

## МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

УДК 624.191:624.139.62:624.138.4

О. Л. ТЮТЬКІН<sup>1\*</sup>, С. І. БЕЛІКОВА<sup>2</sup>

<sup>1\*</sup> Кафедра «Транспортна інфраструктура», Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (066) 290 45 18, ел. пошта alexeytutkin@gmail.com, ORCID 0000-0003-4921-4758

<sup>2</sup> Кафедра «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

### ОБҐРУНТУВАННЯ РОЗРАХУНКОВОЇ СТРАТЕГІЇ ДОСЛІДЖЕННЯ КОНСТРУКЦІЇ ПОХИЛОГО ТУНЕЛЮ, ЩО СПОРУДЖУЄТЬСЯ NATM

**Мета.** На основі аналізу розрахункових стратегій (аналітична, експериментальна, чисельна) та їх методологічних особливостей, провести обґрунтування найбільш доцільної для дослідження конструкції похилого тунелю, що споруджується NATM. **Методика.** Для досягнення поставленої мети проведений аналіз розрахункових стратегій (аналітична, експериментальна, чисельна). Проаналізовано особливості кожної стратегії для умов підземних виробок та випадку конструкції похилого тунелю, що споруджується NATM. Визначено, яким чином кожна розрахункова стратегія надає можливості досліджувати похилі тунелі. **Результати.** Визначені переваги та недоліки трьох розрахункових стратегій (аналітична, експериментальна, чисельна) для дослідження конструкції похилого тунелю, що споруджується NATM. Відзначено, що аналітична та експериментальна стратегії мають особливі переваги, але відмічені значною трудомісткістю під час проведення дослідження. Аналітичні методи дослідження не можуть в повному обсязі відобразити складну багатопланову конструкцію похилого тунелю, що споруджується NATM. Експериментальні методи позначені високим рівнем складності втілення. На основі порівняльного аналізу виявлено, що чисельний аналіз є єдиною розрахунковою стратегією, яка характеризується помірними витратами праці дослідників та високим рівнем точності результатів розрахунку. **Наукова новизна.** На основі результатів порівняльного аналізу розрахункових стратегій (аналітична, експериментальна, чисельна) доведено, що чисельний аналіз позбавлений низки суттєвих недоліків (уведення додаткових спрощень як в аналітичних методах та трудомістке відображення реальної ситуації в експериментальних моделях). **Практична значимість.** В ході досліджень проведено обґрунтування чисельної розрахункової стратегії дослідження конструкції похилого тунелю, що споруджується NATM, як найбільш раціональної в практичному плані.

*Ключові слова:* метрополітен; похилий тунель; NATM; розрахункова стратегія; чисельний аналіз

#### Вступ

Підземне будівництво взагалі та тунелебудування зокрема принципово відрізняються від будь-якої іншої форми наземного будівництва. В промисловому та цивільному будівництві або під час спорудження мостів будівельні матеріали мають визначені та перевірені лабораторно властивості, тоді як оточуючий тунель ґрунтовий масив є невід'ємною частиною загальної системи та відіграє вирішальну роль у її стабільності, вимагаючи дослідження властивостей та визначаючи тип конструкції і спосіб спорудження (Charman, Metje, & Stärk, 2010).

Проектування і прийняття рішень щодо конструкції і технології будівництва тунелю, зокрема, такого особливого як похилий (еска-

латорний), спирається на наукові судження та досвід, оскільки існує низка невідомих, що потребують комплексного та системного інженерного оцінювання (Тютькін, Мірошник, & Гелетюк, 2021).

Спираючись на сучасні тенденції тунелебудування та успішний досвід спорудження NATM (New Austrian Tunnelling Method, Новоавстрійський метод спорудження тунелів), його визначають і пропонують як універсальний та раціональний (Karakuş, & Fowell, 2004).

Особливість NATM полягає у можливості комбінування видів тимчасового кріплення (набризк-бетон, армування сітками, анкери, випереджуюче кріплення тощо), що дає можливість застосовувати його у будь-яких інженерно-геологічних умовах, у ґрунтах різної міцно-

сті, у шаруватих, водонасичених масивах, споруджувати перегінні та похилі ескалаторні тунелі (Тют'якін, Купрій, & Белікова, 2021).

Проте необхідно зазначити, що з ростом популярності філософії NATM, за останні 40 років її активного застосування зареєстровано більше 30 випадків обвалів і руйнувань (Health and Safety Executive (report), 1996). Ці аварії призвели до серйозних наслідків, пошкоджень громадських будівель та інфраструктури і потягнули за собою критику загальних технологічних рішень, питань про доцільність застосування і конфліктів навколо цього методу. Проаналізувавши ці випадки можна виділити основні причини обвалів і руйнувань: 1) непередбачувані геологічні причини; 2) помилки планування та проектування; 3) розрахункові помилки; 4) будівельні помилки; 5) помилки управління і контролю.

В цілому, на зростання кількості зареєстрованих інцидентів впливають такі фактори, як надмірна впевненість у методі, залучення спеціалістів, малознайомих з технологією, та потреба застосовувати NATM у все більш складних умовах, наприклад, під час спорудження похилих ескалаторних тунелів у метрополітенах глибокого закладення, що перетинають шари ґрунтів різної міцності (Тют'якін, Купрій, & Белікова, 2021).

Таким чином, важливими вимогами є розуміння концепції NATM, моніторинг і оптимізація процесів та правильне виконання усіх необхідних обчислень на етапі проектування (Kovári, 1994). Існує три основні стратегії розрахунку – аналітична, експериментальна і чисельна. Спираючись на минулий досвід інженерів, що реалізовували проекти за технологією NATM, можна виділити певну переважаючу стратегію, проте необхідно проаналізувати доцільність кожної з них для такої складної і багатопрофільної задачі як спорудження похилого тунелю.

### Мета

На основі аналізу розрахункових стратегій (аналітична, експериментальна, чисельна) та їх методологічних особливостей, провести обґрунтування найбільш доцільної для дослідження конструкції похилого тунелю, що споруджується NATM.

### Методика

**Аналітичні методи.** Неможливо врахувати всі впливи, параметри і граничні умови, які залежать від геології і етапів будівництва у розрахунку. Тому були розроблені аналітичні моделі, що спрощують реальність до такої міри, що основні параметри можуть враховуватись у розрахунках таким чином, щоб прийти до доцільних і адекватних результатів (Chapman, Metje, & Stärk, 2010).

Наприклад, у **пружинно-балковому методі** оправа тунелю ідеалізована і являє собою пружне кільце, в якому пружність ґрунту досягається за рахунок постановки радіально і тангенціально розташованих пружин, що імітують пасивний тиск. Важливими параметрами для такого розрахунку є модуль пружності і коефіцієнт бічного тиску (Barla, G., & Barla, M., 2000). Оскільки оточуючий масив представлений лише пружинами, аналіз не може надати жодної інформації про можливе розповсюдження напружень і деформацій ґрунту (рис. 1).

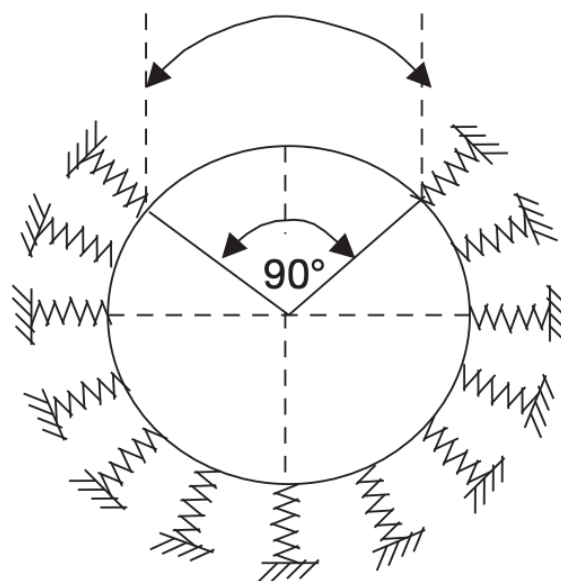


Рис. 1. Схема пружинно-балкового методу (рисунок з роботи Chapman, Metje, & Stärk, 2010)

У **методі суцільного середовища** масив, у якому споруджується тунель, ідеалізований як континуум, тобто в ґрунті немає розривів. Метод передбачає, що масив являє собою нескінченно велику тонку ділянку (*slice*; виконання умови плоскої деформації) з отвором у центрі і дозволяє інтерпретувати деформації ґрунтового середовища (рис. 2).

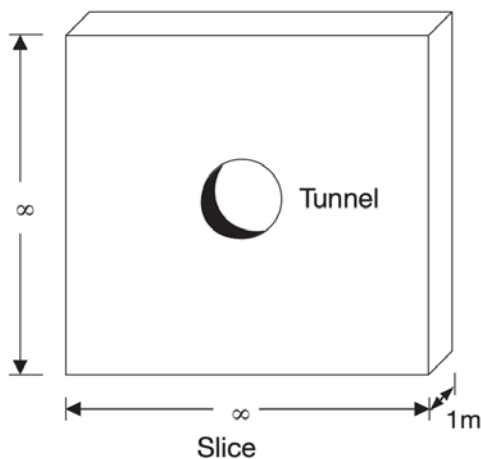


Рис. 2. Схема методу суцільного середовища (рисунок з роботи Chapman, Metje, & Stärk, 2010)

У **методі опору кріплення** передбачається, що оправа тунелю обмежує деформації ґрунту і забезпечує внутрішній тиск (опір) проти масиву. За опір приймають тиск всередині тунелю, який залежить від деформацій, а обмеження деформацій ґрунту є основним критерієм застосування цього методу (рис. 3).

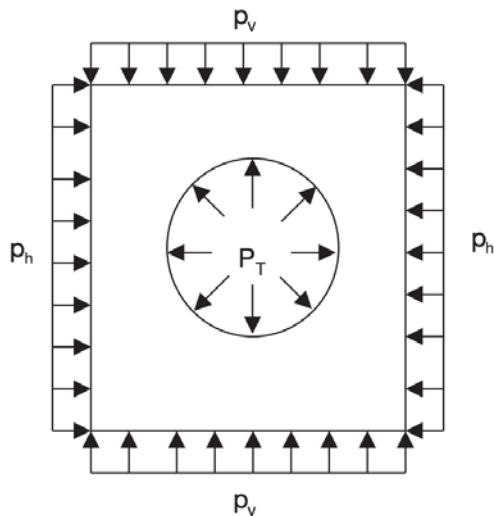


Рис. 3. Схема методу опору кріплення (рисунок з роботи Chapman, Metje, & Stärk, 2010)

**Експериментальні методи.** Хоча на сьогоднішній день експериментальні методи застосовуються значно менше з появою сучасних програмних комплексів і розвитком математичного моделювання, проте є певні конкретні умови і задачі, для яких вони є актуальними.

Наприклад, така експериментальна процедура як відцентрове випробування забезпечує основу для кількісної оцінки того, як спосіб

спорудження впливає на наземні будівлі, на деформації ґрунту і просідання будинків (Ritter, Giardina, DeJong, & Mair, 2018). Метод передбачає створення моделі у масштабі і проведення серії випробувань у геотехнічній центрифугі (рис. 4).

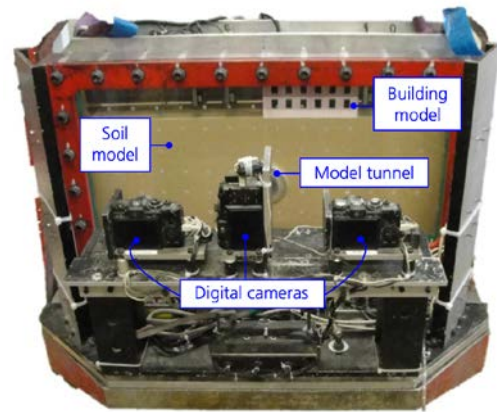


Рис. 4. Схема моделі в центрифугі (світлина з роботи Ritter, Giardina, DeJong, & Mair, 2018)

Фізичне моделювання може також передбачати створення моделі і прикладення навантаження горизонтальними і вертикальними домкратами з метою імітувати реальну ситуацію і передбачити поведінку кріплення (Hebin, Zheng, Pengfei, Li, Guowei, Ma, & Qianbing, Zhang, 2022).

**Чисельні методи.** В результаті збільшення обчислювальної потужності та доступності широкого вибору комерційних обчислювальних програм значно збільшилося використання числових моделей (Петренко, Гузченко, & Тютюкін, 2006; Петренко, Тютюкін, & Петренко, 2006; Тютюкін, 2020) (рис. 5).

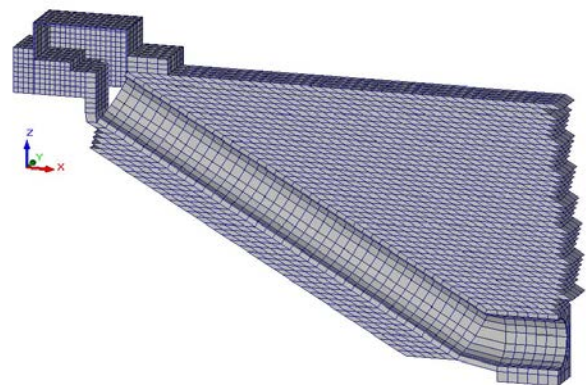


Рис. 5. Скінченно-елементна модель ескалаторного тунелю (рисунок з роботи Тютюкін, 2020)

Чисельні методи можна розділити на різні типи в залежності від способу обчислення прийнятого в пакеті програми. Для моделювання континуума (грунту) найпоширенішим чисельним методом аналізу проєктів тунелів є метод скінченних елементів (Гульбе, Косицын, & Долотказин, 1994; Чурадзе, 1996; Кавказкий, 2004; El-Kilany, & El-Sayed, 2017; Neo, June, Kim, Byoung-II, Lee, Jea-Dug, & Kim, Young-Geun, 2017). Для імітування розривів (скельних ґрунтів) застосовують методи дискретних елементів і граничних елементів.

Метод сходження-обмеження (*convergence-confinement*) широко використовується для підземних несучих конструкцій на попередньому етапі проєктування. На основі аналізу напружень і деформацій навколо тунелю метод дає уявлення про взаємодію між кріпленням і масивом за допомогою плоскої моделі і дозволяє отримати числові результати.

Метод прогресивного пом'якшення (*progressive softening*) був розроблений спеціально для NATM, він передбачає зниження жорсткості ґрунту на певний крок. Метод контролю втрати об'єму (*volume loss control*) дає можливість оцінити втрати об'ємів при зменшенні тиску опору кріплення.

### Результати

**Аналітичні методи.** Не викликає сумнівів, що **пружинно-балковий метод** – це простий і швидкий метод розрахунку, який можна використовувати для визначення необхідної товщини оправи, проте він має обмежений потенціал для інтерпретації щодо реальної ситуації через велику кількість спрощень (Тютюкін, 2020).

Припущення **методу суцільного середовища** часто є несприятливими для використання у тунелях глибокого закладення, оскільки зі збільшенням глибини лінійно зростає навантаження на оправу і відповідно збільшується її товщина (Chapman, Metje, & Stärk, 2010). У поєднанні з пружним розрахунком це призводить до потенційно нереальної товщини кріплення. Такий консервативний підхід не передбачає розрахунку висоти склепіння обвалення, визначення його розмірів засновується на досвіді, інженерних судженнях і основних характеристиках. Спрощення у методі, в якому ґрунт представлений як континуум, не відповідає реальності, в якій масив є тріщинуватим, багато-

шаровим або неоднорідним (Barla, G., & Barla, M., 2000; Тютюкін, 2020).

Модель **методу опору кріплення** можна застосовувати для тунелів глибокого закладення у скельних ґрунтах, проте він має значні недоліки: по-перше, неможливість встановити кількісну межу критичної деформації; по-друге, навіть якщо завдяки досвіду роботи у схожих геологічних умовах у подібних методах підземного будівництва критична деформація визначається – існує багато факторів, що впливають на розвиток деформації: вони є нелінійними і залежать від часу, наприклад, при застосуванні набризк-бетону; по-третє, опір кріплення не розраховується, а приймається як внутрішній тиск у системі, в якій немає внутрішніх сил, таким чином виникає проблема у визначенні товщини і типу оправи (Chapman, Metje, & Stärk, 2010; Тютюкін, 2020).

**Експериментальні методи.** Фізичне моделювання застосовується для визначення поведінки процесів, яким неможливо надати характеристики і достовірно змоделювати у програмних комплексах. У випадках дослідження сейсмічного впливу, розповсюдження вогню і диму при пожежі, роботи вентиляції перевага надається експериментальним методам оцінки.

**Чисельні методи.** Безсумнівно, що математичне моделювання прийшло на зміну недосконалим аналітичним методам, компенсуючи їх недоліки та маючи такі переваги:

- 1) відображення максимально реалістичної поведінки ґрунту;
- 2) робота зі складними геологічними та гідравлічними умовами;
- 3) моделювання проміжних і довгострокових умов роботи;
- 4) можливість моделювання постійного і тимчасового кріплення;
- 5) облік суміжних служб і споруд.

Потрібно зазначити, що чисельний аналіз – це не панацея і до нього слід ставитись як до будь-якого іншого інженерного інструмента. Працездатні результати математичного моделювання залежать від досвіду користувача, інженерних суджень, припущень і завдання правильних характеристик моделі.

Однак, проаналізувавши особливості розрахункових стратегій для конструкції похилого тунелю, що споруджується NATM, слід відмітити, що чисельна є найбільш ефективною.

## МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

**Наукова новизна та практична значимість**

На основі результатів порівняльного аналізу розрахункових стратегій (аналітична, експериментальна, чисельна) доведено, що чисельний аналіз позбавлений низки суттєвих недоліків (уведення додаткових спрощень в аналітичних методах та трудомістке відображення реальної ситуації в експериментальних моделях), а відмічені переваги (особливо відображення реалістичної поведінки ґрунту) є переважними.

В ході досліджень проведено обґрунтування чисельної розрахункової стратегії дослідження конструкції похилого тунелю, що споруджується NATM, як найбільш раціональної в практичному плані.

**Висновки**

Визначено, що аналітична та експериментальна стратегії мають особливі переваги, але відмічені значною трудомісткістю під час проведення дослідження. Аналітичні методи дослідження не можуть в повному обсязі відобразити складну багатопарову конструкцію похилого тунелю, що споруджується NATM. Експериментальні методи позначені високим рівнем складності втілення.

На основі порівняльного аналізу виявлено, що чисельний аналіз є єдиною розрахунковою стратегією, яка характеризується помірними витратами праці дослідників та високим рівнем точності результатів розрахунку.

**СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ**

- Barla, G., & Barla, M. (2000). Continuum and discontinuum modelling in tunnel engineering. *Rudarsko-geološko-naftni zbornik*, 52(12), 45-57.
- Chapman, D., Metje, N., & Stärk, A. (2010). *Introduction to Tunnel Construction*. London: Spon Press.
- 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.
- Hebin, Zheng, Pengfei, Li, Guowei, Ma, & Qianbing, Zhang (2022). Experimental investigation of mechanical characteristics for linings of twins tunnels with asymmetric cross-section. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 119, 104209.
- Karakuş, M., & Fowell, R. J. (2004). An insight into the New Austrian Tunneling Method (NATM). *KAYAMEK'2004-VII. Bölgesel Kaya Mekaniği Sempozyumu / ROCKMEC'2004-VIIth Regional Rock Mechanics Symposium*.
- Kovári, K. (1994). Erroneous concepts behind the New Austrian Tunneling Method. *Tunnels & Tunnelling*, 26(11), 38-42.
- Health and Safety Executive (report) (1996). *Safety of New Austrian Tunneling Method (NATM) tunnels: a review of sprayed concrete lined tunnels with particular reference to London clay*. Sudbury: HSE Books.
- Ritter, S., Giardina, G., DeJong, M. J., & Mair, R. J. (2018). Centrifuge modelling of building response to tunnel excavation. *International Journal of Physical Modelling in Geotechnics*, 18(3), 146-161.
- Гульбе, В. И., Косицын, С. Б., & Долотказин, Д. Б. (1994). Пространственный расчет несущей конструкции эскалаторного зала проектируемого второго выхода станции метро «Маяковская». *Метро*, 5-6, 31-32.
- Кавказкий, В. Н. (2004). Особенности работы обделки эскалаторного тоннеля из монолитного железобетона, пройденного с предварительным замораживанием слабых водонасыщенных грунтов. *Метро и тоннели*, 3, 46-49.
- Петренко, В. Д., Гузченко, В. Т., & Тютюкін, О. Л. (2006). Розрахунок ескалаторного тунелю із залізобетонною оправою МСЕ. *Геотехнічна механіка*, 64, 51-59.
- Петренко, В. Д., Тютюкін, О. Л., & Петренко, В. І. (2006). Визначення міцності ескалаторного тунелю із чавунною оправою за допомогою МСЕ. *Проблеми гірського тиску*, 14, 270-277.
- Тютюкін, О. Л. (2020). *Теоретичні основи комплексного аналізу тунельних конструкцій*. Дніпро: Журфонд.
- Тютюкін, О. Л., Купрій, В. П., & Белікова, С. І. (2021). Порівняльний аналіз технологій спорудження ескалаторного тунелю Дніпровського метрополітену NATM. *Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика*, 20, 79-85.
- Тютюкін, О. Л., Мірошник, В. А., & Гелетюк, І. В. (2021). Комплексний аналіз конструкції стовбуру Дніпровського метрополітену. *Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика*, 19, 91-98.
- Чурадзе, Т. К. (1996). Численный анализ пространственного напряженного состояния эскалаторного тоннеля. *Метро*, 3, 37-38.

O. L. TIUTKIN<sup>1\*</sup>, S. I. BIELIKOVA<sup>2</sup>

<sup>1\*</sup> Department «Transport infrastructure», Ukrainian State University of Science and Technologies, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (066) 290 45 18, e-mail alexeytutkin@gmail.com, ORCID 0000-0003-4921-4758

<sup>3</sup> Department «Transport infrastructure», Ukrainian State University of Science and Technologies, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (050) 756 31 21, e-mail 7563121@gmail.com, ORCID 0000-0003-0707-7791

## SUBSTANTIATION OF THE CALCULATION STRATEGY FOR THE STUDY OF THE STRUCTURE OF AN INCLINED TUNNEL CONSTRUCTED BY NATM

**Purpose.** Based on the analysis of calculation strategies (analytical, experimental, numerical) and their methodological features, to substantiate the most appropriate one for the study of the design of the inclined tunnel under construction by NATM. **Methodology.** To achieve this goal, an analysis of computational strategies (analytical, experimental, numerical) was performed. The specifics of each strategy for the conditions of underground workings and the case of the construction of an inclined tunnel under construction by NATM are analyzed. It is determined how each calculation strategy provides an opportunity to explore sloping tunnels. **Findings.** The advantages and disadvantages of three calculation strategies (analytical, experimental, numerical) for the study of the design of an inclined tunnel under construction by NATM are identified. It is noted that analytical and experimental strategies have special advantages, but are marked by considerable complexity during the study. Analytical research methods cannot fully reflect the complex multilayer structure of the inclined tunnel under construction by NATM. Experimental methods are characterized by a high level of complexity of implementation. Based on comparative analysis, it was found that numerical analysis is the only calculation strategy, with moderate labor of researchers and a high level of accuracy of calculation results. **Originality.** Based on the results of comparative analysis of computational strategies (analytical, experimental, numerical) it is proved that numerical analysis is devoid of a number of significant shortcomings (introduction of additional simplifications in analytical methods and time-consuming reflection of the real situation in experimental models). **Practical value.** In the course of the research the substantiation of the numerical calculation strategy of the study of the design of the inclined tunnel constructed by NATM as the most rational in practical terms is carried out.

**Keywords:** metro; inclined tunnel; NATM; calculation strategy; numerical analysis

### REFERENCES

- Barla, G., & Barla, M. (2000). Continuum and discontinuum modelling in tunnel engineering. *Rudarsko-geološko-naftni zbornik*, 52(12), 45-57. (in English)
- Chapman, D., Metje, N., & Stärk, A. (2010). *Introduction to Tunnel Construction*. London: Spon Press. (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 English)
- Hebin, Zheng, Pengfei, Li, Guowei, Ma, & Qianbing, Zhang (2022). Experimental investigation of mechanical characteristics for linings of twins tunnels with asymmetric cross-section. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 119, 104209. (in English)
- Karakuş, M., & Fowell, R. J. (2004). An insight into the New Austrian Tunnelling Method (NATM). *KAYAMEK'2004-VII. Bölgesel Kaya Mekaniği Sempozyumu / ROCKMEC'2004-VIIth Regional Rock Mechanics Symposium*. (in English)
- Kovári, K. (1994). Erroneous concepts behind the New Austrian Tunnelling Method. *Tunnels & Tunnelling*, 26(11), 38-42. (in English)
- Health and Safety Executive (report) (1996). *Safety of New Austrian Tunnelling Method (NATM) tunnels: a review of sprayed concrete lined tunnels with particular reference to London clay*. Sudbury: HSE Books. (in English)
- Ritter, S., Giardina, G., DeJong, M. J., & Mair, R. J. (2018). Centrifuge modelling of building response to tunnel excavation. *International Journal of Physical Modelling in Geotechnics*, 18(3), 146-161. (in English)

## МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

- Gulbe, V. I., Kositsyn, S. B., & Dolotkazin, D. B. (1994). Prostranstvennyy raschet nesushchey konstruksii eskalatornogo zala proektiruемого второго vykhoda stantsii metro «Mayakovskaya». *Metro*, 5-6, 31-32. (in Russian)
- Kavkazkiy, V. N. (2004). Osobennosti raboty obdelki eskalatornogo tonnelya iz monolitnogo zhelezobetona, proydennogo s predvaritelnyim zamorazhivaniem slabykh vodonasyshchennykh gruntov. *Metro i tonneli*, 3, 46-49. (in Russian)
- Petrenko, V. D., Huzchenko, V. T., & Tiutkin, O. L. (2006). Rozrakhunok eskalatornogo tuneliu iz zalizobetonnoiu opravoiu MSE. *Heotekhnichna mekhanika*, 64, 51-59. (in Ukrainian)
- Petrenko, V. D., Tiutkin, O. L., & Petrenko, V. I. (2006). Vyznachennia mitsnosti eskalatornogo tuneliu iz chavunnoiu opravoiu za dopomohoiu MSE. *Problemy hirskoho tysku*, 14, 270-277. (in Ukrainian)
- Tiutkin, O. L. (2020). *Teoretychni osnovy kompleksnogo analizu tunelnykh konstruksii*. Dnipro: Zhurfond. (in Ukrainian)
- Tiutkin, O. L., Kuprii, V. P., & Bielikova, S. I. (2021). Porivnialnyi analiz tekhnolohii sporudzhennia eskalatornogo tuneliu Dniprovskoho metropolitenu NATM. *Mosty ta tuneli: teoriia, doslidzhennia, praktyka*, 20, 79-85. (in Ukrainian)
- Tiutkin, O. L., Miroshnyk, V. A., & Heletiuk, I. V. (2021). Kompleksnyi analiz konstruksii stovburu Dniprovskoho metropolitenu. *Mosty ta tuneli: teoriia, doslidzhennia, praktyka*, 19, 91-98. (in Ukrainian)
- Churadze, T. K. (1996). Chislennyi analiz prostranstvennogo napryazhennogo sostoyaniya eskalatornogo tonnelya. *Metro*, 3, 37-38. (in Russian)

Надійшла до редколегії 28.03.2022.

Прийнята до друку 27.04.2022.