

## МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

УДК 624.191:519.87

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

<sup>1</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

<sup>2\*</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

### ОБҐРУНТУВАННЯ ВИБОРУ РОЗРАХУНКОВОЇ МОДЕЛІ ЕСКАЛАТОРНОГО ТУНЕЛЮ В ПЛОСКІЙ І ПРОСТОРОВІЙ ПОСТАНОВКАХ

**Мета.** Виконати аналіз аналітичних і чисельних методів математичного моделювання ескалаторного тунелю. Виявити основні характеристики та відмінності методів, які базуються на плоскій або просторовій постановці. Обґрунтувати вибір розрахункової моделі ескалаторного тунелю та його постановку. **Методика.** Для досягнення поставленої мети проаналізовано низку аналітичних методів, що ґрунтуються на плоскій (2D) постановці (метод зазору, метод контролю втрати об'єму, метод обмеження переміщення). Розглянуто підходи в чисельних методах, зокрема в методі скінченних елементів, які успішно застосовували плоску постановку. Проаналізовано також і просторову (3D) постановку в методі скінченних елементів. Аналіз чисельного експерименту на основі 3D-моделей показує, що тривимірна структура змушує приймати інтерпретаційні рішення, які не враховані в поперечному перерізі, тобто у двовимірній моделі. **Результати.** Розроблені скінченно-елементні моделі ескалаторного тунелю в плоскій і просторовій постановках, причому 2D-модель товщиною 1 м повторювала умови 3D-моделі в її середній частині. Отримані параметри напружено-деформованого стану, які піддавалися порівняльному аналізу. З'ясовано, що значення норм горизонтальних та вертикальних напружень у фрагменті 3D-моделі (середина) та у 2D-моделі мають відмінність відповідно в 3,2 та 7,2 %. **Наукова новизна.** На основі результатів проведеного обґрунтування вибору розрахункової моделі ескалаторного тунелю доведено, що застосування 2D-моделей є адекватним системі взаємодії ескалаторного тунелю з оточуючим масивом. Таке твердження засвідчене майже ідентичним розподілом напружень і деформацій в скінченно-елементних моделях в плоскій і просторовій постановках. **Практична значимість.** В ході досліджень доведено, що плоска скінченно-елементна модель ескалаторного тунелю є адекватною поставленій задачі за умови її застосування в декількох характерних перерізах ескалаторного тунелю, тобто створення низки моделей в 2D-постановці, що дозволяють врахувати її положення по довжині тунелю, що розраховується.

*Ключові слова:* ескалаторний тунель; спорудження тунелю; аналітичні методи; метод скінченних елементів; плоска та просторова постановки

#### Вступ

Сьогодні процес спорудження такого складного інженерного об'єкта як тунель, особливо похилий ескалаторний, може лише частково базуватися на минулому досвіді. На сьогодні розроблено десятки технологій спорудження тунелів, кожна з яких базується на окремому підході до підземної споруди та оточуючого її масиву, які переосмислюють взаємодію між ними. Разом з тим, наукове обґрунтування нових технологій обов'язково повинно включати в себе розробку математичних моделей для

прогнозування поведінки масиву, а також подальшого висування вимог до конструкції й матеріалу оправи, а також технології будівництва тунелю.

Проходка тунелів – без сумнівів, є задачею у просторовій (тривимірній, 3D) постановці, тому навіть інтуїтивно врахування просторового фактору повинно привести до більш точних прогнозів напружено-деформованого стану (НДС) системи. Однак, існуючі дослідження, що порівнюють різні постановки, не стали однозначно переконливими у цьому відношенні. Причиною зниження адекватності отриманих рішень в 3D-

постановці є необхідність застосування додаткових припущень щодо послідовності прохідницьких робіт, процесу монтажу оправи, поведінки тунельних конструкцій у часі (зокрема, для торкрет-бетону у випадку Новоавстрійського способу спорудження тунелів – NATM).

Не викликає сумнівів, що сучасні комерційні пакети програмного забезпечення (NASTRAN, Cosmos, PLAXIS 3D, Phase2 тощо) дають можливість змоделювати умови, максимально наближені до реальності, проте налаштування 3D-моделі для проблеми спорудження тунелів може стати нелегкою задачею. Це означає, що двовимірні (2D) моделі все ще дуже поширені, хоча їх прийняття для розрахунку і прогнозування роботи тунелю одразу означає, що така конструкція потребує низки припущень. Зокрема, слід враховувати факт, що ефект тривимірного нерівнокомпонентного стиску, який настільки важливий для поведінки ґрунту, не може бути змодельованим. Однак, деякі автори вважають, що втрата третьої компоненти і перетворення просторового стиску в плоский несуттєво впливає на деформування систем (Svoboda, & Mašín, 2011; Do, & Dias, 2017). Крім того, доступно багато методів для врахування 3D-ефектів в 2D-моделюванні тунелів NATM (Karakus, 2007), що робить важливим порівняння результатів плоскої і просторової постановки в математичному моделюванні.

В певних умовах 3D-моделі в прогнозуванні поведінки ґрунту можуть бути більш точними і реалістичними. Хоча основним недоліком 3D-моделей є тривалий час обчислення через кількість компонентів, необхідних для коректної дискретизації, проте деякі науковці наполягають саме на 3D-моделюванні у розв'язанні будь-якої геомеханічної задачі.

В той же час, прогнозуючи поведінку системи «кріплення – масив» у задачах спорудження тунелів, інженери продовжують надавати перевагу 2D-програмам у створенні горизонтальних і вертикальних розрізів. Або вони використовують так звану 2,5D-модель – особливу математичну модель, в якій властивості кожного шару зберігаються постійними (Svoboda, & Mašín, 2011), а повноцінні 3D-програми застосовують для моделювання об'ємних чи протяжних підземних споруд.

Таким чином, дискусія про вибір постановки математичного моделювання має відбувати-

ся для кожної конкретної ситуації, зокрема для похилого тунелю, який перетинає декілька шарів ґрунту і має особливе положення в масиві.

### Мета

Виконати аналіз аналітичних і чисельних методів математичного моделювання ескалаторного тунелю, які враховують його просторову поведінку, а також взаємодію оправи з оточуючим масивом. Для цього слід виявити основні характеристики та відмінності методів, які базуються на плоскій або просторовій постановці, що дозволить обґрунтувати вибір розрахункової моделі.

### Методика

Загальновідомо, що деформації, спричинені проходкою тунелів, залежать від інженерно-геологічних умов, глибини закладання, діаметру тунелю, його матеріалу та конструкції і методу спорудження. Для оцінки потенційних деформацій, що виникнуть в процесі експлуатації тунелю, широко використовувалися емпіричні процедури. Під час їх застосування у комбінації з відповідним судженням (гіпотезою методу), заснованим на аналогічному минулому досвіді, ці процедури можуть дати адекватні результати. І все ж такі розрахунки мають певні важливі обмеження за рахунок їх налаштування на універсальність та через обмеженість інформації, яку вони надають щодо розподілу НДС.

Розглянемо найбільш поширені аналітичні методи моделювання процесу будівництва тунелю у 2D, що базуються на аналітичних передумовах, розглянутих вище.

«Метод зазору» («*Gap method*»). Теоретично обґрунтований метод прогнозування просадок на різних глибинах був запропонований Lee & Rowe (1990). Важливим аспектом цього підходу є введення параметру, який називається «зазор» (*Gap*), представлений як теоретична відстань між породним масивом та оправою. Цей параметр враховує втрати ґрунту як функцію міцності та поведінки деформації в пружному та пластичному стані. Було виявлено, що цей метод надає дані, які розумно узгоджуються з польовими вимірюваннями в кількох добре задокументованих випадках (Lee, 1989; Lee, Rowe, & Lo, 1992), за умови, що параметр «*Gap*» вибрано правильно.

## МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

В загальному випадку параметр «зазор» являє собою вертикальне зміщення над склепінням тунелю та є мірою втрати ґрунту внаслідок

проходки тунелю у м'яких породах. Цей параметр є функцією тривимірної пружнопластичної деформації (рис. 1).

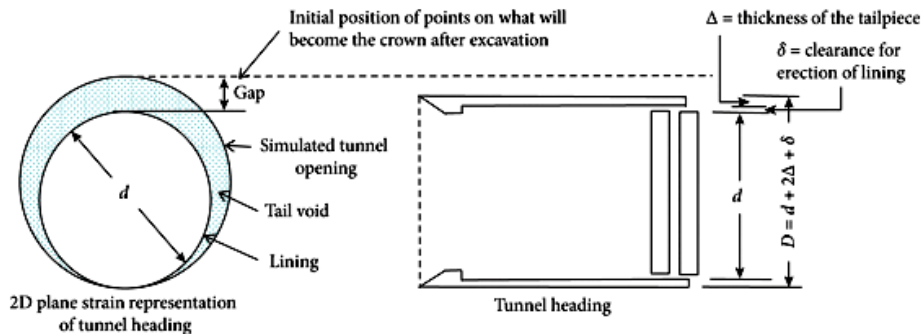


Рис. 1. Схема «Методу зазору» (рисунок з роботи Lee, Rowe, & Lo, 1992)

Згодом його можна використовувати для прогнозування результуючих деформацій ґрунту в плоскій постановці методу скінченних елементів або емпіричних кореляцій інших чисельних методів.

Після досягнення заданого значення «зазору» встановлюється оправа. Залежно від її жорсткості, можуть виникнути подальші деформації та, відповідно, втрата об'єму. Тому може статися, що оправа встановлена до того, як буде досягнуто встановлену втрату об'єму для врахування цього додаткового значення.

Під час налаштування моделі також важливо використовувати відповідні граничні умови, як для умов дальнього поля (наприклад обмеження, застосовані на краях зони сітки), так і для умов ближнього поля, пов'язаних, наприклад, з оправою. Зазвичай у простому 2D-аналізі плоскої деформації обмеження руху в умовах дальнього поля полягають у тому, що основа сітки обмежена вертикально і горизонтально, а краї обмежені горизонтально, але не вертикально.

«Метод контролю втрати об'єму» («Volume loss control method») принципово подібний до «Методу зазору», але в ньому вказується очікувана втрата об'єму в кінці будівництва (рис. 2). Це важливо, якщо втрату об'єму можна оцінити з розумним ступенем достовірності, а також може бути застосоване для зворотного аналізу спорудження тунелю (Hunar Farid Nama Ali, 2013). У цьому методі опорний тиск на межі тунелю поступово зменшується і втрату об'єму можна контролювати.

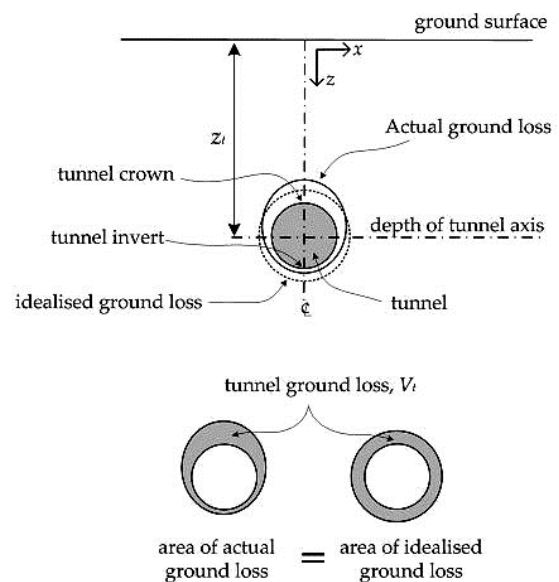


Рис. 2. Схема «Методу обмеження переміщення» (рисунок з роботи Hunar Farid Nama Ali, 2013)

«Метод обмеження переміщення» («Convergence-confinement method») є одним із методів раціонального підходу проєктування та використовує обчислення аналітичного типу. Він заснований на аналізі НДС, який відбувається в масиві навколо виробки (Carranza-Torres, & Fairhurst, 2000).

Цей метод базується на визначенні співвідношення внутрішнього тиску (радіального напруження) і радіального зміщення (в абсолютних значеннях) ( $p=|u|$ ) на межі виробки кругового окреслення. Ця залежність називається кривою обмеження переміщення (рис. 3).

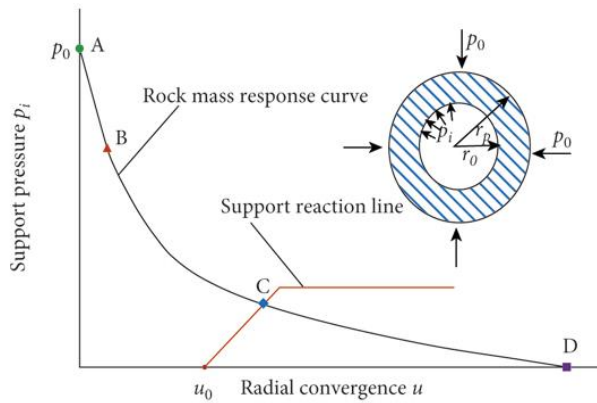


Рис. 3. Схема «Методу обмеження переміщення» (фрагмент рисунку з роботи Hongbo, Zhao, Shaojun, Li, & Bingrui Chen, 2021)

Для внутрішнього тиску, що дорівнює  $p_0$  (напруження, що викликані власною вагою масиву), початкове напруження та деформаційний стан навколо виробки не змінюються, тому радіальне зміщення стінки дорівнює нулю. Зі зменшенням внутрішнього тиску  $p$  починає проявлятися радіальне зміщення стінки. Спочатку воно зростає лінійно, а у певній точці тенденція може мати криволінійний тип.

Аналіз чисельних методів свідчить, що обидві постановки у створенні математичних моделей є майже рівнозначними. В роботах (Kuprii, Petrenko, Kuprik, & Kripak, 2019; Radkevych, Tiutkin, Kuprii, & Bielikova, 2022) успішно застосовано 2D-постановку для створення чисельної моделі ескалаторного тунелю (рис. 4).

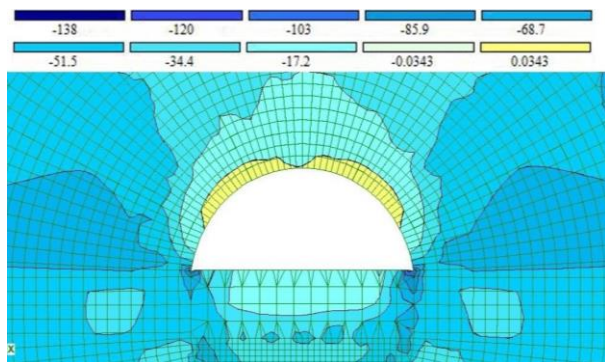


Рис. 4. Напружений стан (вертикальна компонента) в скінченно-елементній моделі калотти ескалаторного тунелю (рисунок з роботи Radkevych, Tiutkin, Kuprii, & Bielikova, 2022)

В скінченно-елементній моделі відображене багат шарове кріплення. Перший шар – набризк-бетон змінною товщиною, другий шар –

арка у вигляді двотавру. Отримані дані НДС дозволили прогнозувати подальшу роботу ескалаторного тунелю (Radkevych, Tiutkin, Kuprii, & Bielikova, 2022).

Чисельний розрахунок двох варіантів закріплення слабких ґрунтів надав результати для порівняльного аналізу НДС. Його результатом є висновок про більшу ефективність цементації при закріпленні слабких ґрунтів масиву, в якому споруджується ескалаторний тунель за допомогою NATM.

Проте, авторами проводився чисельний аналіз ескалаторного тунелю і в 3D-постановці, результати якого детально викладені в роботі (Тют'якін, 2020). Аналіз чисельного експерименту на основі 3D-моделей показує, що тривимірна структура змушує приймати інтерпретаційні рішення, які не враховані в поперечному перерізі, тобто у двовимірній моделі. Побудова 3D-моделі вимагає складного зворотного зв'язку між інтерпретацією даних і моделлю. Проте, у кращому випадку будь-яка модель 3D-модель є спрощеним поглядом на дійсність в залежності від вибору представлення, визначеного масштабом дослідження, гіпотезами про особливості описуваних геологічних об'єктів і можливостями програмного комплексу, обраного для виконання такої задачі.

Наприклад, PLAXIS 3D є дуже популярною геомеханічною програмою, у якій комплексну геометрію ґрунту і структури можна визначити в двох режимах, які спеціально призначені для моделювання масиву і конструкції (рис. 5).

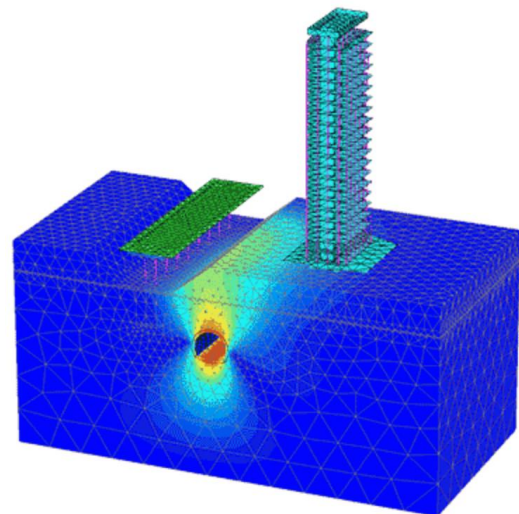


Рис. 5. Схема PLAXIS 3D (фрагмент рисунку з роботи Kolymbas, 2005)

## МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

Режим поетапних побудов дає можливість реалістичного моделювання будівництва та земляних робіт, активацію і деактивацію ґрунтових об'ємних кластерів і структурних об'єктів, застосування навантаження, зміни рівня ґрунтових вод тощо. Таким чином, PLAXIS 3D пропонує гнучку та сумісну геометрію, реалістичну симуляцію процесів будівництва, міцне та надійне ядро розрахунків, а також всебічний і детальний постпроцесерінг, що робить його

вдалим рішенням для геомеханічного проектування і аналізу.

## Результати

Для з'ясування впливу просторового фактору розроблені скінченно-елементні моделі ескалаторного тунелю в плоскій і просторовій постановках (рис. 6), причому 2D-модель товщиною 1 м повторювала умови 3D-моделі в її середній частині.

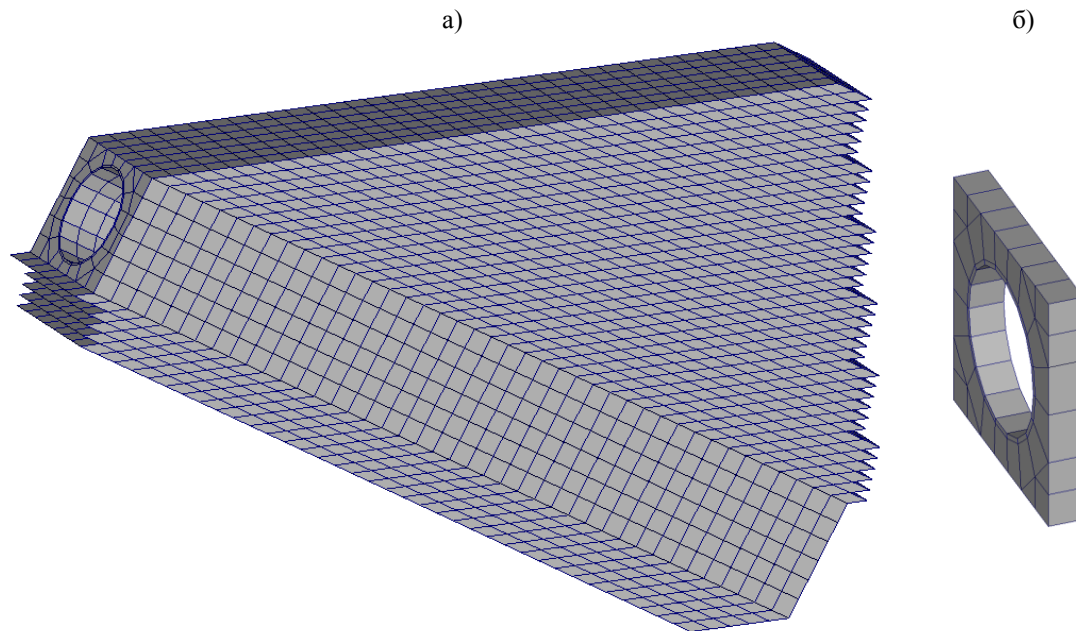


Рис. 6. Просторова (а) і плоска (б) скінченно-елементні моделі ескалаторного тунелю

Для водночас однакових і прогнозованих умов чисельного експерименту в скінченно-елементних моделях комплексу SCAD прийнято однакову оправу з чавунних тубінгів товщиною  $h=0,15$  м, а також оточуючий масив, складений важкою глиною міцністю за проф. М. М. Протод'яконовим  $f=1,1$ , питомою вагою  $\gamma=18$  кН/м<sup>3</sup> та модулем пружності  $E=35$  МПа. Не викликає сумнівів, що такий однорідний масив, складений одним видом ґрунту, є гіпотетичною ситуацією, але саме вона, а не врахування багатьох шарів реального ґрунтового масиву, як, наприклад, в умовах Дніпровського метрополітену дозволяє коректно порівнювати параметри НДС.

Також для можливості коректного порівняння умови плоскої моделі (рис. 6, б) були скориговані таким чином, щоб навантаження на неї складало таке ж саме значення, як і в просторовій (рис. 6, а).

Для цього було розраховане нормативне значення вертикального тиску в районі кільця № 20 просторової моделі, а потім прикладене в комплексі SCAD на верхню площину плоскої моделі під кутом 30° у вигляді розподіленого навантаження.

Параметри просторової моделі: вузлів – 10904, елементів – 8747 (задача середньої розмірності); в плоскій моделі вузлів і елементів значно менше (відповідно 96 та 64). Плоска модель, досліджувана в цій статті, кардинально відрізнялася від моделі в роботі Radkevych, Tiutkin, Kurpii, & Bielikova, 2022, оскільки все ж не була чисто плоскою, а мала товщину 1 м. Як свідчить аналіз, навіть наявність такої квазі-плоскої моделі дозволяє опосередковано врахувати просторовий фактор і отримати НДС, напружена компонента якого розглядається і порівнюється нижче (рис. 7).

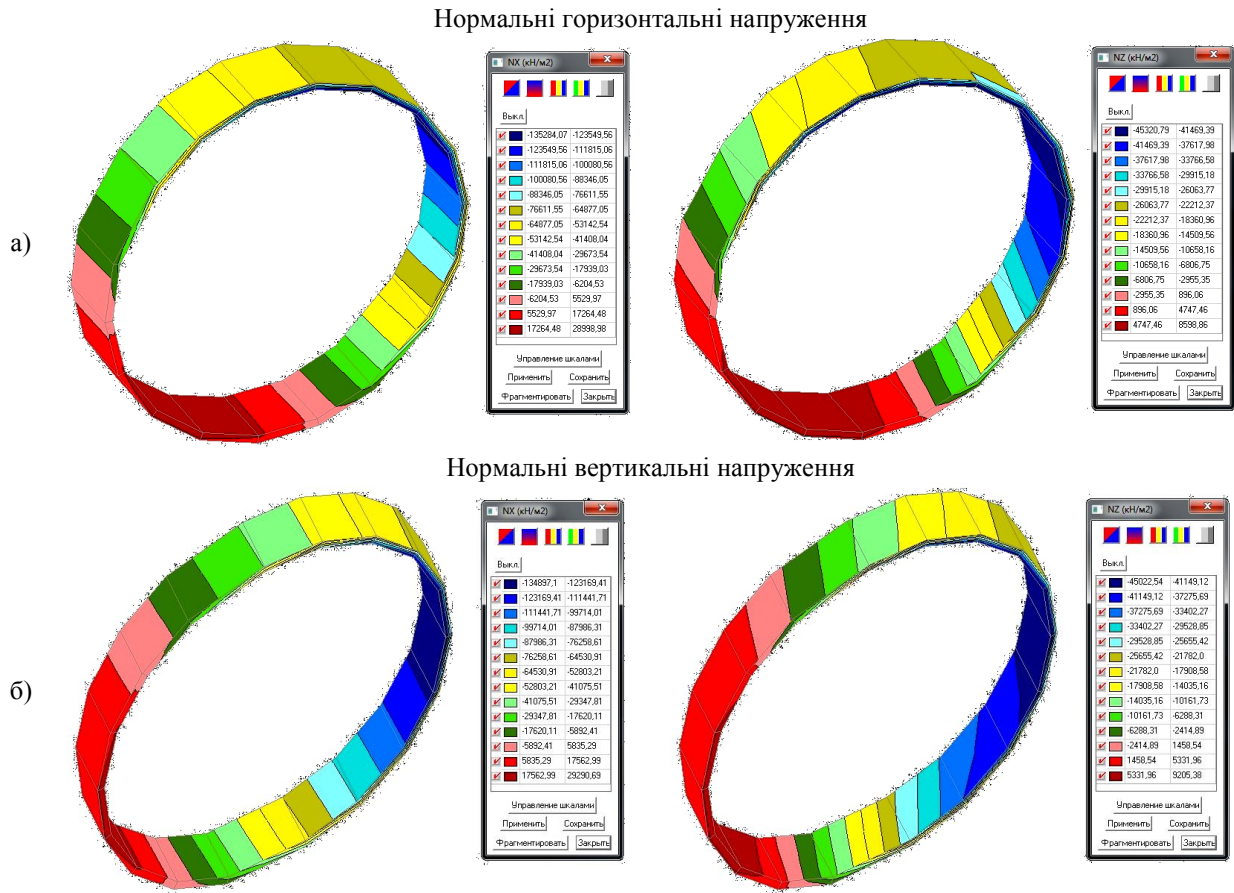


Рис. 7. Напружений стан просторової (а) і плоскої (б) скінченно-елементних моделей ескалаторного тунелю

Порівняльний аналіз напруженого стану скінченно-елементних моделей в просторовій та плоскій постановках свідчить, що максимальні від'ємні горизонтальні нормальні напруження в 2D-моделі на відміну від 3D-моделі відрізняється на 0,3 % (-135,3 МПа і -134,9 МПа відповідно), а максимальні від'ємні вертикальні нормальні напруження – на 0,67 % (-45,3 МПа і -45,0 МПа). Максимальні позитивні горизонтальні нормальні напруження в 2D-моделі на відміну від 3D-моделі відрізняється на 3,2 % (28,4 МПа і 29,3 МПа відповідно), а максимальні від'ємні вертикальні нормальні напруження відповідно на 7,2 % (85,9 МПа і 92,1 МПа).

Таким чином, можна свідчити про достатню схожість напруженого стану скінченно-елементних моделей в просторовій та плоскій постановках, відмінність між якими за рахунок третьої нормальної компоненти напружень є незначною. Тобто, застосування плоскої постановки при відповідно розробленій моделі є обґрунтованим методологічним кроком.

### Наукова новизна та практична значимість

На основі результатів проведеного обґрунтування вибору розрахункової моделі ескалаторного тунелю доведено, що застосування 2D-моделей є адекватним системі взаємодії ескалаторного тунелю з оточуючим масивом. Таке твердження засвідчене майже ідентичним розподілом напружень і деформацій в скінченно-елементних моделях в плоскій і просторовій постановках (відмінність складає максимально 3,2...7,2 %).

В ході досліджень доведено, що плоска скінченно-елементна модель ескалаторного тунелю є адекватною поставленій задачі за умови її застосування в декількох характерних перерізах ескалаторного тунелю, тобто створення низки 2D-моделей (мінімально – трьох: на початку, посередині і в нижній частині), що дозволяють врахувати її положення по довжині похилого тунелю, що розраховується.

**Висновки**

Як показує існуючий досвід проєктування тунелів NATM, методики 2D моделювання впевнено виконують задачі прогнозування і на сьогоднішній день залишаються переважаючими над технологіями 3D моделювання. Розрахунок такої системи як похилий тунель, також може відбуватися завдяки 2D моделюванню і демонструвати адекватні результати під час створення такої моделі у різних масивах та порівняння отриманих даних. Проте, 3D програмні комплекси активно розвиваються і стають в нагоді при роботі з шаруватими і неоднорідними масивами, концентруючись саме на імітації поведінки ґрунту і даючи при цьому ширшу картину його взаємодії. Тому для нестандартних ситуацій, на окремих ділянках ескалаторного тунелю доцільно звернутися до додаткових методів математичного моделювання.

**СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ**

Carranza-Torres, C., & Fairhurst, C. (2000). Application of the Convergence-Confinement Method of Tunnel Design to Rock Masses That Satisfy the Hoek-Brown Failure Criterion. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 15(2), 187-213.

Do, N., & Dias, D. (2017). A comparison of 2D and 3D numerical simulations of tunnelling in soft soils. *Environmental Earth Sciences*, 76, 1-12.

Hongbo, Zhao, Shaojun, Li, & Bingrui Chen (2021). The Reliability-Based Design Optimization of considering Rock-Support Interaction for Rock Tunnels. *Advances in Civil Engineering*, 9921881, 1-13.

Huang, Z., Zhu, W., Liang, J., Lin, J., & Jia, R. (2006). Three-dimensional numerical modelling of shield tunnel lining. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 21(3-4), 434.

Hunar Farid Hama Ali (2013). *Numerical Modeling of Tunneling Processes Effect on Buildings*. Ph. D. thesis. Nottingham: University of Nottingham.

Karakus, M. (2007). Appraising the methods accounting for 3D tunnelling effects in 2D plane strain FE analysis. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 22(1), 47-56.

Kolymbas, D. (2005). *Tunnelling and tunnel mechanics*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

Kuprii, V., Petrenko, V., Kuprik, S., & Kripak, Ye. (2019). Numerical analysis of changing the force factors in temporary lining at the tunnel construction by the NATM. *E3S Web of Conferences*, 109, 00044.

Lee, K. M. (1989). *Prediction of ground deformations resulting from shield tunnelling in soft clays: Ph. D. thesis*. The University of Western Ontario: Faculty of Engineering Science.

Lee, K. M., & Rowe, R. K. (1990). Finite element modelling of the three-dimensional ground deformations due to tunnelling in soft cohesive soils. Part 1. Methods of analysis. *Computers and Geotechnics*, 10(2), 87-110.

Lee, K. M., Rowe, R. K., & Lo, K. Y. (1992). Subsidence owing to tunnelling. I. Estimating the gap parameter. *Canadian Geotechnical Journal*, 29, 929-940.

Svoboda, T., & Mašín, D. (2011). Comparison of displacement field predicted by 2D and 3D finite element modelling of shallow NATM tunnels in clays. *Geotechnik*, 34(2), 115-126.

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, 012002.

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

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

<sup>1</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

<sup>2\*</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

## JUSTIFICATION OF THE CHOICE OF THE CALCULATION MODEL OF THE ESCALATOR TUNNEL IN FLAT AND SPATIAL SETTINGS

**Purpose.** To perform an analysis of analytical and numerical methods of mathematical modeling of an escalator tunnel. To identify the main characteristics and differences of methods based on flat or spatial settings. To justify the

choice of the calculation model of the escalator tunnel and its setting. To justify the choice of the calculation model of the escalator tunnel and its construction. **Methodology.** To achieve the goal, a number of analytical methods based on a flat (2D) setting (Gap method, Volume loss control method, Convergence-confinement method) were analyzed. Approaches in numerical methods, in particular in the method of finite elements, which have successfully applied flat setting, are considered. The spatial (3D) setting in the finite element method is also analyzed. Analysis of a numerical experiment based on 3D models shows that the three-dimensional structure forces interpretation decisions that are not taken into account in the cross-section, that is, in the two-dimensional model. **Findings.** Finite-element models of the escalator tunnel were developed in flat and spatial settings, and the 2D model with a thickness of 1 m repeated the conditions of the 3D model in its middle part. The obtained parameters of the stress-strain state were subjected to comparative analysis. It was found that the values of the norms of horizontal and vertical stresses in the fragment of the 3D model (middle) and in the 2D model differ by 3.2 and 7.2 %, respectively. **Originality.** Based on the results of the justification of the choice of the calculation model of the escalator tunnel, it was proved that the use of 2D models is adequate for the system of interaction of the escalator tunnel with the surrounding mass. This statement is evidenced by the almost identical distribution of stresses and strains in finite-element models in flat and spatial settings. **Practical value.** In the course of research, it has been proven that the flat finite-element model of the escalator tunnel is adequate for the given task, provided that it is used in several characteristic sections of the escalator tunnel, that is, the creation of a number of models in 2D, which allows considering its position along the length of the calculated tunnel.

**Keywords:** escalator tunnel; construction of a tunnel; analytical methods; finite element method; flat and spatial settings

## REFERENCES

- Carranza-Torres, C., & Fairhurst, C. (2000). Application of the Convergence-Confinement Method of Tunnel Design to Rock Masses That Satisfy the Hoek-Brown Failure Criterion. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 15(2), 187-213. (in English)
- Do, N., & Dias, D. (2017). A comparison of 2D and 3D numerical simulations of tunnelling in soft soils. *Environmental Earth Sciences*, 76, 1-12. (in English)
- Hongbo, Zhao, Shaojun, Li, & Bingrui Chen (2021). The Reliability-Based Design Optimization of considering Rock-Support Interaction for Rock Tunnels. *Advances in Civil Engineering*, 9921881, 1-13. (in English)
- Huang, Z., Zhu, W., Liang, J., Lin, J., & Jia, R. (2006). Three-dimensional numerical modelling of shield tunnel lining. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 21(3-4), 434. (in English)
- Hunar Farid Hama Ali (2013). *Numerical Modeling of Tunneling Processes Effect on Buildings. Ph. D. thesis.* Nottingham: University of Nottingham. (in English)
- Karakus, M. (2007). Appraising the methods accounting for 3D tunnelling effects in 2D plane strain FE analysis. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 22(1), 47-56. (in English)
- Kolymbas, D. (2005). *Tunnelling and tunnel mechanics.* Springer-Verlag Berlin Heidelberg. (in English)
- Kuprii, V., Petrenko, V., Kuprik, S., & Kripak, Ye. (2019). *Numerical analysis of changing the force factors in temporary lining at the tunnel construction by the NATM.* E3S Web of Conferences, 109, 00044. (in English)
- Lee, K. M. (1989). *Prediction of ground deformations resulting from shield tunnelling in soft clays: Ph. D. thesis.* The University of Western Ontario: Faculty of Engineering Science. (in English)
- Lee, K. M., & Rowe, R. K. (1990). Finite element modelling of the three-dimensional ground deformations due to tunnelling in soft cohesive soils. Part 1. Methods of analysis. *Computers and Geotechnics*, 10(2), 87-110. (in English)
- Lee, K. M., Rowe, R. K., & Lo, K. Y. (1992). Subsidence owing to tunnelling. I. Estimating the gap parameter. *Canadian Geotechnical Journal*, 29, 929-940. (in English)
- Svoboda, T., & Mašin, D. (2011). Comparison of displacement field predicted by 2D and 3D finite element modelling of shallow NATM tunnels in clays. *Geotechnik*, 34(2), 115-126. (in English)
- Radkevych, A., Tiutkin, O., Kuprii, V., & Bielikova, S. (2022). *The comparative analysis of the stress-strain state of the support of the escalator tunnel constructed in weak soils by the NATM.* IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 970, 012002. (in English)
- Tiutkin, O. L. (2020). *Teoretychni osnovy kompleksnoho analizu tunelnykh konstruktii.* Dnipro: Zhurfond. (in Ukrainian)

Надійшла до редколегії 27.02.2023.

Прийнята до друку 09.05.2023.