

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

УДК 624.191.8.042/.044

С. І. БЕЛІКОВА¹, О. Л. ТЮТЬКІН^{2*}

¹Каф. «Транспортна інфраструктура», Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (050) 756 31 21, ел. пошта 7563121@gmail.com, ORCID 0000-0003-0707-7791

^{2*}Каф. «Транспортна інфраструктура», Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (066) 290 45 18, ел. пошта o.l.tiutkin@ust.edu.ua, ORCID 0000-0003-4921-4758

Обґрунтування технології спорудження ескалаторного тунелю на основі результатів натурних досліджень

Мета. Автори ставлять за мету обґрунтувати нову для України технологію спорудження ескалаторного тунелю на основі результатів натурних досліджень, виконаних у рамках маркшейдерських вимірювань під час будівництва похилого ходу Дніпровського метрополітену. **Методика.** У статті проаналізовано магістральну технологію спорудження ескалаторного тунелю, що базувалася на розробці похилої виробки зверху вниз із попередньою підготовкою масиву за допомогою штучного заморожування ґрунту. Розглянуто декілька випадків застосування способу будівництва ескалаторного тунелю знизу вгору за допомогою Новоавстрійського методу спорудження тунелів (NATM), який успішно застосовують у метрополітенах інших країн. Основною засадою застосування методу є те, що як тимчасове (первинне) кріплення використовують систему торкретування, а постійним кріпленням служить система армування із застосуванням монолітного бетонування. **Результати.** Автори проаналізували особливості проходки ескалаторного тунелю Дніпровського метрополітену турецькою компанією «Limak» у 2017–2018 рр. Відзначено, що розробка відбувалася знизу вгору в умовах міцних скельних порід (плагіограніт) з використанням буровибухових робіт. Проаналізовано характерні результати натурних досліджень під час проведення буровибухових робіт у процесі розробки калоти. На основі цих даних можна прослідкувати тенденцію до появи під час проходки незначних переборів. Значення деформованого стану (переміщення контуру оправи, що запроєктована) перебуває в нормативних межах, що свідчить про ефективне застосування вказаних робіт у рамках NATM. Доведено, що в умовах воєнних дій технологія будівництва ескалаторного тунелю знизу вгору є запорукою безпеки працівників і техніки. **Наукова новизна.** Результати наукової роботи, наведені у статті, дозволяють визначити рівень деформованого стану під час проходки ескалаторного тунелю Дніпровського метрополітену в міцних породах. Під час натурних досліджень отримано залежності деформування плагіограніту в калоті похилого ходу. **Практична значимість.** Обґрунтовано альтернативну технологію спорудження ескалаторного тунелю знизу вгору на основі NATM із забезпеченням нормативного деформування навколишнього породного масиву.

Ключові слова: метрополітен; ескалаторний тунель; технологія спорудження; буровибухові роботи; натурні дослідження; Новоавстрійський метод спорудження тунелів (NATM)

Вступ

Аналіз будівельних технологій, притаманних підземному будівництву, які широко застосовувалися в Радянському Союзі і вважали майже безальтернативними, свідчить про їхню стагнацію. Під цим мається на увазі навіть не неможливість застосування альтернативних технологій, а небажання їхнього впровадження.

Відпрацьовану і достатньо ефективну технологію визначали магістральною, широкий досвід застосування характеризував її уявну раціональність, після чого технологія входила в класичні підручники, її вивчали в закладах вищої освіти. Таким чином, коло замикалося, і нові фахівці вже не могли вийти з «потенційної ями» теорії, хоча на практиці бачили недоліки

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

класичних технологій і намагалися виправити їх зсередини.

Як приклади такого аналізу можна навести три найбільш характерні випадки:

1) окреслення області застосування пілонної станції лише слабкими ґрунтами (піски, супіски, суглинки, глини). Натомість потенціал пілонної станції як майже універсальної конструкції був доведений її застосуванням у міцних скельних породах (гірський масив з плагіограніту, Дніпровський метрополітен);

2) тяжіння до штольневої системи спорудження гірських тунелів та розкриття перерізу невеликими частинами в породах середньої міцності. Досвід будівництва Бескидського тунелю із розділенням перерізу на калоту і штросу в рамках «філософії» Новоавстрійського методу спорудження тунелів (NATM) довів, що в Україні він є дуже ефективним;

3) максимальне застосування збірних конструкцій і зменшення монолітного бетонування.

Небажання розвивати нові технології підземного будівництва мало об'єктивне підґрунтя: деякі методи спорудження тунелів не могли бути реалізованими через відсутність якісних способів кріплення, високопродуктивних тунелепрохідницьких агрегатів та бетононасосів, нового типу рихтувань [8]. Саме тому достатньо складний у практичній реалізації NATM, у ході застосування якого постає багаточарова конструкція з тимчасового кріплення та постійної оправи, майже не розглядали як робочий варіант спорудження. І оскільки його розвиток був відсутній, у класичних підручниках опис цього методу займав декілька сторінок, а вся його стратегія зводилася до звичайного торкретування.

Однак розвиток технологій підземного будівництва в Україні навіть під час воєнної агресії російської федерації дозволяє проаналізувати наявні методи спорудження та обґрунтувати нові, альтернативні, що є ефективними.

Мета

Основною метою наукової статті є обґрунтування нової для України технології спорудження ескалаторного тунелю на основі результатів натурних досліджень, виконаних у рамках маркшейдерських вимірювань під час будівництва похилого ходу Дніпровського метрополітену.

Методика

Наявний досвід тунелебудування в Україні, зокрема спорудження похилих ескалаторних тунелів, спирався на класичну і консервативну методику, характерну для умов Радянського Союзу і пострадянського періоду.

Хоча пропонували різні методи проходки таких тунелів, але здебільшого магістральна технологія базувалася на розробці похилої виробки зверху вниз із попередньою підготовкою масиву за допомогою штучного заморожування ґрунту. Такий метод у сучасних реаліях можна піддати критиці за використання заморожування, оскільки подібні маніпуляції з масивом призводять до незворотних змін структури ґрунту [10], а такий ризик неприйнятний в умовах щільної міської забудови.

Також недоліком заморожування можна назвати підвищену вартість на відміну від інших методів закріплення ґрунту, наприклад, хімічного [7, 9]. Так, позитивним наслідком цементації є створення закріпленого масиву, що залишається на довгий термін і забезпечуватиме конструкції додаткову підтримку навіть після будівництва в процесі експлуатації.

Відмовитись від використання методів додаткового закріплення масиву можна завдяки спеціальним щитовим агрегатам для похилого розташування (рис. 1) [2].

Вони спроектовані на основі геологічних параметрів спеціально для такої інженерної задачі. Така система проходки тунелів дозволяє створювати виробки великого діаметра (більше ніж 8,5 м) під нахилом 30°, що у свою чергу ускладнює вивантаження ґрунту і матеріалів, оскільки такі системи, як конвеєрні стрічки, сендвіч-конвеєри чи скіпи не можуть нормально функціонувати в умовах крутого схилу, при таманного ескалаторному тунелю. У щитових агрегатах та комплексах подібної конструкції обов'язково встановлюють систему з лебідками, у яких, крім робочих і аварійних гальм, наявний захист від обриву троса. Також за допомогою артикуляційних гідроциліндрів, що змінюють напрям проходки, можна зменшити тенденцію до неконтрольованого занурення

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

комплексу і досягти необхідної стабілізації щита шляхом використання додаткових систем.

Відносно новий для України, але вже реалізований у Дніпрі спосіб будівництва ескалатор-

ного тунелю знизу вгору за допомогою NATM успішно застосовують у метрополітенах інших країн (рис. 2) [5, 6].

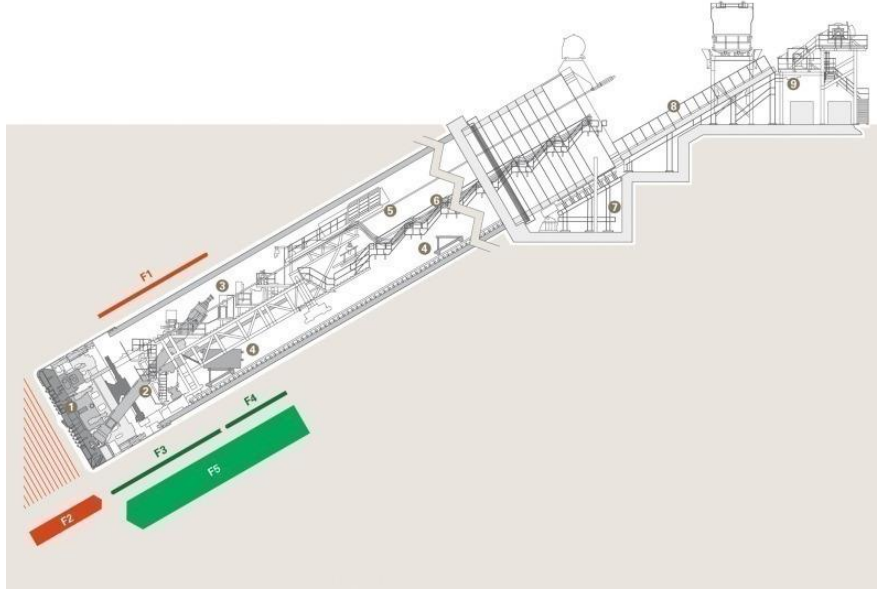


Рис. 1. Схематичне представлення системи та компонентів агрегату, а також активних сил [2]: F_1 – тяговий трос; F_2 – тиск води та ґрунту; F_3 – щит; F_4 – резервна система; F_5 – штовхальні домкрати

Fig. 1. Schematic presentation of the system and machine components as well as the active forces [2]: F_1 – pulling cable; F_2 – water and earth pressure; F_3 – TBM; F_4 – back-up system; F_5 – thrusting jacks

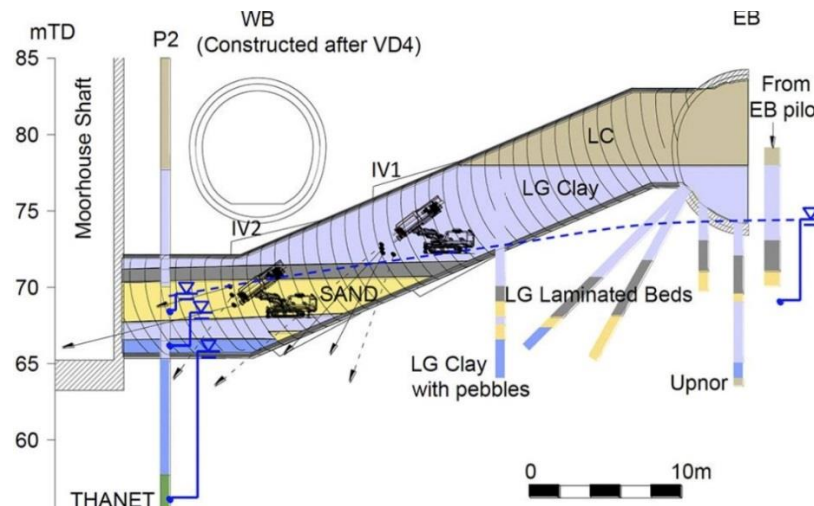


Рис. 2. Похилий вентиляційний тунель, що демонструє інженерно-геологічний розріз породного масиву і процес будівництва [5]

Fig. 2. Inclined ventilation tunnel, showing the engineering and geological section of the rock mass and the construction process [5]

Переваги NATM дозволяють будувати виробки будь-якого орієнтування в підземному просторі, а в тандемі з додатковим закріпленням ґру-

нту – у будь-яких геологічних умовах, проте є випадки, коли спорудження похилих проходок знизу вгору є найбільш раціональним.

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

Відомо, що NATM – це не тільки метод будівництва, це і «філософія» [2], яка полягає в тому, щоб для зміцнення конструкції тунелю максимально повно використати міцність і деформаційну здатність навколишнього масиву. Інакше кажучи, геологічні умови є керівним фактором процесу спорудження. Невід’ємною частиною методу є постійний моніторинг поведінки масиву, що передбачає коригування процесу буріння та зміни типу оправи залежно від результатів поточного контролю [3].

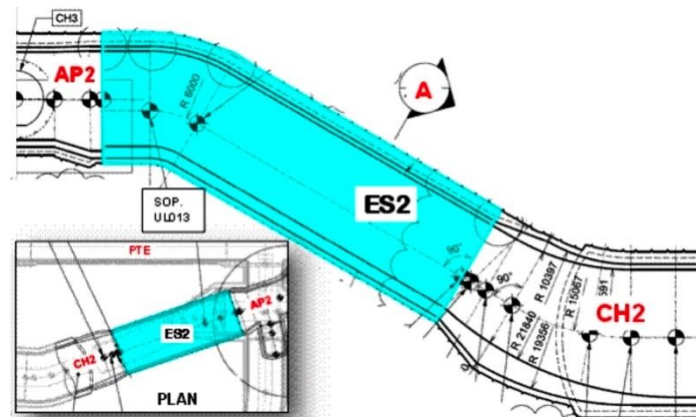
Основною відмінною рисою методу є застосування тимчасового й постійного кріплення. Тимчасове кріплення влаштовують одразу під час розробки, воно може бути представлене у вигляді торкрет-бетону, армувальної сітки, арок, анкерів і будь-якої комбінації цих кріплень. Постійним кріпленням зазвичай служить монолітний бетон, укладений по захищеній сіт-

кою та цементною стяжкою гідроізоляційній мембрані.

Прикладом є група з кількох похилих ескалаторних тунелів у Великій Британії, збудованих за принципами NATM (рис. 3, *a*). Напрямок розробки пов’язаний з обмеженням доступу наявними комунікаціями і системами, також метою такої послідовності є зменшення поверхневих осідань, а з «філософією» NATM комбінація тимчасового і постійного кріплення забезпечила міцність і надійність конструкцій [1].

Основним завданням під час розробки знизу вгору постає безпека для людей і обладнання від обрушення ґрунту, тому їх необхідно розташувати над віссю тунелю, близько до склепіння. Так, у Лондонському метро застосували екскаватор [5], прикріплений до склепіння за допомогою бічних ланцюгів і фаркопів, які, у свою чергу, були закріплені на горизонтальних анкерах (рис. 3, *b*).

a – a



b – b

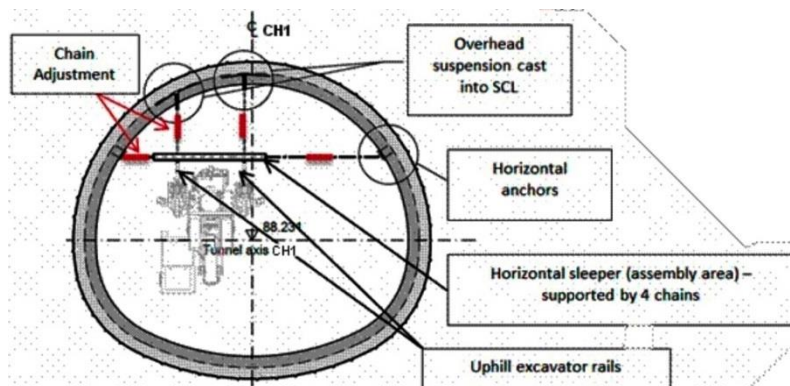


Рис. 3. Переріз і план одного з групи похилих тунелів (*a*), схема закріплення екскаватора (*b*) [5]

Fig. 3. Cross-section and plan of one of the group of inclined tunnels (*a*), excavator anchoring scheme (*b*) [5]

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

Як тимчасове (первинне) кріплення було використано систему торкретування, постійним кріпленням послужила система армування із застосуванням монолітного бетонування. Такий підхід був успішний як із точки зору безпеки, оскільки не було зареєстровано жодних інцидентів або аварій, так і з точки зору якості, оскільки ставав можливим надійний захист гідроізоляційного шару, що знаходиться між тимчасовим кріпленням та постійною оправою.

Результати

Наразі в досвіді освоєння підземного простору України та історії підземного будівництва повною мірою технологію проходки знизу вгору не застосовували. Окремі елементи такого підходу до будівництва було застосовано під час створення шахтного ствола Київського метрополітену (сполучення оправи ствола та підхідної виробки). Це пояснюється тим, що основним методом було спорудження похилих тунелів зверху вниз з обов'язковим тимчасовим закріпленням слабких порід за допомогою заморожу-

вання. Технологію вважали безальтернативною, але принцип спорудження знизу вгору застосувала під час проходки ескалаторного тунелю Дніпровського метрополітену турецька компанія «Limak» у 2017–2018 рр.

Розробка відбувалась знизу вгору в умовах міцних скельних порід (плагіограніт) із використанням буровибухових робіт і влаштуванням тимчасового кріплення (рис. 4).

На рис. 5 продемонстровано характерні результати проведення буровибухових робіт у процесі розробки калоти, згідно з якими можна прослідкувати тенденцію до появи під час проходки незначних переборів. Для компанії «Limak» будівництво похилих тунелів Дніпровського метрополітену було першим досвідом спорудження похилого ходу знизу вгору в міцних породах, але навіть за наявних переборів значення деформованого стану (переміщення контуру оправи, що запроєктована) перебуває в нормативних межах, що свідчить про ефективне застосування вказаних робіт у рамках NATM.

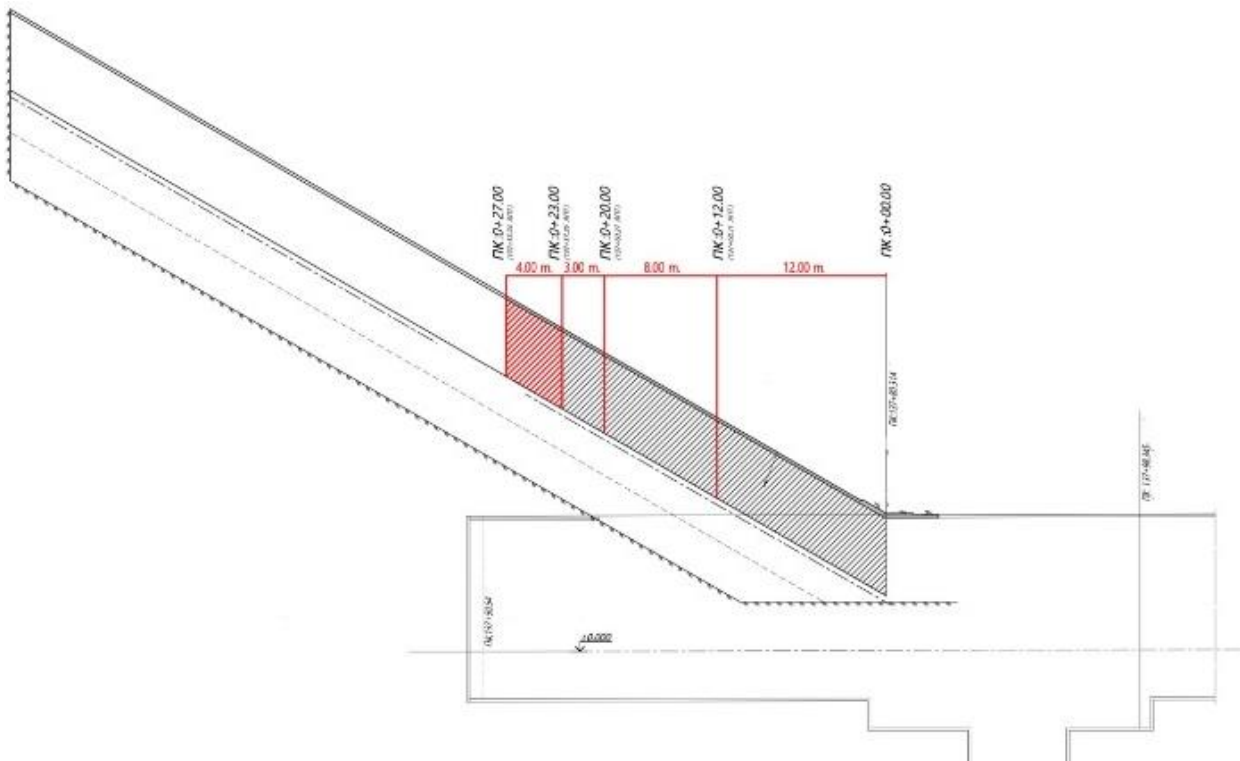


Рис. 4. Схема спорудження ескалаторного тунелю методом знизу вгору

Fig. 4. Scheme of construction of an escalator tunnel using the bottom-up method

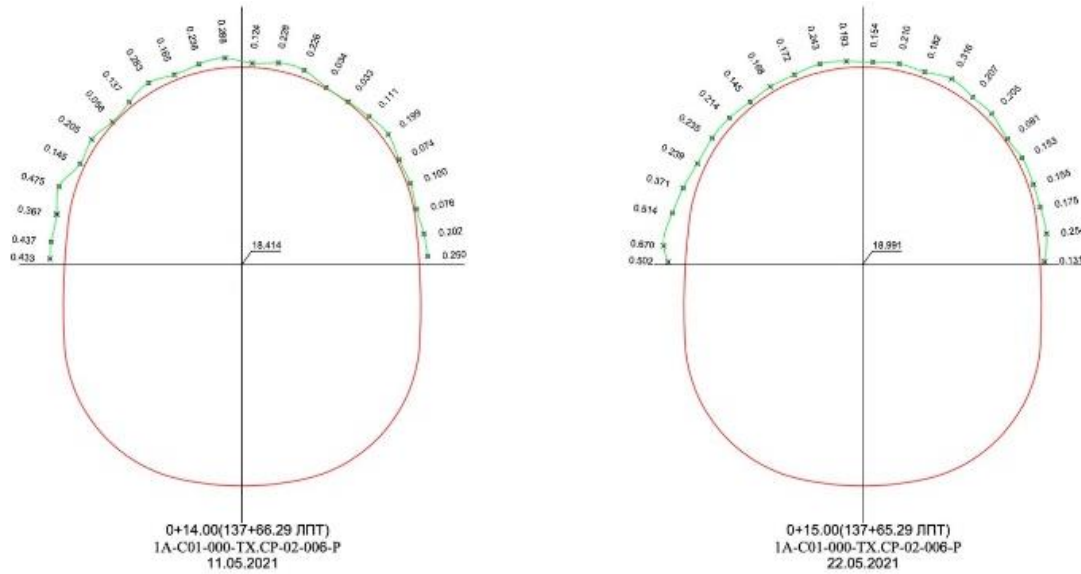


Рис. 5. Характерні деформації (зелена лінія) скельного масиву під час проведення буровибухових робіт

Fig. 5. Characteristic deformations (green line) of the rock mass during drilling and blasting operations

Будівництво Дніпровського метрополітену було тимчасово припинене з початку повномасштабного вторгнення російської федерації в Україну, що не дозволило відпрацювати технологію і довести буровибухові роботи до більш точних результатів. Оскільки інженерно-геологічні умови в зоні тунелю представлені шаруватим масивом (міцні породи знизу і шари осадових порід на поверхні), а обрана методика дозволяє комбінувати кріплення по ходу розробки, то після вдосконалення проаналізованих процесів цю технологію можна характеризувати як надзвичайно перспективну.

Попри складнощі, пов'язані з необхідністю додаткового обладнання, спорудження похилого тунелю знизу вгору, NATM має кілька беззаперечних переваг:

1) процес будівництва не втручається в життя міста: будівельні роботи на поверхні починаються в останню чергу, що так важливо в умовах щільної забудови;

2) таку технологію доречно застосовувати в наявній системі підземних конструкцій, наприклад, якщо необхідно поєднати два тунелі або збудувати додаткові комунікації (вентиляційний тунель);

3) в умовах воєнних дій така технологія є запорукою безпеки працівників і техніки.

Наукова новизна та практична значимість

Результати наукової роботи, які наведені в цій статті, дозволяють визначити рівень деформованого стану (переміщення контуру оправи, що запроєктована) під час проходки ескалаторного тунелю Дніпровського метрополітену в міцних породах. Наукова новизна характеризується отриманими під час натурних досліджень залежностями деформування плагіогранітів у калоті похилого ходу. Практична значимість полягає в обґрунтуванні альтернативної технології спорудження ескалаторного тунелю знизу вгору на основі NATM із забезпеченням нормативного деформування навколишнього породного масиву.

Висновки

Обґрунтування технології спорудження ескалаторного тунелю на основі результатів натурних досліджень дозволило зробити такі висновки:

1. Детальний аналіз випадків проходки ескалаторних тунелів у світі засвідчує, що метод спорудження знизу вгору із застосуванням NATM можна вважати альтернативним наявному консервативному методу проходки зверху вниз за допомогою штучного заморожування ґрунту.

2. Досвід освоєння підземного простору України під час проходки ескалаторного тунелю Дніпровського метрополітену турецькою компанією «Limak» дозволив визначити недоліки (поява під час застосування буровибухових робіт переборів породи), переваги (мінімальне втручання у функціонування міста) та подальший розвиток українського досвіду застосування NATM.

3. Отриманий під час натурних досліджень рівень деформування контуру калоти ескалато-

рного тунелю дає змогу прогнозувати подальше деформування штроси за наявності тимчасового комбінованого кріплення (анкери, армувальна сітка, торкрет-бетон).

У ході подальших досліджень заплановано провести коригування методу проходки ескалаторного тунелю знизу вгору із розробкою методичних рекомендацій або правил, які дозволять поліпшити альтернативну технологію спорудження тунелів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Environment Agency. *Management of the London Basin Chalk Aquifer. Status Report 2014*. 2014. Environment Agency, London.
2. Kolymbas D. *Tunnelling and tunnel mechanics*. Berlin Heidelberg : Springer-Verlag, 2005. 431 p.
3. Kovári K. Erroneous concepts behind the New Austrian Tunnelling Method. *Tunnels & Tunnelling*. 1994. Vol. 26. Iss. 11. P. 38–42. DOI: [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(95\)97207-y](https://doi.org/10.1016/0148-9062(95)97207-y)
4. Mayta E. S., Reader D., Diaz J. S., Vivier R., Marchand E., Ahmad S. Design and construction of escalator shafts and an inclined access passage at the new Elizabeth line Liverpool Street station (The Crossrail Project). 2018. URL: <https://learninglegacy.crossrail.co.uk/documents/design-construction-inclined-escalator-shafts-stair-adit-liverpool-st-whitechapel-stations/>
5. McNamara A. M., Roberts T. O. L., Morrison P. R. J., Holmes G. Construction of a deep shaft for Crossrail. *Geotechnical Engineering*. 2008. Vol. 161. Iss. 6. P. 299–309. DOI: <https://doi.org/10.1680/geng.2008.161.6.299>
6. Morrison P. R. J., McNamara A. M., Roberts T. O. L. Design and construction of a deep shaft for Crossrail. *Geotechnical Engineering*, 2004. Vol. 157. Iss. 4. P. 173–182. DOI: <https://doi.org/10.1680/geng.2004.157.4.173>
7. Pichler C., Lackner R., Martak L., Mang H. A. Optimization of jet-grouted support in NATM tunneling. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*. 2004. Vol. 28. Iss. 7-8. P. 781–796. DOI: <https://doi.org/10.1002/nag.366>
8. Pshynko O., Radkevych A., Netesa M., Netesa A. Problems of development of an underground transport infrastructure of cities. *Transport Problems*. 2020. Vol. 15. Iss. 1. P. 81–91. DOI: <https://doi.org/10.21307/tp-2020-008>
9. Radkevych A., Tiutkin O., Kuprii V., Bielikova S. 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*. 2022. Vol. 970. P. 1–10. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/970/1/012002>
10. Tiutkin O., Petrenko V., Petrosian N., Miroshnyk V., Alkhodour A. Controlling stress state of a hoisting shaft frame in the context of specific freezing process. *Mining of Mineral Deposits*, 2018. Vol. 12. Iss. 4. P. 28–36. DOI: <https://doi.org/10.15407/mining12.04.028>

S. I. BIELIKOVA¹, O. L. TIUTKIN^{2*}

¹Dep. «Transport Infrastructure», Ukrainian State University of Science and Technologies, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (050) 756 31 21, e-mail 7563121@gmail.com, ORCID 0000-0003-0707-7791

^{2*} Dep. «Transport Infrastructure», Ukrainian State University of Science and Technologies, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (066) 290 45 18, e-mail o.l.tiutkin@ust.edu.ua, ORCID 0000-0003-4921-4758

Substantiation of the Escalator Tunnel Construction Technology Based on the Results of Field Research

Purpose. The authors aim to substantiate a new technology for the construction of an escalator tunnel in Ukraine based on the results of field studies performed as part of surveying measurements during the construction of the inclined run of the Dnipro metro. **Methodology.** The article analyzes the main technology of the escalator tunnel construction, which was based on the development of an inclined working from top to bottom with preliminary preparation of the massif by means of artificial soil freezing. Several cases of application of the bottom-up escalator tunnel construction method using the New Austrian Tunneling Method (NATM), which is successfully used in metro of other countries, are considered. The main principle of the method is that a shotcrete system is used as a temporary (primary) support, and a reinforcement system with monolithic concrete is used as a permanent support. **Findings.** The authors analyzed the peculiarities of the escalator tunnel excavation of the Dnipro metro by the Turkish company «Limak» in 2017–2018. It was noted that the excavation was carried out from the bottom up in conditions of strong rock (plagiogranite) using drilling and blasting operations. The characteristic results of field studies during drilling and blasting operations in the process of developing the calotte are analyzed. On the basis of these data, it is possible to trace the tendency to the appearance of minor overburden during sinking. The value of the deformed state (displacement of the contour of the designed casing) is within the normative limits, which indicates the effective use of these works within the framework of NATM. It is proved that in the conditions of military operations, the technology of building an escalator tunnel from the bottom up is a guarantee of the safety of workers and equipment. **Originality.** The results of the scientific work presented in the article make it possible to determine the level of deformed state during the excavation of the escalator tunnel of the Dnipro metro in hard rocks. During the field studies, the dependences of deformation of plagiogranite in the inclined bore were obtained. **Practical value.** An alternative technology for the construction of a bottom-up escalator tunnel based on NATM with the provision of normative deformation of the surrounding rock mass is substantiated.

Keywords: metro; escalator tunnel; construction technology; drilling and blasting works; field studies; New Austrian Tunneling Method

REFERENCES

1. Environment Agency. (2014). *Management of the London Basin Chalk Aquifer. Status Report 2014*. Environment Agency, London. (in English)
2. Kolymbas, D. (2005). *Tunnelling and tunnel mechanics*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag. (in English)
3. Kovári, K. (1994). Erroneous concepts behind the New Austrian Tunneling Method. *Tunnels & Tunnelling*, 26(11), 38-42. DOI: [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(95\)97207-y](https://doi.org/10.1016/0148-9062(95)97207-y) (in English)
4. Mayta, E. S., Reader, D., Diaz, J. S., Vivier, R., Marchand, E., & Ahmad, S. (2018). Design and construction of escalator shafts and an inclined access passage at the new Elizabeth line Liverpool Street station (The Crossrail Project). Retrieved from <https://learninglegacy.crossrail.co.uk/documents/design-construction-inclined-escalator-shafts-stair-adit-liverpool-st-whitechapel-stations/> (in English)
5. McNamara, A. M., Roberts, T. O. L., Morrison, P. R. J., & Holmes, G. (2008). Construction of a deep shaft for Crossrail. *Geotechnical Engineering*, 161(6), 299-309. DOI: <https://doi.org/10.1680/geng.2008.161.6.299> (in English)
6. Morrison, P. R. J., McNamara, A. M., & Roberts, T. O. L. (2004). Design and construction of a deep shaft for Crossrail. *Geotechnical Engineering*, 157(4), 173-182. DOI: <https://doi.org/10.1680/geng.2004.157.4.173> (in English)
7. Pichler, C., Lackner, R., Martak, L., & Mang, H. A. (2004). Optimization of jet-grouted support in NATM tunneling. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 28(7-8), 781-796. DOI: <https://doi.org/10.1002/nag.366> (in English)
8. Pshynko, O., Radkevych, A., Netesa, M., & Netesa, A. (2020). Problems of development of an underground transport infrastructure of cities. *Transport Problems*, 15(1), 81-91. DOI: <https://doi.org/10.21307/tp-2020-008> (in English)
9. 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, 1-10. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/970/1/012002> (in English)

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

10. Tiutkin, O., Petrenko, V., Petrosian, N., Miroshnyk, V., & Alkhdour, A. (2018). Controlling stress state of a hoisting shaft frame in the context of specific freezing process. *Mining of Mineral Deposits*, 12(4), 28-36. DOI: <https://doi.org/10.15407/mining12.04.028> (in English)

Надійшла до редколегії: 31.01.2023

Прийнята до друку: 07.06.2023