного тунелю у проходці, м; H_{np} – висота перегінного тунелю у проходці, м.

Розрахункова кількість ВР на вибій становить

$$Q = q \cdot V, \text{ кг.} \quad (7)$$

Враховуючи умови роботи шпурових зарядів, їх розташування відносно відкритої поверхні, а також необхідності подрібнення масиву порід до куска розміром $< 0,2$ м, розрахунок ЛНО для шпуру рекомендовано проводити за радіусом зони інтенсивного подрібнення (Kononenko, Khomenko, Sadovenko, et al., 2023).

Розрахункова величина ЛНО для шпуру

$$W = R_{зм} \cdot \left(1 + \frac{\rho \cdot D^2 \cdot d \cdot K_{dz}}{8 \cdot R_{зм} \cdot \sigma_{cm} \cdot K_{cn} \cdot K_c \cdot K_y} \right)^{0,5}, \text{ м.} \quad (8)$$

Площа контурних шпурів

$$S_k = S_{np} - \pi \cdot \frac{B_{np} - 2 \cdot (\Delta_o + W)}{2} \times \frac{H_{np} - 2 \cdot (\Delta_o + W)}{2}, \text{ м}^2, \quad (9)$$

де Δ_o – відстань від контуру виробки до лінії контурних шпурів, що дорівнює величині радіусу зони зминання $R_{зм}$, за даними практичного досвіду ця відстань приймається у межах 0,15–0,25 м.

Площа вибою для відбійних шпурів визначається за таким виразом

$$S_{від} = S_{np} - (S_{ep} + S_k), \text{ м}^2, \quad (10)$$

де S_{ep} – прийнята площа врубу, м².

Розрахункова кількість відбійних шпурів складає

$$N_{p.в} = \frac{1,27 \cdot q \cdot S_{від}}{\rho \cdot d^2 \cdot k_3}, \text{ шт.}, \quad (11)$$

де k_3 – коефіцієнт заповнення шпуру ВР, який змінюється у межах 0,30–0,85, або пропонується розраховувати за емпіричною залежністю (Kononenko, Khomenko, Cabana, et al., 2023)

$$k_3 = 0,225 \cdot \sigma_{cm}^{0,25}, \quad (12)$$

де σ_{cm} – межа міцності порід на стискання, МПа.

Площа вибою, яка приходить на один відбійний шпур становить

$$S_{в.ш} = S_{від} / N_{p.в}, \text{ м}^2. \quad (13)$$

Скорегована розрахункова ЛНО відбійного шпуру складе

$$W_{ср.в} = \sqrt{S_{в.ш}}, \text{ м.} \quad (14)$$

Розрахункова відстань між відбійними шпурами в ряду відповідає виразу

$$a_{p.в} = m \cdot W_{ср.в}, \text{ м,} \quad (15)$$

де m – коефіцієнт зближення зарядів для відбійних шпурів, який змінюється у межах 1,0–

1,3.

Кількість рядів відбійних шпурів
 – за шириною перегінного тунелю

$$n_{з.р.с} = \frac{0,5 \cdot B_{np} - \Delta_o - 0,5 \cdot b_{ep}}{W_{ср.с}} - 1, \text{ шт.}; \quad (16)$$

– за висотою перегінного тунелю

$$n_{в.р.с} = \frac{0,5 \cdot H_{np} - \Delta_o - 0,5 \cdot h_{ep}}{W_{ср.с}} - 1, \text{ шт.}; \quad (17)$$

де b_{ep} і h_{ep} – відповідно ширина і висота врубу, м.

Фактична відстань між рядами відбійних шпурів

– за шириною перегінного тунелю

$$W_{з.ф} = \frac{0,5 \cdot B_{np} - \Delta_o - 0,5 \cdot b_{ep}}{n_{з.р.с} + 1}, \text{ м}; \quad (18)$$

– за висотою перегінного тунелю

$$W_{в.ф} = \frac{0,5 \cdot H_{np} - \Delta_o - 0,5 \cdot h_{ep}}{n_{в.р.с} + 1}, \text{ м}. \quad (19)$$

Оптимальні контури розташування рядів відбійних шпурів – це ряди, які повторюють форму поперечного перерізу перегінного тунелю.

Кількість відбійних шпурів у i -му контурі

$$N_{с(i)} = 2 \cdot \pi \cdot \sqrt{0,125 \cdot (b_i^2 + h_i^2)} / a_{р.с}, \text{ шт.}; \quad (20)$$

де b_i і h_i – відповідно ширина і висота i -го контуру, м.

Фактична відстань між відбійними шпурами у i -му контурі

$$a_{ф.с(i)} = 2 \cdot \pi \cdot \sqrt{0,125 \cdot (b_i^2 + h_i^2)} / N_{с(i)}, \text{ м}. \quad (21)$$

Загальна кількість відбійних шпурів складе

$$N_{від} = \sum_{i=1}^n N_{с(i)}, \text{ шт.} \quad (22)$$

Розрахункова відстань між контурними шпурами

$$a_{р.к} = m \cdot W_{ср.с}, \text{ м}, \quad (23)$$

де m – коефіцієнт зближення зарядів для контурних шпурів, який змінюється у межах 0,75-0,95.

Кількість контурних шпурів

$$N_{к} = 2 \cdot \pi \cdot [0,125 \cdot ((B_{np} - 2\Delta_o)^2 + (H_{np} - 2\Delta_o)^2)]^{0,5} / a_{р.к}, \text{ шт.} \quad (24)$$

Фактична відстань між контурними шпурами

$$a_{ф.к} = 2 \cdot \pi \cdot [0,125 \cdot ((B_{np} - 2\Delta_o)^2 + (H_{np} - 2\Delta_o)^2)]^{0,5} / N_{к}, \text{ м}. \quad (25)$$

Загальна кількість шпурів у вибою перегінного тунелю, що заряджаються

$$N = N_{ep} + N_{від} + N_{к}, \text{ шт.}, \quad (26)$$

де N_{ep} – кількість врубових шпурів, що заряджаються, шт.

Середня величина заряду на один шпур складе

$$Q_{ш} = Q / N, \text{ кг}. \quad (27)$$

Величина заряду у шпурі за його призначенням визначається за виразом

$$Q_z = K_n \cdot Q_{ш}, \text{ кг}, \quad (28)$$

де K_n – коефіцієнт, що враховує збільшення або зменшення заряду ВР у шпурі залежно від його призначення: для врубового шпуру $K_n = 1,1 \dots 1,2$, для відбійного шпуру – $K_n = 1,0$, для контурного шпуру з боків та покрівлі $K_n = 0,9 \dots 1,0$, для контурного шпуру підосви $K_n = 1,0 \dots 1,2$.

Фактичні витрати ВР на вибій становлять

$$Q_{ф} = N_{ep} \cdot Q_{ep} + N_{від} \cdot Q_{від} + N_{бн.к} \cdot Q_{бн.к} + N_{н.к} \cdot Q_{н.к}, \text{ кг}, \quad (29)$$

де Q_{ep} – величина заряду ВР у врубовому шпурі, кг; $Q_{від}$ – величина заряду ВР у відбійному шпурі, кг; $Q_{бн.к}$ – величина заряду ВР у контурному шпурі з боків та покрівлі, кг; $Q_{н.к}$ – величина заряду ВР у контурному шпурі підосви, кг.

Фактичні питомі втрати ВР

$$q_{ф} = Q_{ф} / V_{ф} = Q_{ф} / (S_{np} \cdot l_{ш} \cdot \eta), \text{ кг/м}^3. \quad (30)$$

Кількість шпурометрів, що заповнені забійним матеріалом

$$L_{заб} = l_{заб.вр} \cdot N_{вр} + l_{заб.від} \cdot N_{від} + l_{заб.бн.к} \cdot N_{бн.к} + l_{заб.н.к} \cdot N_{н.к}, \text{ м}, \quad (31)$$

де $l_{заб.вр}$, $l_{заб.від}$, $l_{заб.бн.к}$ і $l_{заб.н.к}$ – відповідно довжина забійки врубових, відбійних, контурних шпурів з боків і покрівлі та підосви, м.

Маса забійного матеріалу

$$M = 0,25 \cdot \pi \cdot d^2 \cdot L_{заб} \cdot \rho_{заб}, \text{ кг}, \quad (32)$$

де $\rho_{заб}$ – щільність забійного матеріалу, кг/м³.

Як приклад розглянемо розрахунок параметрів БПР при спорудженні перегінного тунелю від ствола № 16-біс до станції «Музейна» Дніпровського метрополітену за вихідними даними, що наведено у табл. 1.

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

Таблиця 1

Вихідні дані для розрахунку параметрів БПР при спорудженні перегінного тунелю від ствола №16-біс до станції «Музейна» Дніпровського метрополітену

Найменування	Одиниця виміру	Показник
Ширина перегінного тунелю	м	6,0
Висота перегінного тунелю	м	6,2
Міцність породи на стискання	МПа	123
Щільність порід	кг/м ³	2660
Глибина розташування виробки	м	68
Тріщинуватість порід	-	Сильно тріщинуваті
Глибина врубових шпурів	м	1,8
Глибина відбійних шпурів	м	1,6
Глибина контурних шпурів	м	1,5
Діаметр шпурів	м	0,043
Вруб	-	Призматичний
Густина патронуваної ЕВР Україніт-П-СА	кг/м ³	1150
Швидкість детонації патронуваної ЕВР Україніт-П-СА	м/с	5050

Результати розрахунку параметрів БПР при спорудженні перегінного тунелю від ствола №16-біс до станції «Музейна» Дніпровського

метрополітену за розробленою методикою наведено у табл. 2.

Таблиця 2

Результати розрахунку параметрів БПР при спорудженні перегінного тунелю від ствола №16-біс до станції «Музейна» Дніпровського метрополітену

Найменування	Одиниця виміру	Показник
Коефіцієнт структури породи K_{cn}	ч.о.	1,1
Коефіцієнт структурного ослаблення масиву, K_c	ч.о.	0,4
Коефіцієнт ущільнення масиву, K_v	ч.о.	1,003
Розрахункові питомі витрати ВР, q	кг/м ³	1,67
Розрахункова кількість ВР на вибій, Q	кг	78,0
Величина радіуса зони зминання, R_{zm}	м	0,23
Розрахункова ЛНО для шпуру, W	м	0,57
Кількість врубових шпурів, $N_{вр}$	шт.	12
Кількість відбійних шпурів, $N_{від}$	шт.	49
Кількість контурних шпурів, N_k	шт.	32
Загальна кількість шпурів, N	шт.	93
Величина заряду:		
– для врубового шпуру, $Q_{вр}$	кг	1,0
– для відбійного шпуру, $Q_{від}$	кг	0,75
– для контурного шпуру, Q_k	кг	1,0
Фактичні витрати ВР на вибій, $Q_{ф}$	кг	75,0
КВШ, η	ч.о.	0,95
Фактичні прогнозні питомі втрати ВР, $q_{ф}$	кг/м ³	1,71

За результатами розрахунку параметрів БПР для проведення перегінного тунелю було викреслено розташування шпурів у вибої виробки, що подано на рис. 1.

Наукова новизна і практична значимість

Параметри розташування шпурів у вибої перегінного тунелю реалізовано за степеневую залежністю зміни ЛНО залежно від діаметру

шпуру, тиску продуктів вибуху, межі міцності порід на стискання, їх структурної будови, тріщинуватості та ущільнення під дією гірського тиску. Тому, розроблена нова методика визначення параметрів БПР для спорудження перегінних тунелів метрополітену, дозволяє раціоналізувати розташування шпурів у вибої та здійснити ресурсозбереження при виконанні прохідницьких робіт до 14 %.

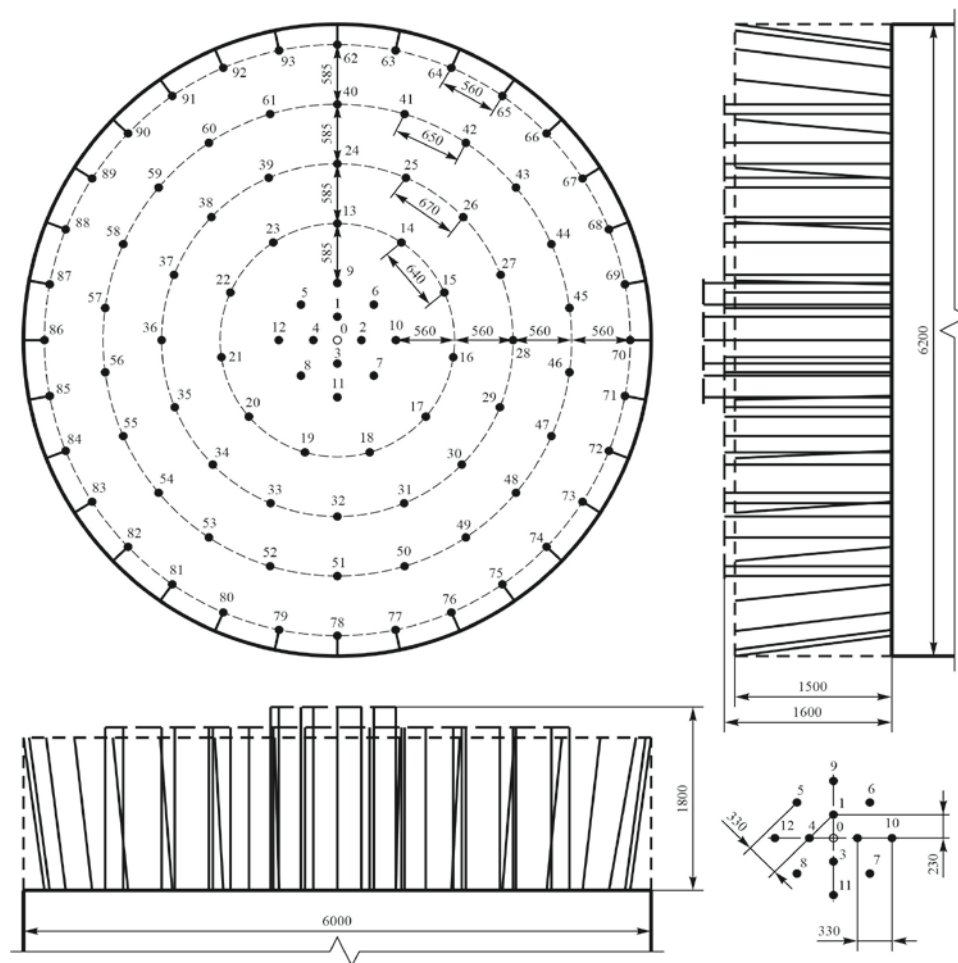


Рис. 1. Розташування шпурів у вибої перегінного тунелю

Висновки

Аналізом відомих методик розрахунку параметрів БПР при проведенні підземних гірничих виробок встановлено, що найбільш перспективним напрямком розрахунку параметрів БПР при спорудженні перегінних тунелів є розробка такої методики, яка б включала в себе комбінацію двох попередніх підходів, а саме першочергове визначення питомої витрати ВР та зон, що утворюються навколо зарядної порожнини.

Визначенням радіусів зон деформацій масиву порід навколо шпuru, розроблено принципово нову методику розрахунку параметрів БПР при спорудженні перегінних тунелів метрополітену. В основу методики покладено принцип розміщення груп шпурів за площами, які вони займають у вибої тунелю та розташування їх за відбійними контурами. Визначення ЛНО шпuru виконується за радіусом зони інтенсивного

подрібнення, яка комплексно враховує радіус зони зминання, діаметри шпuru та заряду ВР, тиск продуктів вибуху, межу міцності порід на стискання, їх структурну будову, тріщинуватість та ущільнення під дією гірського тиску. Самі параметри розташування шпурів мають фактичну розраховану величину, як і величина заряду для кожного шпuru у групі.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- Alkhdour, A., Yasin, A., & Tiutkin, O. (2023). Rational design solutions for deep excavations using soil nail wall systems. *Mining of Mineral Deposits*, 17(3), 110-118.
- Andrievskii, A. (1993). Calculation of optimal parameters for drill-and-blast operation chart in mining with direct slot stage cutting. *Journal Of Mining Science*, 28(5), 456-461.
- Avanoğlu-Çetin, B., & Öztürk, Ö. (2019). Reflecting the art, culture and history into the interior design of underground metro stations, case study: Dnipro met-

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

- ro extension line. *Tunnels and Underground Cities: Engineering and Innovation Meet Archaeology, Architecture and Art*, 3-11.
- Cheberiachko, S., Yavorska, O., Deryugin, O., et al. (2023). Improving Safety of Passenger Road Transportation. *Transactions on Transport Sciences*, 14(2), 11-20.
- Haiko, H., Savchenko, I., & Haiko, Y. (2023). Functional Planning Optimization of Exploiting Underground Space in Large Cities Using System Methodology. *System Analysis and Artificial Intelligence*, 43-61.
- Kholodenko, T., Ustimenko, Y., Pidkamenna, L., & Pavlychenko, A. (2014). Ecological safety of emulsion explosives use at mining enterprises. *Progressive Technologies of Coal, Coalbed Methane, and Ores Mining*, 255-260.
- Kholodenko, T., Ustimenko, Y., Pidkamenna, L., & Pavlychenko, A. (2015). Technical, economic and environmental aspects of the use of emulsion explosives by ERA brand in underground and surface mining. *New Developments in Mining Engineering 2015*, 211-219.
- Khomenko, O., Kononenko, M., Myronova, I., & Savchenko, M. (2019). Application of the emulsion explosives in the tunnels construction. *E3S Web of Conferences*, 123, 01039.
- Kononenko, M., & Khomenko, O. (2021). New theory for the rock mass destruction by blasting. *Mining of Mineral Deposits*, 15(2), 111-123.
- Kononenko, M., Khomenko, O., Cabana, E., et al. (2023). Using the methods to calculate parameters of drilling and blasting operations for emulsion explosives. *Acta Montanistica Slovaca*, 28(3), 655-667.
- Kononenko, M., Khomenko, O., Kovalenko, I., et al. (2023). Determining the performance of explosives for blasting management. *Rudarsko-Geološko-Naftni Zbornik*, 38(3), 19-28.
- Kononenko, M., Khomenko, O., Kosenko, A., et al. (2024). Raises advance using emulsion explosives. *E3S Web of Conferences*, 526, 01010.
- Kononenko, M., Khomenko, O., Sadovenko, I., et al. (2023). Managing the rock mass destruction under the explosion. *Journal of sustainable mining*, 22(3), 240-247.
- Krysin, R. S., Ishchenko, N. I., Klimenko, V. A., Piven, V. A., & Kuprin, V. P. (2004). Explosive ukanit-PM-1: Equipment and fabrication technology. *Gornyi Zhurnal*, 8, 32-37.
- Lyashenko, V., Vorob'ev, A., Nebohin, V., Vorob'ev, K. (2018). Improving the efficiency of blasting operations in mines with the help of emulsion explosives. *Mining of Mineral Deposits*, 12(1), 95-102.
- Myronova, I. (2015). The level of atmospheric pollution around the iron-ore mine. *New Developments in Mining Engineering 2015*, 193-197.
- Myronova, I. (2016). Prediction of contamination level of the atmosphere at influence zone of iron-ore mine. *Mining of Mineral Deposits*, 10(2), 64-71.
- Pankratova, N., Haiko, H., & Savchenko, I. (2024a). The Concept of System Approach to Mastering Underground Space of Large Cities. *Modeling the Underground Infrastructure of Urban Environments*, 25-48.
- Pankratova, N., Haiko, H., & Savchenko, I. (2024b). Evaluating Ecological Risks of Underground Transport Infrastructure Development Using BOCR. *Modeling the Underground Infrastructure of Urban Environments*, 175-188.
- Pankratova, N., Haiko, H., & Savchenko, I. (2024c). Strategy of Evaluation and Risk Management in Practical Urban Development Problems. *Modeling the Underground Infrastructure of Urban Environments*, 97-173.
- Petrenko, V., Bondarenko, N., Miroshnyk, V., Burskyi, M., & Konoval, V. (2023). Substantiating parameters of short-delay blasting and seismic safety while constructing the inclined tunnel. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1156(1), 012010.
- Petrenko, V., Tiutkin, O., Heletiuk, I., & Tkach, T. (2020). The new approach in evaluating the mechanism of the blast effect and organizing the blasting operations while tunneling. *E3S Web of Conferences*, 168, 00034.
- Radkevych, A., Tiutkin, O., Kuprii, V., & Bielikova, S. (2022). The comparative analysis of the stress-strain state of the support of the escalator tunnel constructed in weak soils by the NATM. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 970(1), 012002.
- Zhang, Z., Yao, Y., Jiang, N., Xie, Q., & Wang, J. (2024). Theoretical study of the vibration characteristic in geological layer under blasting excavation of metro tunnel. *Journal of Vibration and Control*, 10775463241274589.
- Белікова, С. І., & Тют'якін, О. Л. (2023). Обґрунтування вибору розрахункової моделі ескалаторного тунелю в плоскій і просторовій постановках. *Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика*, 23, 37-44.
- Тют'якін, О. Л., Банніков, Д. О., Мірошник, В. А., & Гелетюк, І. В. (2021). Аналіз комбінованої конструкції ствола дніпровського метрополітену методом скінчених елементів. *Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика*, 20, 79-85.
- Тют'якін, О. Л., Купрій, В. П., & Белікова, С. І. (2021). Порівняльний аналіз технологій спорудження ескалаторного тунелю Дніпровського метрополітену НАТМ. *Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика*, 20, 86-91.

М. М. KONONENKO^{1*}, О. YE. KHOMENKO², S. M. HAPIEIEV³, R. M. TERESHCHUK⁴

^{1*}Department «Transport systems and energy-mechanical complexes», Dnipro University of Technology,
Dmytra Yavornytskoho ave. 19, Dnipro, Ukraine, 49005, tel. +38 (067) 662 62 05,
e-mail kmn211179@gmail.com, ORCID 0000-0002-1439-1183

²Department «Underground mining and education», Dnipro University of Technology,
Dmytra Yavornytskoho ave. 19, Dnipro, Ukraine, 49005, tel. +38 (067) 950 66 35,
e-mail rudana.in.ua@gmail.com, ORCID 0000-0001-7498-8494

³Department «Construction, geotechnics and geomechanics», Dnipro University of Technology,
Dmytra Yavornytskoho ave. 19, Dnipro, Ukraine, 49005, tel. +38 (050) 362 04 47,
e-mail hapiiev.s.m@nmu.one, ORCID 0000-0003-0203-7424

⁴Department «Construction, geotechnics and geomechanics», Dnipro University of Technology,
Dmytra Yavornytskoho ave. 19, Dnipro, Ukraine, 49005, tel. +38 (095) 751 25 26,
e-mail tereshchuk.r.m@nmu.one, ORCID 0000-0003-4509-2511

NEW METHODOLOGY FOR CALCULATING PARAMETERS OF DRILLING AND BLASTING DURING THE CONSTRUCTION OF SUBWAY TUNNELS

Purpose. The aim of this work is to develop a new method for calculating the parameters of drilling and blasting (D&B) for the construction of subway tunnels, taking into account the hole size, the pressure of the blast products, the compressive strength of the rocks, their structural composition, fracturing and compaction under the action of rock pressure. **Methodology.** To develop a method for calculating the parameters of D&B during the construction of metro tunnels, we used the well-known laws of elasticity theory and the basic provisions of the quasi-static-wave hypothesis of the mechanism of destruction of a solid medium under the action of an explosion, which is based on the principle of placing groups of boreholes according to the areas they occupy in the tunnel face and their location along the blast contours. **Findings.** A new method for calculating the parameters of D&B in the construction of subway tunnels has been developed. It is based on the principle of arranging groups of blast-holes by the areas they occupy in the tunnel face and arranging them along the blast contours. The first stage of the method includes calculating and designing straight cuts, the distance between the blast-holes in which is determined by the radius of the crushing zone. The second stage of the method includes calculating: specific and total explosive (E) consumption per face, the value of the line of least resistance (LLR) for a blast-hole by the radius of the intensive crushing zone, areas of blast-holes groups, the number of boreholes, the estimated and actual distance between blast-holes, the actual charge per blast-hole, and the actual specific and total E consumption per face. **Originality.** The parameters of the blast-hole arrangement in the face of the interstation tunnel are implemented according to the power dependence of the change in the LLR on the hole size, the pressure of the explosion products, the compressive strength of the rocks, their structural structure, fracturing and compaction under the action of rock pressure. **Practical value.** The developed method for determining the parameters of D&B for the construction of subway tunnels allows for rationalizing the arrangement of blast-hole in the face and saving resources during tunneling operations by up to 14 %.

Keywords: interstation tunnel; blast-hole; explosive; drilling and blasting; intensive crushing zone; line of least resistance

REFERENCES

- Alkhdour, A., Yasin, A., & Tiutkin, O. (2023). Rational design solutions for deep excavations using soil nail wall systems. *Mining of Mineral Deposits*, 17(3), 110-118. (in English)
- Andrievskii, A. (1993). Calculation of optimal parameters for drill-and-blast operation chart in mining with direct slot stage cutting. *Journal Of Mining Science*, 28(5), 456-461. (in English)
- Avanoğlu-Çetin, B., & Öztürk, Ö. (2019). Reflecting the art, culture and history into the interior design of underground metro stations, case study: Dnipro metro extension line. *Tunnels and Underground Cities: Engineering and Innovation Meet Archaeology, Architecture and Art*, 3-11. (in English)
- Cheberiachko, S., Yavorska, O., Deryugin, O., et al. (2023). Improving Safety of Passenger Road Transportation. *Transactions on Transport Sciences*, 14(2), 11-20. (in English)
- Haiko, H., Savchenko, I., & Haiko, Y. (2023). Functional Planning Optimization of Exploiting Underground Space in Large Cities Using System Methodology. *System Analysis and Artificial Intelligence*, 43-61. (in English)
- Kholodenko, T., Ustimenko, Y., Pidkamenna, L., & Pavlychenko, A. (2014). Ecological safety of emulsion explo-

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

- sives use at mining enterprises. *Progressive Technologies of Coal, Coalbed Methane, and Ores Mining*, 255-260. (in English)
- Kholodenko, T., Ustimenko, Y., Pidkamenna, L., & Pavlychenko, A. (2015). Technical, economic and environmental aspects of the use of emulsion explosives by ERA brand in underground and surface mining. *New Developments in Mining Engineering 2015*, 211-219. (in English)
- Khomenko, O., Kononenko, M., Myronova, I., & Savchenko, M. (2019). Application of the emulsion explosives in the tunnels construction. *E3S Web of Conferences*, 123, 01039. (in English)
- Kononenko, M., & Khomenko, O. (2021). New theory for the rock mass destruction by blasting. *Mining of Mineral Deposits*, 15(2), 111-123. (in English)
- Kononenko, M., Khomenko, O., Cabana, E., et al. (2023). Using the methods to calculate parameters of drilling and blasting operations for emulsion explosives. *Acta Montanistica Slovaca*, 28(3), 655-667. (in English)
- Kononenko, M., Khomenko, O., Kovalenko, I., et al. (2023). Determining the performance of explosives for blasting management. *Rudarsko-Geološko-Naftni Zbornik*, 38(3), 19-28. (in English)
- Kononenko, M., Khomenko, O., Kosenko, A., et al. (2024). Raises advance using emulsion explosives. *E3S Web of Conferences*, 526, 01010. (in English)
- Kononenko, M., Khomenko, O., Sadovenko, I., et al. (2023). Managing the rock mass destruction under the explosion. *Journal of sustainable mining*, 22(3), 240-247. (in English)
- Krysin, R. S., Ishchenko, N. I., Klimenko, V. A., Piven, V. A., & Kuprin, V. P. (2004). Explosive ukranit-PM-1: Equipment and fabrication technology. *Gornyi Zhurnal*, 8, 32-37. (in English)
- Lyashenko, V., Vorob'ev, A., Nebolin, V., Vorob'ev, K. (2018). Improving the efficiency of blasting operations in mines with the help of emulsion explosives. *Mining of Mineral Deposits*, 12(1), 95-102. (in English)
- Myronova, I. (2015). The level of atmospheric pollution around the iron-ore mine. *New Developments in Mining Engineering 2015*, 193-197. (in English)
- Myronova, I. (2016). Prediction of contamination level of the atmosphere at influence zone of iron-ore mine. *Mining of Mineral Deposits*, 10(2), 64-71. (in English)
- Pankratova, N., Haiko, H., & Savchenko, I. (2024a). The Concept of System Approach to Mastering Underground Space of Large Cities. *Modeling the Underground Infrastructure of Urban Environments*, 25-48. (in English)
- Pankratova, N., Haiko, H., & Savchenko, I. (2024b). Evaluating Ecological Risks of Underground Transport Infrastructure Development Using BOCR. *Modeling the Underground Infrastructure of Urban Environments*, 175-188. (in English)
- Pankratova, N., Haiko, H., & Savchenko, I. (2024c). Strategy of Evaluation and Risk Management in Practical Urban Development Problems. *Modeling the Underground Infrastructure of Urban Environments*, 97-173. (in English)
- Petrenko, V., Bondarenko, N., Miroshnyk, V., Burskyi, M., & Konoval, V. (2023). Substantiating parameters of short-delay blasting and seismic safety while constructing the inclined tunnel. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1156(1), 012010. (in English)
- Petrenko, V., Tiutkin, O., Heletiuk, I., & Tkach, T. (2020). The new approach in evaluating the mechanism of the blast effect and organizing the blasting operations while tunneling. *E3S Web of Conferences*, 168, 00034. (in English)
- Radkevych, A., Tiutkin, O., Kuprii, V., & Bielikova, S. (2022). The comparative analysis of the stress-strain state of the support of the escalator tunnel constructed in weak soils by the NATM. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 970(1), 012002. (in English)
- Zhang, Z., Yao, Y., Jiang, N., Xie, Q., & Wang, J. (2024). Theoretical study of the vibration characteristic in geological layer under blasting excavation of metro tunnel. *Journal of Vibration and Control*, 10775463241274589. (in English)
- Bielikova, S. I., & Tiutkin, O. L. (2023). Obgruntuvannya vyboru rozrakhunkovoi modeli eskalatornoho tuneliu v ploskii i prostоровii postanovkakh. *Mosty ta tuneli: teoriia, doslidzhennia, praktyka*, 23, 37-44. (in Ukrainian)
- Tiutkin, O. L., Bannikov, D. O., Miroshnyk, V. A., & Heletiuk, I. V. (2021). Analiz kombinovanoi konstruktsii stvola dniprovs'koho metropolitenu metodom skinchennykh elementiv. *Mosty ta tuneli: teoriia, doslidzhennia, praktyka*, 20, 79-85. (in Ukrainian)
- Tiutkin, O. L., Kuprii, V. P., & Bielikova, S. I. (2021). Porivnialnyi analiz tekhnolohii sporudzhennia eskalatornoho tuneliu Dniprovs'koho metropolitenu NATM. *Mosty ta tuneli: teoriia, doslidzhennia, praktyka*, 20, 86-91. (in Ukrainian)

Надійшла до редколегії 20.09.2024.

Прийнята до друку 15.10.2024.