

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

УДК 625.42:330.341.1

Д. О. БАННИКОВ¹, М. І. НЕТЕСА², В. П. КУПРІЙ^{3*}, О. І. ДУБІНЧИК⁴

¹ Кафедра «Будівельне виробництво та геодезія», Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (063) 400 43 07, ел. пошта d.o.bannikov@ust.edu.ua, ORCID 0000-0002-9019-9679

² Кафедра «Будівельне виробництво та геодезія», Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, 49010 Дніпро, Україна, тел. +38 (067) 195 50 27, ел. пошта m.i.netesa@ust.edu.ua, ORCID 0000-0002-9134-8023

^{3*} Кафедра «Транспортна інфраструктура», Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (097) 464 05 28, ел. пошта v.p.kuprii@ust.edu.ua, ORCID 0000-0002-7564-5191

⁴ Кафедра «Транспортна інфраструктура», Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (095) 582 14 88, ел. пошта o.i.dubinchyk@ust.edu.ua, ORCID 0000-0003-4059-2357

ІННОВАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ СПОРУДЖЕННЯ ПІЛОННОЇ СТАНЦІЇ МЕТРОПОЛІТЕНУ НА ОСНОВІ ДОСВІДУ ВИКОРИСТАННЯ NATM

Мета. Станція метрополітену пілонного типу глибокого закладення доволі довгий час вважалася підземною конструкцією, що вже не має потенціалу розвитку. Однак, після впровадження інноваційних технологій під час будівництва Дніпровського метрополітену, зокрема Новоавстрійського методу проходки тунелів (NATM), ця конструкція знову застосовується і має розвиток подальшого використання. Метою наукової статті є аналіз інновацій в технології спорудження трьохсклепінчастої пілонної станції метрополітену із збірною залізобетону з використанням NATM, які потребують наукового обґрунтування. **Методика.** Для досягнення поставленої мети переглянуто традиційну технологію спорудження пілонної станції глибокого закладення. Проведений аналіз особливостей NATM, які дозволяють застосувати його під час спорудження пілонної станції в міцних скельних породах. Реалізований поетапний аналіз спорудження станції із залученням математичного моделювання на основі методу скінченних елементів. Для цього створено ряд скінченно-елементних моделей кожного етапу спорудження станції пілонного типу. Після проведеного чисельного аналізу було проведено коригування вказаних моделей у відповідності до змін, що пов'язані з новою технологією спорудження. **Результати.** Отримано значення напружено-деформованого стану пілонної станції в ході чисельного аналізу кожного етапу спорудження. Аналіз напружень доводить можливість застосування інноваційної технології спорудження у випадку пілонної станції. **Наукова новизна.** На основі виконаного чисельного аналізу поетапного спорудження пілонної станції на основі NATM, отримано залежності, що дозволяють переглянути існуючу концепцію спорудження цього типу станцій в міцних скельних породах. Отримані дані обґрунтовують застосування NATM і вивільнюють потенціал проаналізованої підземної споруди. **Практична значимість.** Проведене обґрунтування інноваційної технології на основі NATM дозволяє розширити область її застосування та успішно проводити будівництво таких складних підземних об'єктів.

Ключові слова: метрополітен; станція пілонного типу; Новоавстрійський метод проходки тунелів; технологія спорудження; чисельний аналіз; метод скінченних елементів

Вступ

Традиційно спорудження трьохсклепінчастих пілонних станцій з оправою із збірних залізобетонних тюбінгів ведеться шляхом послідовної проходки бокових станційних тунелів з одночасним зведенням постійної оправи, а потім – центрального станційного тунелю з подальшою розробкою проходів між ними (Петренко, В. І., Петренко, В. Д., & Тютькін, 2005).

Будівництво станцій Київського метрополітену глибокого закладення надало досвід, який дозволив замінити чавунні тюбінги на залізобетонні (Тютькін, 2020), проте застосування інноваційних технологій, які були впроваджені під час будівництва Дніпровського метрополітену (Тютькін, Купрій, & Белікова, 2021), дозволяє ще сильніше скоротити витрати під час спорудження таких станцій.

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

Відомо, що спорудження проходів проводиться після того, як в заздалегідь пройдених станційних тунелях виконані роботи по підсиленню ділянок проходів монолітними балками перемичок і демонтажу елементів заповнення місця проходів (Тютькін, 2020), що збільшує час виконання робіт. В процесі проходки станційних тунелів роботи по розробці породи і монтажу постійної оправи виконуються на близькій відстані, що не дозволяє збільшувати швидкість проходки. Недоліком такої схеми є висока трудомісткість робіт і низький рівень їхньої механізації під час спорудження конструкцій гірським способом. Тому вона не набула практичного поширення, але може бути рекомендована у випадку багатопрогнозових об'єднаних станцій (Chang, Kwon, Moon, & Lee, 2005).

Сучасні технології будівництва підземних споруд з використанням тимчасового кріплення NATM (Новоавстрійський метод проходки тунелів), дозволяють розробляти виробки великих розмірів, які тримаються на тимчасовому кріпленні до спорудження постійної оправи (Pichler, Lackner, Martak, & Mang, 2004; Тютькін, Купрій, & Белікова, 2021; Radkevych, Tiutkin, Kuprii, & Tkach, 2023).

В останні роки NATM є найбільш поширеним з гірничих способів. Інтенсивне поширення цього способу обумовлюється його економічністю та низькою матеріаломісткістю підземних конструкцій (Pshynko, Radkevych, Netesa, M., & Netesa, A., 2020). NATM застосовується як в сприятливих, так і в складних інженерно-геологічних умовах. Спосіб застосовується в поєднанні зі спеціальними методами проходки тунелів (заморожування, хімічне закріплення гірничих порід, водозниження тощо) (Pichler, Lackner, Martak, & Mang, 2004; Петренко, Банніков, & Нетеса, 2020; Тютькін, Купрій, & Белікова, 2021; Alkhdour, Tiutkin, Bannikov, & Heliutuk, 2023).

NATM допускає суттєві переміщення контуру виробки, забезпечуючи тим самим розвантаження гірничого масиву від напружень. Постійна монолітна бетонна або залізобетонна оправа зводиться тоді, коли вичерпана несуча здатність тимчасового кріплення. Внаслідок цього оправа працює на навантаження значно менше, ніж якби оправа зводилася до того, як сталося основне розвантаження масиву.

Обов'язкова умова способу – виконання протягом усього часу будівництва тунелю вимірювання деформацій, переміщень, напружень як в кріпленні, так і в породі. Це дозволяє безперервно контролювати стан гірничого масиву та конструкцій і при необхідності посилювати кріплення.

Основні положення NATM наступні (Rabcewicz, & Golser, 1973):

– несучим елементом є головним чином гірська порода, переміщення якої навкруги виробки допускається, але обмежуються заданими значеннями шляхом застосування спеціального кріплення (набризк-бетону із сіткою, анкери, податливе арочне кріплення), параметри якого визначаються розрахунком;

– зовнішня несуча здатність породно-анкерної оболонки навкруги виробки може бути представлена у вигляді товстостінної труби, замикання якої необхідно забезпечити протягом певного проміжку часу, що визначається досвідченим шляхом;

– найбільш сприятлива форма виробки – кругова або підковоподібна, оскільки в кутах інших форм виробок відбувається концентрація напружень;

– стабілізація переміщень закріпленої породи навколо виробки відбувається за рахунок поетапного підсилення зовнішньої і внутрішньої несучих оболонок, що здійснюється шляхом збільшення довжини анкерів і перетину арок, а також підвищенням відсотку армування набризк-бетонного покриття і внутрішньої монолітної бетонної або залізобетонної оправи.

Основним елементом кріплення є анкери. Довжина анкерів визначається станом породи, площею поперечного перерізу тунелю і опором анкерних стрижнів висмикування.

Разом з анкерним кріпленням набризк-бетон також є необхідним елементом кріплення тунелів, що споруджуються NATM. У міцних породах товщина набризк-бетонного покриття складає всього 3...5 см. Піддатливе арочне кріплення виконується з арматурних ферм або спецпрофілю масою від 18 до 36 кг на 1 м. Крок арок ув'язується з довжиною заходки, зазвичай на 1 заходку встановлюють 1...2 арки по довжині тунелю. Арочне кріплення застосовується тільки в слабких породах.

Застосовувана при NATM уступна проходка

тунелів великого перерізу за вартістю обладнання і темпів робіт виявляється навіть в стійких породах переважною від проходки суцільним забоєм, що широко практикується в цих умовах. NATM дозволяє для тунелів великого перерізу застосовувати легке мобільне і відносно дешеве в порівнянні з застосуванням при проходці суцільним забоєм обладнання.

Головною особливістю NATM у порівнянні з іншими є використання у максимальному ступені несучої здатності навколишньої породи та залучені її в роботу в якості захисної конструкції, захищаючи виробку від обвалу (Більченко, & Смолянюк, 2021). Порода, закріплена належним чином тимчасовим кріпленням із анкерів, набризк-бетону та податливого аروحного кріплення, перетворює в вантажонесуче середовище, сприймає значну частину зовнішніх навантажень. Решта навантажень передається на кріплення, матеріаломісткість якого знижена у порівнянні з кріпленням, використаною при інших методах проходки.

Мета

Метою наукової статті є аналіз інновацій в технології спорудження трьохсклепінчастої пілонної станції метрополітену із збірних залізобетонних елементів з використанням NATM, які потребують наукового обґрунтування. Для цього слід переглянути традиційну технологію спорудження пілонної станції глибокого закладення і провести поетапний аналіз її спорудження з залученням математичного моделювання на основі методу скінченних елементів.

Методика

Спорудження трьохсклепінчастих пілонних станцій з оправою із збірних залізобетонних елементів (рис. 1) ведеться шляхом послідовної проходки трьох станційних тунелів з одночасним зведенням постійної оправи за допомогою укладачів.

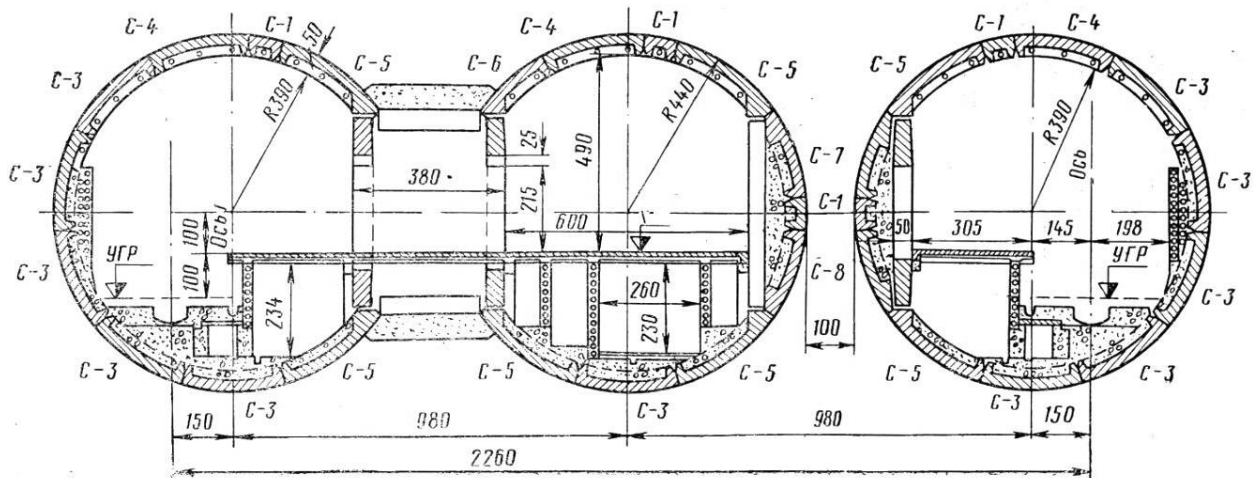


Рис. 1. Схема пілонної станції із залізобетонних тюбінгів

Основним конструктивним елементом станційних тунелів є збирне залізобетонна оправа з кілець діаметром 8,5 м, шириною 0,75 м. Кожне кільце оправи в глухій частині станції складається з 10 ребристих залізобетонних тюбінгів трьох типів: нормального *СК-1*, суміжного з ключовим *СК-2* і ключового *СК-3*. У кільця оправи частини отвору станції входять додаткові елементи: опорні тюбінги *СК-4* і пілонні блоки *СП-4*. Опорні блоки *СК-4* мають зрізані борта на половині довжини.

У цьому випадку проходи між станційними тунелями влаштовують після проходки бокових станційних тунелів та центрального станційного тунелю (Петренко, В. И., Петренко, В. Д., & Тютюкин, 2005).

Включені в кільця шляхових тунелів з одного боку, а в кільця середнього – з двох сторін, ці блоки утворюють пази над отворами і під ними по всій довжині ділянки отвору станції. У цих пазах влаштовують поздовжні балки-перемички. Балки-перемички можуть бути ви-

конані з монолітного або збірною залізобетону (Тютюкін, 2020).

Опорами балкам-перемичкам служать плоскі пілони, утворені залізобетонними тюрінгами *СП-4*; які замикають кільця середнього і шляхових тунелів. Ширина пілона відповідає числу кілець, замкнених на ці тюрінги.

Проходка станційних тунелів на повний переріз допускається в ґрунтах, що не чинять тиску з боку лоба забою. Проходку станційних тунелів в ґрунтах, що чинять тиск з боку лоба забою, ведуть з попередньою проходкою пілот-тунелів (Тютюкін, 2020).

Послідовність спорудження станційних тунелів зберігається такою ж, як і при оправі з чавунних тюрінгів: на початку способом пілот-тунелю ведуть проходку двох бокових станційних тунелів з упередженням забоїв на 20...30 м, а потім проходять середній станційний тунель. При проходці отвору пілонної ділянки станції у всіх трьох тунелях чергують кільця, замкнені тюрінгами тимчасового заповнення з кільцями, замкненими залізобетонними блоками (одне-два кільця), утворюючими пілони станції.

Залежно від конструктивної схемою станції, що передбачає посилення ділянок отворів до улаштування проходів, склад будівельно-монтажних робіт може змінюватися. Спосіб посилення прохідної частини полягає в тому, що у поздовжніх пазах, утворених фігурними опорними тюрінгами, влаштовують балочну перемичку отворів. Така перемичка дозволяє розмикати кільця при спорудженні проходів. Балочну перемичку із збірною залізобетону споруджують за допомогою лебідок і укладальника тунельної оправі. Балочні перемички із монолітного залізобетону бетонують з пересувних або стаціонарних підмостків. Бетонну суміш подають безперервно механізованим способом бетононасосами і ретельно вібрують.

Спорудження пілонів і проходів проводиться після того, як в задалегідь пройдених станційних тунелях виконані роботи по підсиленню ділянок проходів. По цій схемі споруджують в більшості випадків пілонні станції з оправою із залізобетонних елементів.

В процесі проходки станційних тунелів, роботи по розробці породи і монтажу оправі виконуються на близькій відстані, що не дозволяє збільшувати швидкість проходки. В кільця

оправи частини проходу станції включають опорні залізобетонні блоки, що оформляють пілон. До розкриття проходів в межах цієї частини станції зводять спеціальні збірні або монолітні конструкції, які дозволяють розімкнути кільця в межах проходу.

Спочатку проходять і підсилюють бокові станційні тунелі і тільки після того, як бетон омонолічування збірних балок прохідної частини або бетон монолітних залізобетонних балок досягне проектної міцності, приступають до проходки середнього стаціонарного тунелю.

Приступають до робіт по розкриттю отворів прохідної частини тільки після того, як бетон омонолічування збірних балкових перемичок (або бетон монолітних перемичок), зведених в середньому станційному тунелі, досягне проектної міцності. При розкритті отворів, проходці і зведенні оправі проходів дотримуються визначеної черговості та ретельності виконання робіт. Вузкий пілон, характерний для конструкції таких станцій, бетонують, як правило, одночасно з облаштуванням отвору на ділянках які повторюються по довжині станції і які примикають один до одного. Довжина ділянки L захоплює кільця отвору шириною B і один пілон шириною b .

Роботи виконують в три етапи. Спочатку розробляють ґрунт в правій верхній частині проходу і бетонують склепіння і верхню частину пілону. Після того, як укладений бетон досягне 75 % проектної міцності, розробляють ґрунт в правій нижній частині проходу і бетонують пілон і частину зворотного склепіння. До робіт третього етапу приступають тільки після того, як раніше укладений бетон досягне 100 % проектної міцності (Тютюкін, 2020). На третьому етапі розробляють зверху донизу ліву частину проходу на всю висоту і бетонують частини верхнього і зворотного склепіння, що залишилися. Спорудження проходів із середнього в боковий тунель у одному перерізі станції не дозволяється.

Результати

Поєднання NATM з традиційним способом спорудження станційних тунелів (рис. 2) дає змогу збільшити відстань між процесами розробки породи у забої та монтажем постійної оправі збільшивши швидкість спорудження,

включити в роботу породу, що дозволяє зменшити товщину самої станційної оправи та ви-

користувати елементи збірного залізобетону прохідної частини заводського виготовлення.

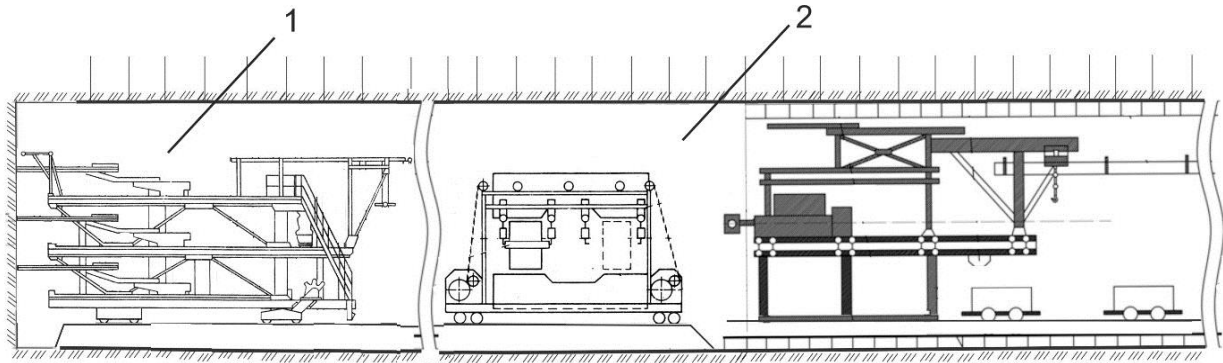


Рис. 2. Проходка бокових станційних тунелів з застосуванням NATM в поєднанні з традиційним способом:
1 – зона забою, 2 – зона проходу

Процес розробки породи у забої виконується буровибуховим способом з установкою тимчасового кріплення і випереджає зону монтажу постійної оправи на 50...60 метрів.

На рис. 3 показано конструкцію бокового станційного тунелю у місці проходу, посилено-

го балочними перемичками заводського виготовлення. Введення цих інновацій позитивно змінює технологію спорудження трьохсклепінчастої пілонної станції метрополітену із збірного залізобетону, вивільняючи потенціал кожної зміни.

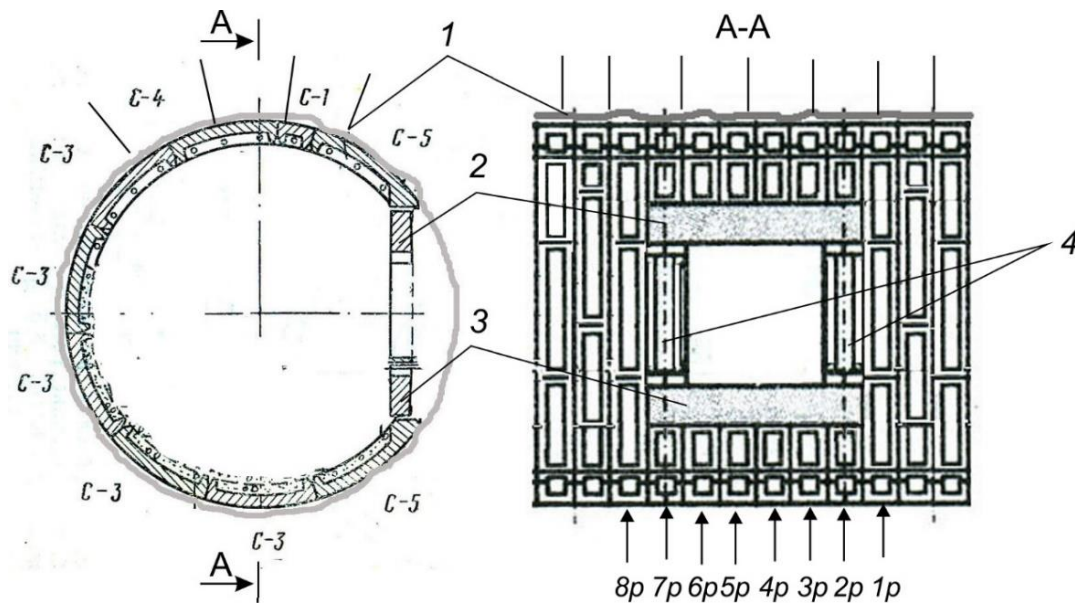


Рис. 3. Конструкція елемента станційного тунелю з проходом:
1 – тимчасове кріплення, 2 – верхня залізобетонна балка-перемичка,
3 – нижня залізобетонна балка перемичка, 4 – стійкі балочної перемички

Етапи спорудження оправи бокового станційного тунелю у місці проходу:

Перший етап. З використанням блокоукладача збирається повне кільце оправи 1 ряду із тубінгів С-3, С-4, С-1.

Другий етап. З використанням блокоукла-

дача збирається нижні тубінги кільця оправи 2-7 рядів із тубінгів С-3, С-5 (рис. 4). Для етапу створено скінченно-елементну модель в комплексі SCAD (Перельмутер, & Сливкер, 2002; Банніков, Купрій, & Вотченко, 2021).

Третій етап. За допомогою спеціального ін-

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

вентарного візка (рис. 5) на зібрані нижні фігурні тюбінги кілець С-5 оправи 2р – 7р укладають нижню залізобетонну балку 3 в поздовжні пази, утворені фігурними опорними тюбінгами,

на неї установлюють стійки 4 а зверху залізобетону балку 2, утворюючи балочну перемичку проходів. Для виконання цієї роботи використовується спеціальний інвентарний візок.

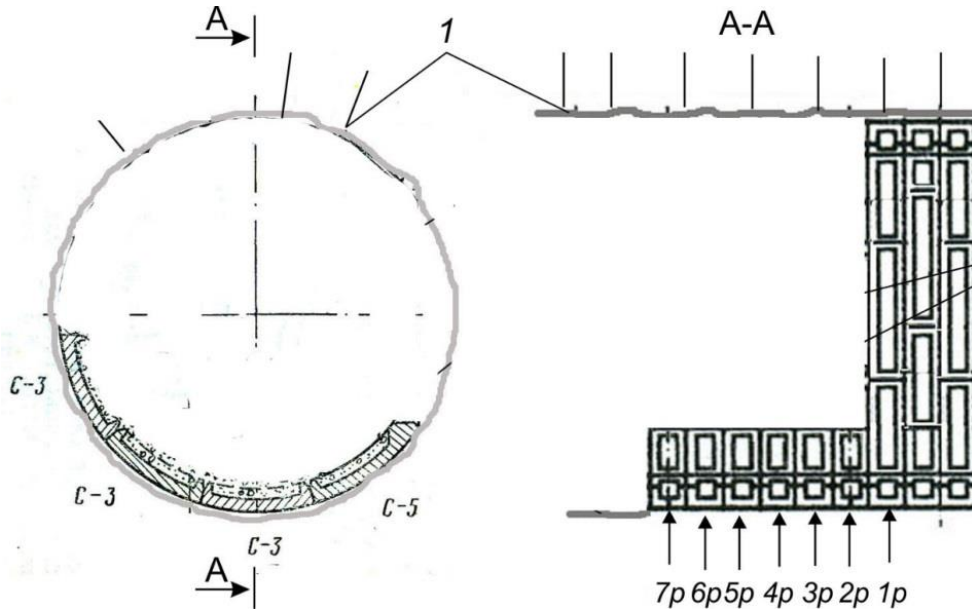


Рис. 4. Другий етап спорудження прохідної частини бокового станційного тунелю

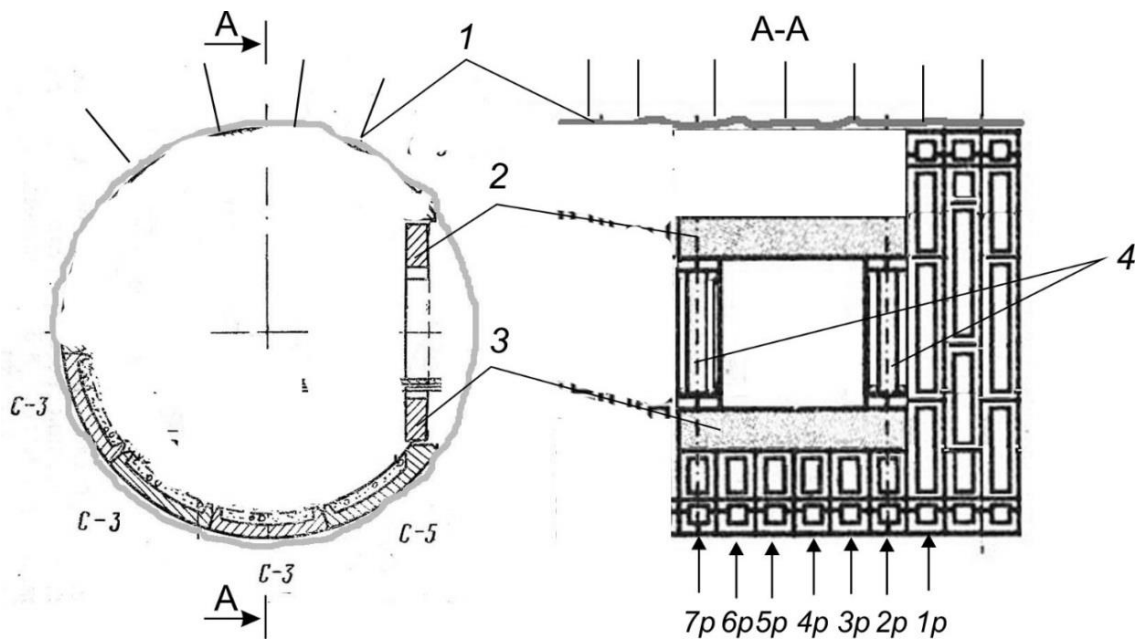


Рис. 5. Третій етап спорудження прохідної частини бокового станційного тунелю

Такий спосіб посилення частини проходу станції дозволяє не використовувати залізобетонні елементи тимчасового заповнювання прохідної частини при спорудженні проходів, тому що тимчасове кріплення з набризк-бетону

тримає породу виробки у місці проходу (рис. 5), для якого отримано напружений стан скінченно-елементної моделі. Такий спосіб посилення частини проходу станції дозволяє не використовувати залізобетонні елементи тим-

часового заповнювання прохідної частини при спорудженні проходів, тому що тимчасове кріплення з набризк-бетону тримає породу виробки у місці проходів, для якого отримано напружений стан скінченно-елементної моделі (рис. 6, а).

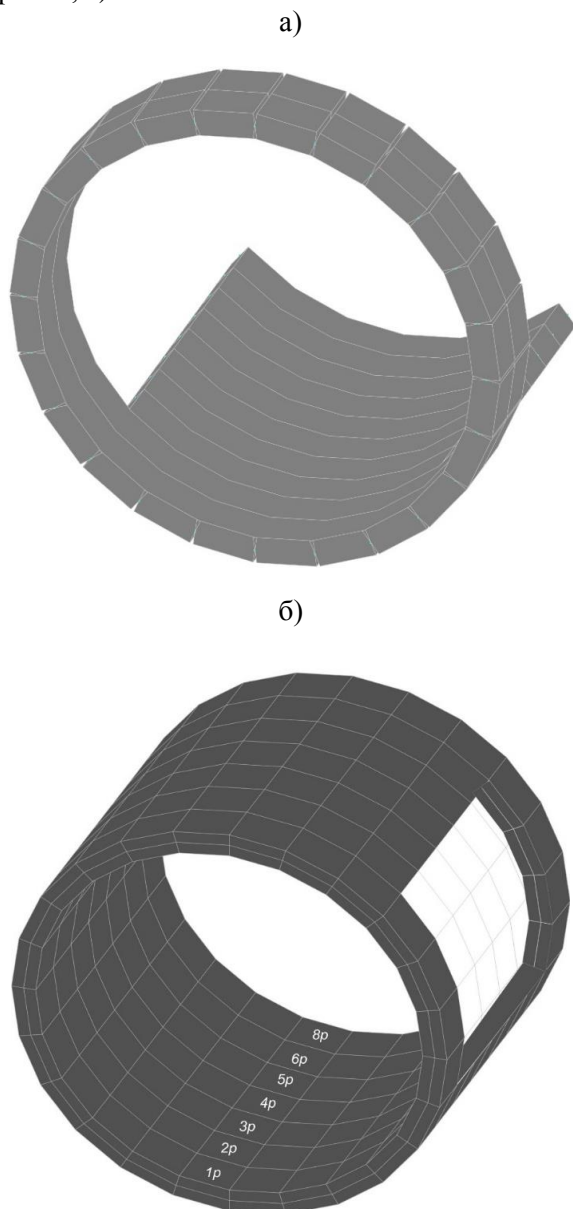


Рис. 6. Скінченно-елементні моделі оправи прохідної частини на другому (а) і п'ятому етапах монтажу

На третьому етапі, при монтажі балочної перемички проходів, в елементах лоткової частини змонтованої оправи виникають найнебезпечніші напруження $258,19 \text{ т/м}^2$. Для недопущення утворення тріщин в елементі оправи і зменшення напружень між елементами оправи і

виробкою встановлюються спеціальні дерев'яні прокладки.

Четвертий етап. З використанням блокувальнадача збирається на кільцях оправи 2р – 7р із тюбінгів С-3, С-5 замикають верхню частину оправи (рис. 7). Для зручності монтажу тюбінгів С-5 склепіння у верхній балці перемички для кожного кільця влаштовуються по 2 циліндричних гнізда діаметром 30 мм і глибиною 150 мм для монтажних сталевих штирів діаметром 25 мм.

П'ятий етап. Збирається повне кільце оправи 8р із тюбінгів С-3, С-4, С-1 (рис. 8). Тюбінги кільця оправи 8 ряду з'єднуються з тюбінгами 7 ряду болтами діаметру 24 мм. Замикає кільце оправи замковий тюбінг С-1. Для етапу створено скінченно-елементну модель (рис. 6, б).

Шостий етап. Збираються повні кільця оправи до наступного проходів і цикл повторюється (рис. 9). Виробка у місці проходів тримається на тимчасовому кріпленні із набризк-бетону, що не потребує розбірки тюбінгів оправи, як у традиційному способі.

Нагнітання за споруджену оправу у місці проходів проводять традиційним способом у отвори в залізобетонних тюбінгах з низу вгору. Чеканка швів і заміна болтових з'єднань відстає від фронту робіт на 20...30 метрів.

Створені в обчислювальному комплексі для аналізу міцності конструкцій методом скінченних елементів (SCAD), скінченно-елементні моделі оправи бокового станційного тунелю, що відображають етапність роботи по її спорудженню, дали змогу дослідити зміну напружено-деформованого стану в елементах оправи на різних етапах монтажу у прохідній частині пілонів.

Аналіз напруженого стану, який виникає на етапах монтажу постійної оправи у місцях проходів, дає змогу уникнути небезпечних моментів при монтажі елементів оправи. Так на третьому етапі монтажу виникають напруження у лотковій частині оправи, які перевищують напруження у цих елементах на шостому етапі, після замикання кільця оправи.

Після спорудження бокових станційних тунелів приступають до проходки середнього станційного тунелю. При монтажі оправи цього тунелю в місці проходів фасонні опорні тюбінги і залізобетонні балки, які створюють балочну перемичку, встановлюють в кільцях по обидві сторони від осі тунелю.

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

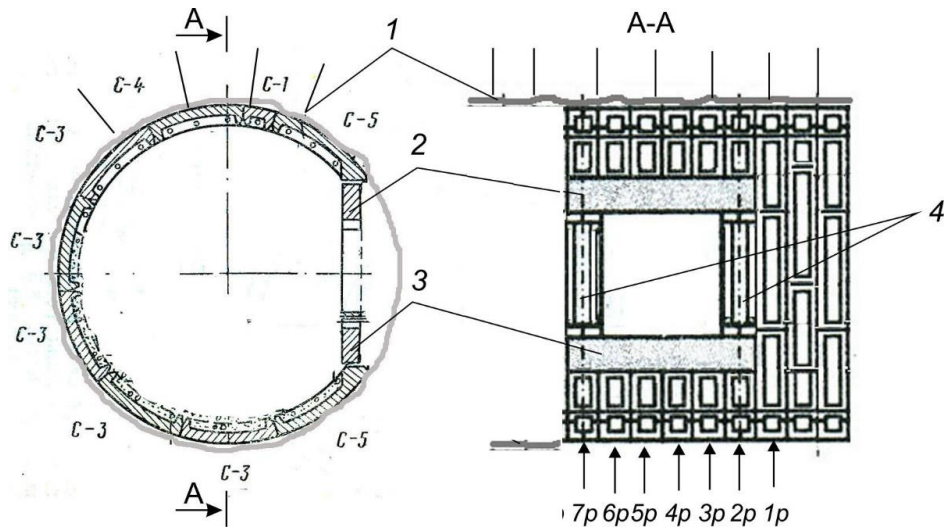


Рис. 7. Четвертий етап спорудження прохідної частини бокового станційного тунелю

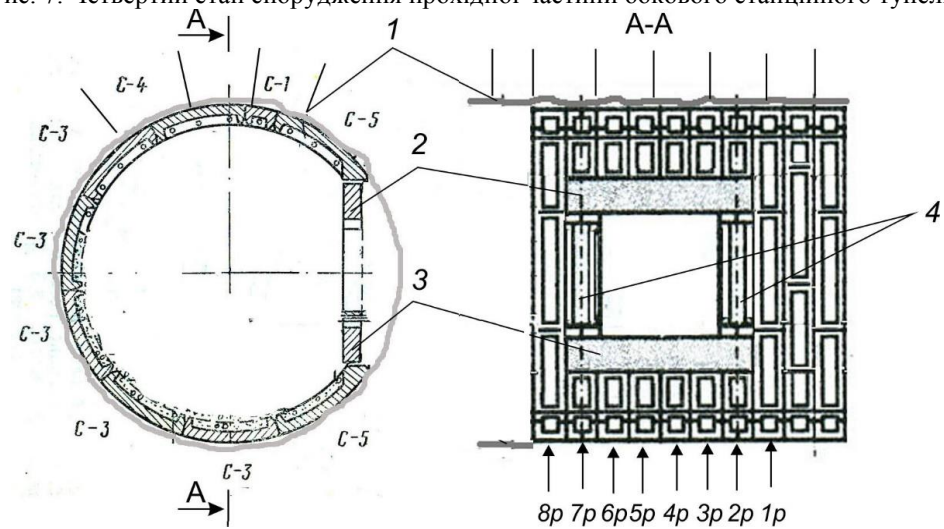


Рис. 8. П'ятий етап спорудження прохідної частини бокового станційного тунелю

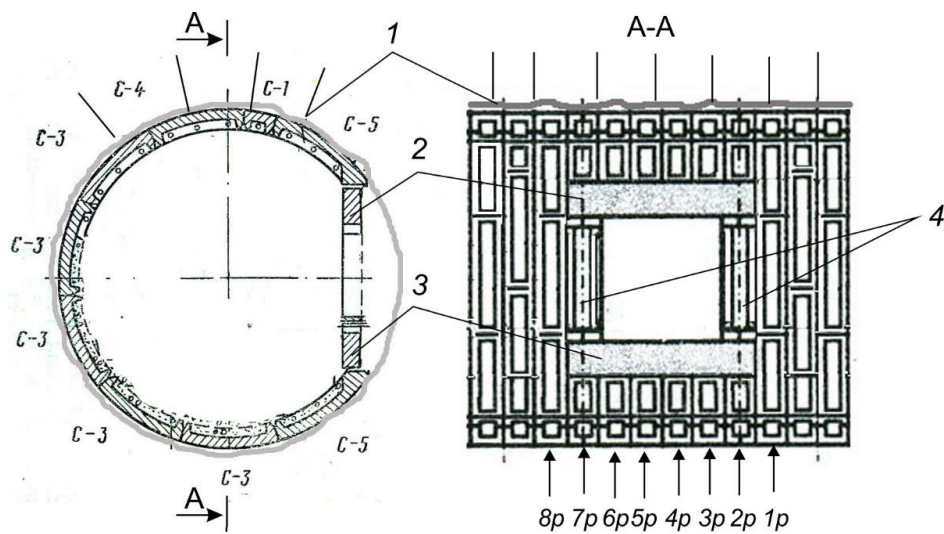


Рис. 9. Шостий етап спорудження прохідної частини бокового станційного тунелю

Наукова новизна та практична значимість

На основі виконаного чисельного аналізу поетапного спорудження пілонної станції на основі NATM, отримано залежності, що дозволяють переглянути існуючу концепцію спорудження цього типу станцій в міцних скельних породах. Отримані дані обґрунтовують застосування NATM і вивільнюють потенціал проаналізованої підземної споруди.

Проведене обґрунтування інноваційної технології на основі NATM дозволяє розширити область її застосування та успішно проводити будівництво таких складних підземних об'єктів як трьохсклепінчасті станції метрополітену, враховуючи вже впроваджений в Україні досвід європейських технологій.

Висновки

1. Запропонована технологія спорудження трьохсклепінчастої пілонної станції метрополітену зі збірного залізобетону з застосуванням NATM, що дозволяє збільшення відстані між проходкою у забої та монтажем постійної оправи станційних тунелів за рахунок використання тимчасового кріплення, використанням збірного залізобетону замість монолітного у прохідній частині пілону, а також не використання залізобетонних елементів тимчасового заповнення прохідній частині пілону дає достатньо велике заощадження коштів.

2. Побудовані скінченно-елементні моделі, що відображають етапність роботи і зміну напружено-деформованого стану, що дозволяє визначити небезпечні перерізи під час монтажу елементів оправи у прохідній частині.

3. Проаналізовані результати чисельного аналізу на етапах монтажу оправи свідчать, що на третьому етапі в елементах лоткової частини оправи виникають найнебезпечніші напруження, для усунення яких необхідні допоміжні засоби під час монтажу оправи.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

Alkhdour, A., Tiutkin, O., Bannikov, D., & Heletiuk, I. (2023). Substantiating the parameters for a non-circular structure of the mine shaft under construction in a heterogeneous rock massif. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1156, 012008. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1156/1/012008>

Chang, S. B., Kwon, S., Moon, S. J., & Lee, S. D.

(2005). A design case study of the very wide 3-arch tunnel under the railroad station building. *Underground Space Use: Analysis of the Past and Lessons for the Future*, 135-139.

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.

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.

Rabcewicz, L., & Golser, J. (1973). Principles of dimensioning the supporting system for the "New Austrian tunnelling method". *Water power*, 25(3), 88-93.

Radkevych, A., Tiutkin, O., Kuprii, V., & Tkach, T. (2023). Regularities of the stress state of the rock massif around the single-vault station under construction by NATM. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1156, 012009. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1156/1/012009>

Банніков, Д. О., Купрій, В. П., & Вотченко, Д. Ю. (2021). Закономірності напружено-деформованого стану оправ під час будівництва пілонної станції метрополітену. *Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика*, 19, 19-27.

Більченко, А. В., & Смолянюк, Н. В. (2021). Причини порушення геотехнологій при будівництві тунелів і метрополітенів. *Вісник Харківського національного автомобільно-дорожнього університету*, 93, 74-82.

Перельмутер, А. В., & Сливкер, В. И. (2002). *Расчетные модели сооружений и возможность их анализа*. Київ: Сталь.

Петренко, В. И., Петренко, В. Д., & Тютюкин, А. Л. (2005). *Современные технологии строительства метрополитенов в Украине*. Дніпропетровськ: Наука і освіта.

Петренко, В. Д., Банніков, Д. О., & Нетеса, М. І. (2020). Геофізичні дослідження та укріплення шаруватого та водонасиченого ґрунтового масиву в умовах Київського метрополітену. *Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика*, 17, 62-72.

Тютюкін, 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.

Тютюкін, О. Л. (2020). *Теоретичні основи комплексного аналізу тунельних конструкцій*. Дніпро: Журфонд.

D. O. BANNIKOV¹, M. I. NETESA², V. P. KUPRII^{3*}, O. I. DUBINCHYK⁴

¹ Department «Construction Production and Geodesy», Ukrainian State University of Science and Technologies, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (063) 400 43 07, e-mail d.o.bannikov@ust.edu.ua, ORCID 0000-0002-9019-9679

² Department «Construction Production and Geodesy», Ukrainian State University of Science and Technologies, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (067) 195 50 27, e-mail m.i.netesa@ust.edu.ua, ORCID 0000-0002-9134-8023

^{3*} Department «Transport Infrastructure», Ukrainian State University of Science and Technologies, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (097) 464 05 28, e-mail v.p.kuprii@ust.edu.ua, ORCID 0000-0002-7564-5191

⁴ Department «Transport Infrastructure», Ukrainian State University of Science and Technologies, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (095) 582 14 88, e-mail o.i.dubinychk@ust.edu.ua, ORCID 0000-0003-4059-2357

INNOVATIVE TECHNOLOGY FOR THE CONSTRUCTION OF A PYLON STATION OF THE METRO BASED ON THE EXPERIENCE OF USING NATM

Purpose. For quite a long time, the metro station of the pylon type of deep contour interval was considered an underground structure that no longer has development potential. However, after the introduction of innovative technologies during the construction of the Dnipro metro, in particular the New Austrian Tunneling Method (NATM), this design is being used again and has developed further use. The purpose of the scientific article is to analyze innovations in the technology of construction of a three-vaulted pylon metro station from precast reinforced concrete using NATM, which require scientific justification. **Methodology.** In order to achieve the goal, the traditional technology of constructing a deep contour interval pylon station was revised. An analysis of the features of NATM, which allow it to be used during the construction of a pylon station in strong rock, has been carried out. A step-by-step analysis of the construction of the station was implemented with the involvement of mathematical modeling based on the finite element method. For this purpose, a number of finite-element models of each stage of construction of a pylon-type station have been created. After the numerical analysis, the indicated models were adjusted in accordance with the changes associated with the new construction technology. **Findings.** The value of the stress-strain state of the pylon station was obtained during the numerical analysis of each stage of construction. Stress analysis proves the possibility of applying innovative construction technology in the case of a pylon station. **Originality.** On the basis of the performed numerical analysis of the phased construction of a pylon station based on NATM, dependencies were obtained that allow revising the existing concept of the construction of this type of station in strong rocks. The obtained data justify the application of NATM and release the potential of the analyzed underground structure. **Practical value.** The substantiation of the innovative technology based on NATM allows expanding the scope of its application and successfully carrying out the construction of such complex underground facilities.

Keywords: metro; pylon-type station; New Austrian tunneling method; construction technology; numerical analysis; finite element method

REFERENCES

- Alkhdour, A., Tiutkin, O., Bannikov, D., & Heletiuk, I. (2023). Substantiating the parameters for a non-circular structure of the mine shaft under construction in a heterogeneous rock massif. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1156, 012008. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1156/1/012008>. (in English)
- Chang, S. B., Kwon, S., Moon, S. J., & Lee, S. D. (2005). A design case study of the very wide 3-arch tunnel under the railroad station building. *Underground Space Use: Analysis of the Past and Lessons for the Future*, 135-139. (in English)
- 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. (in English)
- 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. (in English)
- Rabczewicz, L., & Golser, J. (1973). Principles of dimensioning the supporting system for the "New Austrian tunnel-

ling method". *Water power*, 25(3), 88-93. (in English)

Radkevych, A., Tiutkin, O., Kuprii, V., & Tkach, T. (2023). Regularities of the stress state of the rock massif around the single-vault station under construction by NATM. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1156, 012009. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1156/1/012009>. (in English)

Bannikov, D. O., Kuprii, V. P., & Votchenko, D. Yu. (2021). Zakonomirnosti napruzhenno-deformovanoho stanu oprav pid chas budivnytstva pylonnoi stantsii metropolitenu. *Mosty ta tuneli: teoriia, doslidzhennia, praktyka*, 19, 19-27. (in Ukrainian)

Bilchenko, A. V., & Smolianiuk, N. V. (2021). Prychyny porushennia heotekhnologii pry budivnytstvi tuneliv i metropoliteniv. *Visnyk Kharkivskoho natsionalnoho avtomobilno-dorozhnoho universytetu*, 93, 74-82. (in Ukrainian)

Perelmuter, A. V., & Slivker, V. I. (2002). *Raschetnye modeli sooruzheniy i vozmozhnost ikh analiza*. Kyiv: Stal. (in Russian)

Petrenko, V. I., Petrenko, V. D., & Tyutkin, A. L. (2005). *Sovremennye tekhnologii stroitelstva metropolitenov v Ukraine*. Dnipropetrovsk: Nauka i osvita. (in Russian)

Petrenko, V. D., Bannikov, D. O., & Netesa, M. I. (2020). Heofizychni doslidzhennia ta ukriplennia sharuvatoho ta vodonasychenoho gruntovoho masyvu v umovakh Kyivskoho metropolitenu. *Mosty ta tuneli: teoriia, doslidzhennia, praktyka*, 17, 62-72. (in Ukrainian)

Tiutkin, O. L., Kuprii, V. P., & Bielikova, S. I. (2021). Porivnialnyi analiz tekhnologii sporudzhennia eskalatornoho tuneliu Dniprovskoho metropolitenu NATM. *Mosty ta tuneli: teoriia, doslidzhennia, praktyka*, 20, 86-91. (in Ukrainian)

Tiutkin, O. L. (2020). *Teoretychni osnovy kompleksnoho analizu tunelnykh konstrukttsii*. Dnipro: Zhurfond. (in Ukrainian)

Надійшла до редколегії 31.01.2024.

Прийнята до друку 26.02.2024.