

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

УДК 624.191:624.139.62:624.138.4

О. Л. ТЮТЬКІН^{1*}, В. П. КУПРІЙ², С. І. БЕЛІКОВА³

^{1*} Кафедра «Транспортна інфраструктура», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (066) 290 45 18, ел. пошта alexeytutkin@gmail.com, ORCID 0000-0003-4921-4758

² Кафедра «Транспортна інфраструктура», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (099) 616 77 46, ел. пошта kurgiy@i.ua, ORCID 0000-0002-6517-2554

³ Кафедра «Транспортна інфраструктура», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (050) 756 31 21, ел. пошта 7563121@gmail.com, ORCID 0000-0003-0707-7791

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЙ СПОРУДЖЕННЯ ЕСКАЛАТОРНОГО ТУНЕЛЮ ДНІПРОВСЬКОГО МЕТРОПОЛІТЕНУ НАТМ

Мета. На основі порівняльного аналізу провести обґрунтування найбільш доцільного і раціонального способу закріплення слабкого масиву при спорудженні NATM для ескалаторних тунелів Дніпровського метрополітену. **Методика.** Для досягнення поставленої мети проведений аналіз технологій спорудження в слабких ґрунтах. В якості найбільш застосованих технологій розглянуто технологію випереджаючого кріплення, штучне заморожування та хімічне закріплення (цементация). Проаналізовано особливості проведення кожної з технологій для умов похилої виробки. Визначено, яким чином кожна із технологій застосовується для ескалаторних тунелів та реалізує зміцнення слабкого ґрунту. **Результати.** Визначені переваги та недоліки трьох технологій закріплення слабкого ґрунту навколо ескалаторного тунелю. На основі порівняльного аналізу виявлено, що єдиною технологією, що забезпечує підвищені параметри міцності суглинистих ґрунтів, характерних для верхньої частини ескалаторного тунелю Дніпровського метрополітену, є технологія хімічного закріплення (цементация). У деяких випадках за потреби короткі ділянки похилого ходу, що характеризуються особливо слабкими породами, можуть бути підкріплені декількома трубами, не створюючи суцільне випереджаюче кріплення. Результати аналізу є основою для подальшого обґрунтування цементация, яка створює багатшарову систему «підкріплений ґрунтовий масив – тимчасове кріплення – постійна оправа». **Наукова новизна.** На основі результатів порівняльного аналізу трьох технологій спорудження ескалаторного тунелю NATM доведено, що застосування цементация не тільки підвищує міцність породи під час проходки, але й надалі, в процесі експлуатації, слугує додатковим елементом багатшарової системи «підкріплений ґрунтовий масив – тимчасове кріплення – постійна оправа». **Практична значимість.** В ході досліджень проведено обґрунтування цементация як найбільш раціональної та ефективної технології зміцнення оточуючого слабкого масиву при спорудженні Дніпровського метрополітену.

Ключові слова: метрополітен; ескалаторний тунель; випереджаюче кріплення; штучне заморожування; хімічне закріплення

Вступ

Тунелі і метрополітени відіграють важливу роль в освоєнні міських територій та підземного простору міст, а оскільки більшість урбанізованих районів мегаполісів потребують розширення транспортної спроможності, стають надважливими транспортними об'єктами. Під час вибору методу будівництва тунелів необхідно враховувати всі особливості міського підземного будівництва: щільну забудову, існую-

чі підземні конструкції, сейсмічну активність в промислових районах, складні геологічні і гідрогеологічні умови (Тютюкін, & Мірошник, 2020).

У пошуках універсального способу, який вирішував би всі ці проблеми, більшість країн, що буде підземні споруди, звернула свою увагу до Новоавстрійського методу спорудження тунелів (НАТМ, NATM), визначаючи його як основний під час спорудження перегінних, стаціонарних і похилих ескалаторних тунелів (Adme,

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

2006; Arz, & Semprich, 1993; El-Kilany, & El-Sayed, 2017; Heo, June, Kim, Byoung-II, Lee, Jea-Dug, & Kim, Young-Geun, 2017).

NATM надає можливості споруджувати тунелі у ґрунтах різної міцності. Проте в умовах слабких або шаруватих ґрунтів необхідно звертатись до додаткових заходів закріплення ґрунтового масиву. Таким чином, у сприятливих умовах (міцні скельні породи) на розробленій ділянці влаштовується тимчасове кріплення з тонкого шару торкретбетону, якого достатньо для того, щоб сприймати усі навантаження зі сторони оточуючого масиву. У випадках будівництва в ґрунтах середньої міцності доцільно застосовувати комбіноване тимчасове кріплення, додавши арки або анкерне кріплення (Heo, June, Kim, Byoung-II, Lee, Jea-Dug, & Kim, Young-Geun, 2017). У разі будівництва в несприятливих умовах (слабкі ґрунти), окрім застосування комбінованого тимчасового кріплення, необхідне штучне закріплення оточуючого масиву (Augar, 2020). Наприклад, в м. Дніпрі, в якому відбувається будівництво нових станцій метрополітену глибокого закладення, станційні і перегінні тунелі розташовані в міцних породах, проте похилий ескалаторний тунель перетинає різні шари ґрунту, в тому числі четвертинні відкладення слабких ґрунтів (Тютюкін, Мірошник, & Гелетюк, 2021).

Існує декілька найпоширеніших способів посилення ґрунту – це випереджаюче кріплення, заморожування ґрунту і хімічне закріплення. Застосовують і інші, менш популярні способи закріплення ґрунтів (наприклад, спосіб забивання ґрунту як радіального підкріплення), проте вони актуальні лише для специфічних умов і конкретних випадків.

Мета

За допомогою детального порівняльного аналізу обґрунтувати доцільний і раціональний спосіб закріплення слабого масиву при спорудженні NATM для ескалаторних тунелів Дніпровського метрополітену.

Методика

Технологія випереджаючого кріплення або Forepoling Umbrella System (FUS) сприяє зменшенню деформацій, викликаних підземними роботами в масиві, і підвищенню стійкості ту-

нелю та оточуючого ґрунту або породи (Le, & Taylor, 2016). Система складається із сталевих труб, які влаштовуються у зоні склепіння обвалення у вигляді парасольки, направленої у напрямку проходки для забезпечення додаткової опори і зменшення деформацій руху. Однією з визначних переваг способу є негайне утворення підтримки після встановлення металеві труби, що дозволяє починати проходку з мінімальним часом очікування.

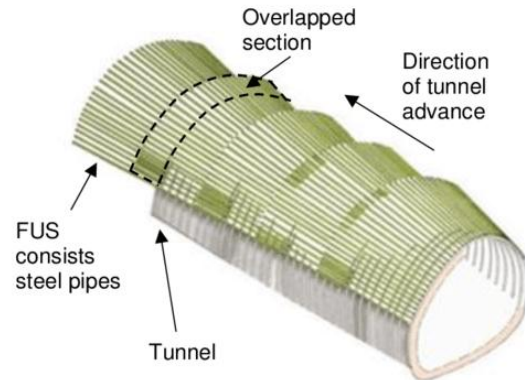


Рис. 1. Схема Forepoling Umbrella System (FUS) (рисунок з роботи Le, & Taylor, 2016)

Зазвичай сталеві труби мають діаметр від 70 до 200 мм з товщиною стінки від 4 до 8 мм. Довжина труб досягає 18 м. Зазвичай FUS встановлюється під кутом введення (β), який становить $5...7^\circ$, та кутом заповнення (α) $60...75^\circ$. Мінімальний крок між секціями FUS варіюється від 3 до 6 м, а відстань між сталевими трубами складає 300...600 мм від центра до центру. Значення параметрів визначається в залежності від геометрії тунелю і характеристик ґрунту для забезпечення достатньої підтримки масиву. Напруження у ґрунті на місці (*in-situ stress*) є ключовим фактором визначення деформаційної поведінки ґрунту, за допомогою якого виконується моделювання масиву для визначення значень параметрів системи FUS (Le, & Taylor, 2016).

Artificial ground freezing (AGF) – метод штучного заморожування ґрунту широко застосовується в водонасичених зернистих ґрунтах. В породних масивах, представлених піщаними ґрунтами, деякими авторами цей метод вважається безальтернативним (Qixiang, Yan, Wang, Wu, Chuan, Zhang, Shuqi, Ma, & Yuanping, Li, 2019). AGF активно застосовується при проходці шахтних стовбурів, станційних і перегінних

тунелів метрополітенів, дозволяючи значно покращити фізико-механічні властивості масиву (Qixiang, Yan, Wang, Wu, Chuan, Zhang, Shuqi, Ma, & Yuanping, Li, 2019; Tiutkin, Petrenko, Petrosian, Miroshnyk, & Alkhdour, 2018).

Низькотемпературний холодоагент (*refrigerant*), який поглинає тепло в навколишньому ґрунті, циркулює у встановлених морозильних трубах (ін'єкторах) всередині масиву, що оточує тунель. Товщина водоносного горизонту навколо труб замерзає, утворюючи зону замерзання з високою міцністю (Mauro, Normino, Savuoto, Marotta, & Massarotti, 2020).



Рис. 2. Метод штучного заморожування, тунель в Швеції
(фото з <http://mmmhydropower.blogspot.com/>)

Такі маніпуляції з водонасиченими ґрунтами утворюють льодогрунтове огороження, яке виступає водонепроникним тимчасовим кріпленням і забезпечує умови для прохідницьких робіт. В процесі проведення заморожування збільшуються міцнісні (міцність ґрунту на стиск) і деформаційні (модуль пружності) характеристики ґрунту (Tiutkin, Petrenko, Petrosian, Miroshnyk, & Alkhdour, 2018). Процес, як правило, поділяється на дві різні фази: перша «фаза замерзання», яка закінчується, коли ґрунт досягає проєктної температури, необхідної для початку прохідницьких робіт, і «фаза обслуговування», яка характеризується поглинанням тепла для того, щоб підтримувати постійну температуру під час робіт. В останні роки ця технологія широко використовувалась при спорудженні метро в Китаї.

Хімічне закріплення (цементация) – це метод посилення стійкості ґрунту, при якому тріщини і пори ґрунту заповнюються спеціальним розчином, витискаючи з них воду (И-Яе, Shin, Jun-

Ho, Kang, & Young-Ho, Suh, 2005; Pichler, Lackner, Martak, & Mang, 2004). Такий розчин складається з цементу і особливих добавок і пластифікаторів для швидкого застигання.

Розчин подається під тиском вертикально над забоєм, створюючи «армований» масив з підвищеними показниками міцності. Після реалізації цього методу проходка відбувається під захистом аркоподібного зцементованого ґрунту, який захищає тунель від обвалу.



Рис. 3. Цементация масиву, Vadlaheidi road tunnel, Ісландія (фото з Reynolds, 2016)

Цементация є первинною стадією, без якої проходка виробок великого перерізу, наприклад ескалаторних тунелів в слабких ґрунтах неможлива. Таке покращення ґрунту збільшує когезію ґрунту і значно впливає на механічні характеристики масиву. При таких умовах зменшуються і зусилля, необхідні для проходки тунелю. Додаючи цементуючі матеріали до слабозв'язних і незв'язних ґрунтів можна зменшити навантаження в конструкції тунелю, причому така тенденція спостерігається як у статичних, так і в динамічних випадках (Azadi, & Kalhor, 2014).

Результати

Для досягнення поставленої мети слід провести порівняльний аналіз технологій спорудження ескалаторного тунелю на прикладі Дніпровського метрополітену. Оптимальне застосування Forepoling Umbrella System потребує виконання досліджень і моделювання. В залежності від механічних властивостей ґрунту, необхідно корегувати довжину труб, кут і крок їх розташування. Отже, якщо тунель проходить під нахилом 30° в шаруватих ґрунтах, ці показ-

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

ники доцільно змінювати для кожного шару. Застосування цього методу в цілому значно впливає на вартість проєкту.

Artificial ground freezing є складним процесом через його багатофазну природу. AGF може призвести до просідання ґрунту та деформації шарів, завдаючи шкоду міським спорудам і загрожують безпеці проєкту через необґрунтоване заморожування або відтаювання. Необхідно проводити дослідження з використанням лабораторних випробувань, теоретичного аналізу, чисельного моделювання. Найкращий спосіб перевірити безпеку AGF – поєднати два і більше методів оцінки для досягнення надійних висновків. Також необхідно проводити постійний моніторинг на місцях, щоб практично реалізувати заморожування. Така багатофазна підготовка і складний контроль впливає на вартість цього методу закріплення ґрунту.

Хоча метод хімічного закріплення (цементациї) практично застосовується значно менше, ніж способи, що представлені вище, проте це перспективна нова технологія. Її вплив на механічні властивості ґрунту у дослідженнях демонструє високі показники, а покращені характеристики дозволяють зменшити зусилля при проходці і забезпечити певний рівень гідроізоляції майбутнього тунелю.

Для шаруватого та слабкого оточуючого масиву, який вміщує в себе ескалаторні тунелі Дніпровського метрополітену у його верхній частині саме цементация є найбільш раціональною. Це обґрунтовується тим, що водопритоки при спорудженні ескалаторного тунелю не є визначальними для обрання способу. Так, заморожування розглядалося як альтернативний, але не виграшний варіант. Його застосування, окрім відмічених вище недоліків, характеризується також тим, що після його впровадження процес відтаювання призводить масив із суглинних ґрунтів в більш деформований стан. Окрім цього, заморожування – процес тимчасовий, а цементация створює навколо підземного об'єкту додатковий шар ґрунту або породи із підвищеними міцнісними та зниженими деформаційними характеристиками.

Застосування FUS для Дніпровського метрополітену планувалося для зон тектонічних розломів та каолінізації, однак такі умови для верхньої частини ескалаторного тунелю нехарактерні. Однак, за потреби, деякі ділянки по-

хилого ходу (до 10 м), що характеризуються особливо слабкими породами, можуть бути підкріплені декількома трубами, не створюючи суцільну «парасольку». При цьому, комплексне кріплення «цементация – сталеві труби» буде мати ще більшу міцність та буде запобігати деформаціям ескалаторного тунелю.

Наукова новизна та практична значимість

На основі результатів порівняльного аналізу трьох технологій спорудження ескалаторного тунелю NATM доведено, що застосування цементациї не тільки підвищує міцність породи під час проходки, але й надалі, в процесі експлуатації, слугує додатковим елементом багатшарової системи «підкріпленій ґрунтовий масив – тимчасове кріплення – постійна оправа». В ході досліджень проведено обґрунтування цементациї як найбільш раціональної та ефективної технології зміцнення оточуючого слабкого масиву при спорудженні Дніпровського метрополітену.

Висновки

Активне зростання обсягів будівництва Дніпровського метрополітену потребує наукового обґрунтування концептуальних проєктних рішень. Проаналізовані технології спорудження ескалаторного тунелю в слабких ґрунтах свідчать про розвиток стратегії NATM, що застосовується в Україні сьогодні.

Особливість Дніпровського метрополітену (верхній шар слабких порід, що покоїться на значному шарі міцного магматичного граніту) потребує впровадження нових рішень, наприклад, цементациї під час спорудження верхньої частини ескалаторного тунелю.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- Adme, Z. G. (2006). Analysis of NATM tunnel responses due to earthquake loading in various soils. *Mining Technology Bulletin-Institute of Mining Science and Technology*, 2(3), 9-17.
- Artificial Ground Freezing for water infested Tunnel Strata and Weak Rock Mass having high seepage water. URL: <http://mmmhydropower.blogspot.com/2012/05/artificial-ground-freezing-for-water.html>
- Arz, P., & Semprich, S. (1993). Modern Methods of Tunnel Support in NATM Tunnelling. *Proc. Symp. Taipei Rapid Transit Systems, Taipei, Taiwan*, C, 677-686.

- Aygar, E. B. (2020). Evaluation of new Austrian tunneling method applied to Bolu tunnel's weak rocks. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 12, 541-556.
- Azadi, M., & Kalhor, M. (2014). Study of the Effect of Seismic Behavior of Twin Tunnels Position on Each Other. *Engineering and Technology International Journal of Civil, Environmental, Structural, Construction and Architectural Engineering*, 8(6), 625-627.
- El-Kilany, M. E., & El-Sayed, T. A. (2017). Numerical simulation of New Austrian Tunneling Method a case study: Elhosania Crossing, Zagazig, Egypt. *Jökull Journal*, 67(1), 17-35.
- Heo, June, Kim, Byoung-II, Lee, Jea-Dug, & Kim, Young-Geun (2017). 3D Numerical Study on the Reinforcing Effect of Inclined System Bolting in NATM Tunnel. *Journal of the Korean Geotechnical Society*, 33(3), 29-36.
- II-Jae, Shin, Jun-Ho, Kang, & Young-Ho, Suh (2005). A Case Study of Soil-Cement Fill for Tunneling. *Tunnel and Underground Space*, 15(5), 359-368.
- Le, B. T., & Taylor, R. N. (2016). A study on the reinforcing capabilities of Forepoling Umbrella System in urban tunnelling. *Proceeding of the 3rd European Conference on Physical Modelling in Geotechnics, Eurofuge2016*, Nantes, France.
- Mauro, A., Normino, G., Cavuoto, F., Marotta, P., & Massarotti, N. (2020). Modeling Artificial Ground Freezing for Construction of Two Tunnels of a Metro Station in Napoli (Italy). *Energies*, 13, 1272.
- Qixiang, Yan, Wang, Wu, Chuan, Zhang, Shuqi, Ma, & Yuanping, Li (2019). Monitoring and Evaluation of Artificial Ground Freezing in Metro Tunnel Construction-A Case Study. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 23, 2359-2370.
- Reynolds, P. (2016). Extensive grouting program in Iceland. *TunnelTalk*, URL: <https://www.tunneltalk.com/Iceland-29Mar2016-Vadlaheidi-road-tunnel-grouting-program.php>
- 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.
- 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.
- Тюцькін, О. Л., & Мірошник, В. А. (2020). Порівняльний аналіз спеціальних способів під час проходки вертикальних виробок. *Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика*, 17, 81-90.
- Тюцькін, О. Л., Мірошник, В. А., & Гелетюк, І. В. (2021). Комплексний аналіз конструкції стовбуру Дніпровського метрополітену. *Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика*, 19, 91-98.

O. L. TIUTKIN^{1*}, V. P. KUPRII², S. I. BIELIKOVA³

^{1*} Department «Transport infrastructure», Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryana Str., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (066) 290 45 18, e-mail alexeytutkin@gmail.com, ORCID 0000-0003-4921-4758

² Department «Transport infrastructure» of Dnipro National University of Railway Transport named after academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (099) 616 77 46, e-mail kypriy@i.ua, ORCID 0000-0002-6517-2554

³ Department «Transport infrastructure» of Dnipro National University of Railway Transport named after academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (050) 756 31 21, e-mail 7563121@gmail.com, ORCID 0000-0003-0707-7791

COMPARATIVE ANALYSIS OF NATM CONSTRUCTION TECHNOLOGIES OF DNIPRO METRO ESCALATOR TUNNEL

Purpose. On the basis of the comparative analysis to carry out a substantiation of the most expedient and rational way of strengthening of a weak massif during a construction of Dnipro metro escalator tunnels by NATM. **Methodology.** To achieve this goal, an analysis of construction technologies in weak soils was conducted. The most used technologies are Forepoling Umbrella System (FUS), artificial ground freezing and chemical cementation. The peculiarities of carrying out each of the technologies for the conditions of inclined production were analyzed. It is determined how each of the technologies is applied to escalator tunnels and implements the strengthening of weak soil. **Findings.** The advantages and disadvantages of three technologies for fixing weak soil around the escalator tunnel are identified. Based on comparative analysis, it was found that the only technology that provides increased strength parameters of loamy soils, characteristic for the upper part of the escalator tunnel of the Dnipro metro, is the tech-

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

nology of chemical strengthening (cementation). In some cases, if necessary, short sections of sloping course, characterized by particularly weak soil, can be supported by several pipes, without creating a continuous leading mount. The results of the analysis are the basis for further substantiation of cementation, which creates a multilayer system "reinforced soil massif – temporary fastening – permanent lining". **Originality.** Based on the results of comparative analysis of three technologies for escalator tunnel construction by NATM, it is proved that the use of cementation not only increases the strength of the soil during drilling, but also further in operation serves as an additional element of the multilayer system "reinforced soil massif – temporary fastening – permanent lining". **Practical value.** In the course of research, the substantiation of cementation as the most rational and effective technology of strengthening of the surrounding weak massif at construction of the Dnipro metro was carried out.

Keywords: metro; escalator tunnel; forepoling umbrella system; artificial freezing; chemical strengthening

REFERENCES

- Adme, Z. G. (2006). Analysis of NATM tunnel responses due to earthquake loading in various soils. *Mining Technology Bulletin-Institute of Mining Science and Technology*, 2(3), 9-17. (in English)
- Artificial Ground Freezing for water infested Tunnel Strata and Weak Rock Mass having high seepage water. URL: <http://mmmhydropower.blogspot.com/2012/05/artificial-ground-freezing-for-water.html> (in English)
- Arz, P., & Semprich, S. (1993). Modern Methods of Tunnel Support in NATM Tunnelling. *Proc. Symp. Taipei Rapid Transit Systems, Taipei, Taiwan*, C, 677-686. (in English)
- Aygar, E. B. (2020). Evaluation of new Austrian tunnelling method applied to Bolu tunnel's weak rocks. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 12, 541-556. (in English)
- Azadi, M., & Kalhor, M. (2014). Study of the Effect of Seismic Behavior of Twin Tunnels Position on Each Other. *Engineering and Technology International Journal of Civil, Environmental, Structural, Construction and Architectural Engineering*, 8(6), 625-627. (in English)
- El-Kilany, M. E., & El-Sayed, T. A. (2017). Numerical simulation of New Austrian Tunneling Method a case study: Elhosania Crossing, Zagazig, Egypt. *Jökull Journal*, 67(1), 17-35. (in English)
- Heo, June, Kim, Byoung-II, Lee, Jea-Dug, & Kim, Young-Geun (2017). 3D Numerical Study on the Reinforcing Effect of Inclined System Bolting in NATM Tunnel. *Journal of the Korean Geotechnical Society*, 33(3), 29-36. (in Korean)
- II-Jae, Shin, Jun-Ho, Kang, & Young-Ho, Suh (2005). A Case Study of Soil-Cement Fill for Tunneling. *Tunnel and Underground Space*, 15(5), 359-368. (in Korean)
- Le, B. T., & Taylor, R. N. (2016). A study on the reinforcing capabilities of Forepoling Umbrella System in urban tunnelling. *Proceeding of the 3rd European Conference on Physical Modelling in Geotechnics, Eurofuge2016*, Nantes, France. (in English)
- Mauro, A., Normino, G., Cavuoto, F., Marotta, P., & Massarotti, N. (2020). Modeling Artificial Ground Freezing for Construction of Two Tunnels of a Metro Station in Napoli (Italy). *Energies*, 13, 1272. (in English)
- Qixiang, Yan, Wang, Wu, Chuan, Zhang, Shuqi, Ma, & Yuanping, Li (2019). Monitoring and Evaluation of Artificial Ground Freezing in Metro Tunnel Construction-A Case Study. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 23, 2359-2370. (in English)
- Reynolds, P. (2016). Extensive grouting program in Iceland. *TunnelTalk*, URL: <https://www.tunneltalk.com/Iceland-29Mar2016-Vadlaheidi-road-tunnel-grouting-program.php> (in English)
- Pichler, C., Lackner, R., Martak, L., & Mang, H. A. (2004). Optimization of jet-grouted support in NATM tunnelling. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 28(7-8), 781-796. (in English)
- 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. (in English)
- Tiutkin, O. L., & Miroshnyk, V. A. (2020). Porivnialnyi analiz spetsialnykh sposobiv pid chas prokhodky ver-tykalnykh vyrobok. *Mosty ta tuneli: teoriia, doslidzhennia, praktyka*, 17, 81-90. (in Ukrainian)
- Tiutkin, O. L., Miroshnyk, V. A., & Heletiuk, I. V. (2021). Kompleksnyi analiz konstruktsii stovburu Dniprovs'koho metropolitenu. *Mosty ta tuneli: teoriia, doslidzhennia, praktyka*, 19, 91-98. (in Ukrainian)

Надійшла до редколегії 17.09.2021.

Прийнята до друку 08.10.2021.