

УДК 624.191.8.042:519.6

О. Л. ТЮТКІН^{1*}, І. В. ДЕМЧЕНКО²

^{1*}Каф. «Транспортна інфраструктура», Український державний університет науки і технологій, ННІ ДІІТ, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (066) 290 45 18, ел. пошта o.l.tiutkin@ust.edu.ua, ORCID 0000-0003-4921-4758

²Каф. «Транспортна інфраструктура», Український державний університет науки і технологій, ННІ ДІІТ, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (063) 422 21 99, ел. пошта igord8411@gmail.com, ORCID 0009-0000-5385-9503

Чисельний аналіз напружено-деформованого стану двох незакріплених взаємовпливних виробок колового окреслення

Мета. Автори ставлять за мету провести чисельний аналіз напружено-деформованого стану двох незакріплених взаємовпливних виробок колового окреслення, і визначити зміну напружень та деформацій скінченноелементних моделей залежно від відстані між виробками. **Методика.** Проаналізовано аналітичний та чисельний підходи до розв’язання задачі напружено-деформованого стану двох незакріплених взаємовпливних виробок колового окреслення. У рамках аналітичного підходу розглянуто дві гіпотези виникнення взаємного впливу, що базуються на теоретичних засадах геомеханіки, однак не мають ґрунтового узагальнення. На відміну від аналітичних методів, більш плідним підходом до поставленої задачі можна вважати застосування чисельних методів, зокрема методу скінченних елементів. За допомогою розрахункового професійного комплексу Structure CAD розроблено три скінченноелементні моделі двох незакріплених виробок колового окреслення з відстанню між ними, що складає один, три та п’ять діаметрів. **Результати.** Виконано аналіз компонент переміщень та нормальних напружень по горизонтальній та вертикальній осях для різних відстаней між двома незакріпленими виробками, що складають від одного до п’яти діаметрів. Причому для порівняння напружень розглянутих випадків також розраховано поодинокі виробки, напружено-деформований стан якої вважаємо в цьому дослідженні еталонним. З’ясовано, що ізополі напружень по горизонтальній осі на відстані одного діаметра (D) між виробками вирости в 1,2...1,3 рази порівняно з поодиноким виробком, що свідчить про явно виражений взаємний вплив. **Наукова новизна.** На основі аналізу отриманих результатів проведено оцінку зміни напружень та переміщень двох незакріплених взаємовпливних виробок колового окреслення для різних варіантів відстаней між ними. **Практична значимість.** Розроблено пропозиції щодо розташування двох незакріплених виробок колового окреслення з таким розрахунком, щоб вплив між ними був визначеним і контрольованим.

Ключові слова: виробка колового окреслення; взаємний вплив; напружено-деформований стан; чисельний аналіз; метод скінченних елементів

Вступ

Під час будівництва підземних об’єктів, зокрема протяжних споруд метрополітенів, виникає технологічна ситуація, під час якої споруджують дві виробки колового окреслення [2]. Оскільки ці виробки знаходяться на певній відстані, між ними може виникнути ситуація взаємного впливу, що характеризується збільшенням напружень і переміщень і, відповідно, зміною міцності та стійкості [3].

Найпоширенішою такою ситуацією є розташування перегінних тунелів, які підходять до станції метрополітену або відходять від неї. Другим випадком взаємовпливних виробок є такий, що виникає під час спорудження станцій колонного або пілонного типів [2]. Цей випадок характеризується тим, що на деякому

етапі спорудження трисклепінчастої колонної або пілонної станції два станційні тунелі, закріплені залізобетонною або чавунною оправою, є розділеними ґрунтовим масивом, але все ж таки формують загальний напружено-деформований стан. Більш складною, але й менш розповсюдженою є ситуація будівництва та експлуатації конструкції розгалуження двох перегінних тунелів, у якій вони поєднані в єдину підземну споруду.

У рамках цього дослідження розглянуто саме паралельні виробки, розташування яких на певній відстані породжує ситуацію взаємного впливу [7, 9], тобто випадок розгалуження не розглянуто [4]. Проте і у вказаному випадку виникає загальний для двох виробок напружено-деформований стан, що викликає потребу

в його визначенні. Це пояснюється тим, що поодинокі незакріплені або закріплені виробки конкретного діаметра має визначений характер розподілу напружень і деформацій на власному контурі, а також у довколишньому масиві. Визначення напружень і деформацій у випадку незакріпленої або закріпленої виробки є класичним і закріплене в низці розв'язаних задач (наприклад, рішень Г. Ламе або Г. М. Савіна [1]), які викладено в підручниках із геомеханіки й механіки підземних споруд.

Новою ситуацією, яка потенційно можлива сьогодні в реаліях російсько-української війни, є така, що виникає під час добудови додаткової виробки, паралельної вже наявній, в умовах використання підземного простору для створення споруд подвійного призначення. Ця ситуація доволі складна в аналітичному плані, оскільки в ній поєднані умови вже наявної закріпленої виробки та виробки, яку добудовують і яка є спочатку незакріпленою, а потім такою, що отримує визначений тип оправи [4, 12]. Таку ситуацію в статті не розглядаємо, оскільки вона потребує окремого детального наукового дослідження взаємного впливу виробок різного ступеня будівництва. Однак слід відзначити, що ця задача в закордонних наукових колах є відомою і такою, що має низку аналітичних та чисельних рішень. Ця задача досить актуальна для будівництва метрополітенів в Індії та Китаї, оскільки колові виробки перегінних тунелів, що проходять паралельно (у літературі вони навіть отримали нове термінологічне визначення – *twin tunnels*) щитовими комплексами, є дуже розповсюдженими [6, 8, 11].

Мета

Основною метою наукової статті є проведення чисельного аналізу напружено-деформованого стану двох незакріплених взаємовпливних виробок колового окреслення і визначення зміни напружень та деформацій скінченно-елементних моделей залежно від відстані між виробками.

Методика

Проблема аналітичного визначення напружено-деформованого стану двох незакріплених паралельних виробок колового окреслення виникла як розвиток гіпотези професора М. М. Протод'яконова про утворення склепіння обвалення. Цю гіпотезу широко застосовують у розрахунках підземних об'єктів, вона є окремим випадком пошуку вертикального гірського тиску над вказаними виробками. Припущенням, що нормує умову утворення загального склепіння обвалення для двох виробок, була гіпотеза академіка О. М. Динника, яка полягає в тому, що воно утворюється над двома виробками в тому випадку, якщо відстань між ними менша за значення, рівне п'яти їх радіусам (два з половиною діаметри).

Ці дві гіпотези, які, як було відзначено, увійшли до підручників, проте так і залишились гіпотезами, тобто, окрім теоретичних побудов, ніяких інших досліджень та перевірок не було проведено. Однак практика будівництва підземних об'єктів свідчить про те, що ці гіпотези потребують уточнення. Проблема в тому, що згідно з гіпотезами М. М. Протод'яконова й О. М. Динника відстань між незакріпленими виробками, за якої відбувається їхній взаємний вплив, не збігається з теоретичними даними. Це призводить до того, що міцність і стійкість паралельних виробок колового окреслення, що знаходяться на певній відстані одна від одної, оцінюють неточно. Відповідно, уточнення аналітичних рішень для двох незакріплених взаємовпливних виробок колового окреслення отримане за допомогою математичного моделювання, є актуальною науковою задачею.

Відомо, що розрахункова схема двох взаємовпливних виробок і розподіл напружень за різної відстані між ними значно змінюються (рис. 1) [1, 2]. Для відстані $b \geq 1,5l$ (де l – ширина виробки; для виробки колового окреслення відповідно $l=2r=D$) взаємний вплив суміжних виробок під час визначення напружень не перевищує 10 %. При цьому концентрація на стінці виробки відповідає концентрації напружень на стінці поодинокі виробки, а на середині відстані між виробками напруження близькі до побутових напружень масиву.

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

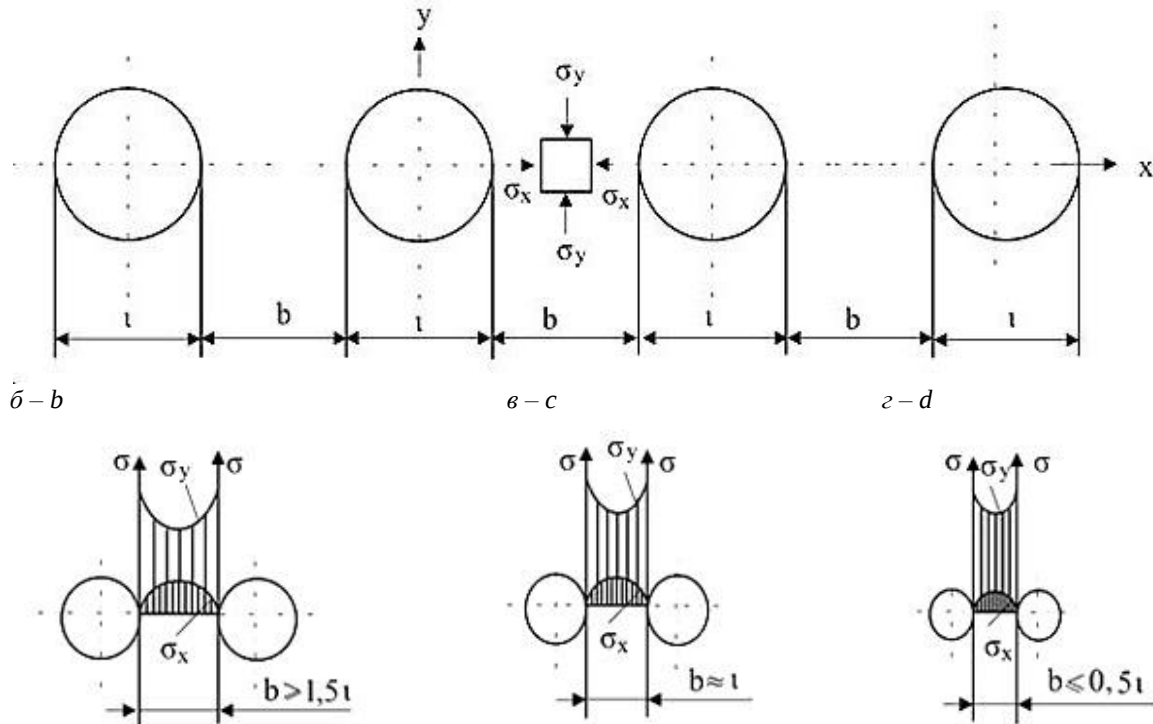
a – a

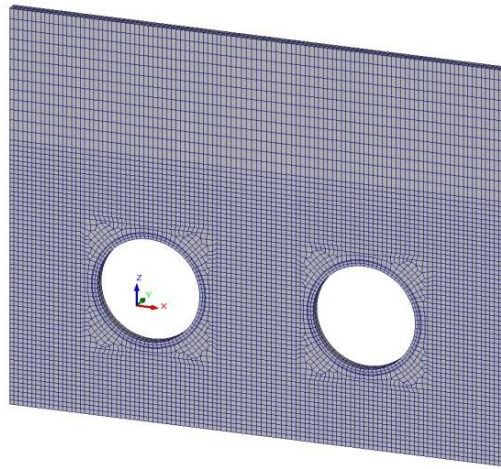
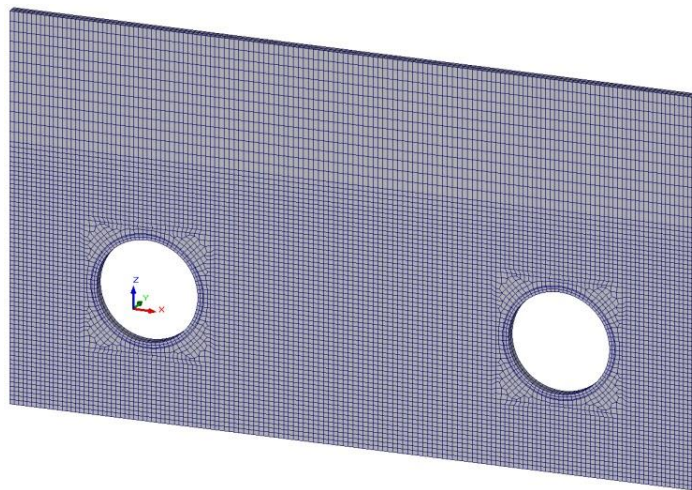
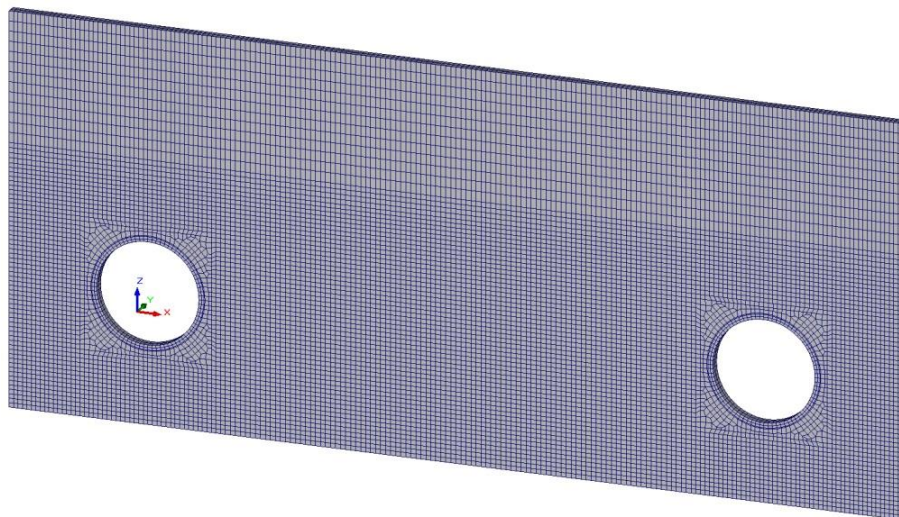
Рис. 1. Розрахункова схема двох взаємовпливних виробок (а),
і розподіл напружень за різних відстаней (б)
 $b \geq 1,5l$; в) $b \approx l$; г) $b \leq 1,5l$ між ними

Fig. 1. Calculation scheme of two mutually influencing workings (a),
and stress distribution at different distances (b)
 $b \geq 1.5l$; c) $b \approx l$; d) $b \leq 1.5l$ between them

Взаємний вплив виробок теоретично почне позначатися, коли відстань між їх контурами буде менша за три радіуси. Але існує теза, що проведення виробки викликає перерозподіл напружень у масиві в деякій обмеженій зоні і її впливом можна знехтувати вже на відстані $r = 3R$, причому похибка напружень буде складати близько 10 %, на відстані $r = 5R$ – 4 %, а $r = 10R$ – 1 % [1].

На відміну від аналітичних методів, більш плідним підходом до цієї задачі можна вважати застосування чисельних методів, зокрема метод скінченних елементів, оскільки результатами, одержаними з його допомогою, є ізолінії та ізополя параметрів напружено-деформованого

стану [5, 8, 10]. Їх легко інтерпретувати, і хоча вони є результатами конкретних випадків, побудовані залежності їх розподілу можуть надати важливу інформацію для вирішення цієї проблеми. Із вичерпною повнотою розрахунок оправ паралельних тунелів і напружено-деформований стан довколишнього масиву можна виконати за методом скінченних елементів. За допомогою розрахункового професійного комплексу Structure CAD розроблено три скінченноелементні моделі двох незакріплених виробок колового окреслення з відстанню між ними, що складає один, три та п'ять діаметрів (рис. 2).

$a - a$  $b - b$  $c - c$ Рис. 2. Скінченноеlementні моделі з відстанню між виробками, що складає D (а), $3D$ (б) і $5D$ (в)Fig. 2. Finite element models with the distance between workings constituting D (a), $3D$ (b) and $5D$ (c)

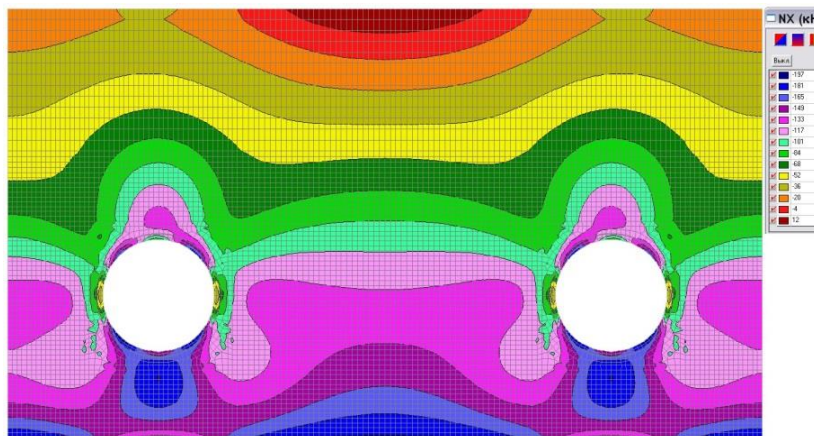
ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

Після розробки скінченноелементних моделей проведено їх розрахунок, а результати детально проаналізовано. Для економії місця

$a - a$



$b - b$



$c - c$

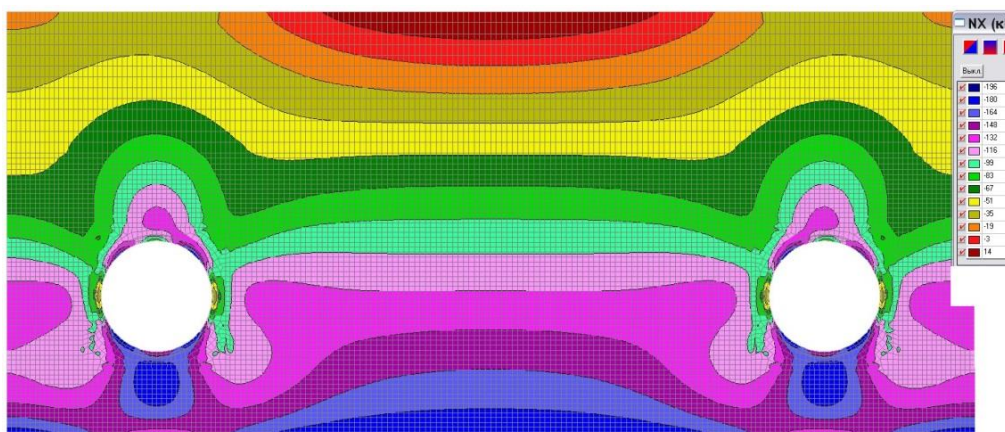


Рис. 3. Напружений стан моделей (горизонтальна компонента)
з відстанню між виробками, що складає D (а), $3D$ (б) і $5D$ (в)

Fig. 3. Stress state of models (horizontal component)
with the distance between the workings constituting D (a), $3D$ (b) and $5D$ (c)

Результати

Виконано аналіз компонент переміщень та нормальних напружень по горизонтальній та вертикальній осях за різних відстаней між двома незакріпленими виробками, що складають від одного до п'яти діаметрів. Причому для порівняння напружень розглянутих випадків також розраховано поодинокую виробку, напружено-деформований стан якої вважаємо в цьому дослідженні еталонним.

Переміщення й напруження розглянуто в п'яти точках моделі справа від вертикальної осі симетрії, оскільки зліва значення цих параметрів практично не змінюються, що свідчить про те, що взаємовплив тунелів лише локальний (рис. 4).

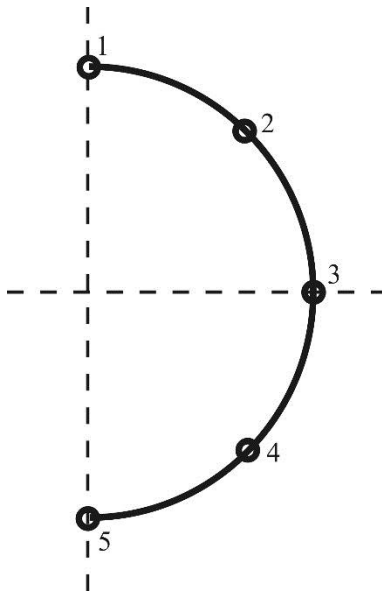


Рис. 4. Точки, у яких проведено порівняння напружень та переміщень:

- 1 – замок; 2 – 45° від вертикалі;
3 – 90° від вертикалі (на горизонтальному діаметрі);
4 – 135° від вертикалі; 5 – лоток

Fig. 4. Points at which the comparison of stresses and deformations was carried out:

- 1 – lock; 2 – 45° from the vertical;
3 – 90° from the vertical (on the horizontal diameter);
4 – 135° from the vertical; 5 – tray

Розглянуто ізополя на відстані одного діаметра (D) між виробками, причому спостерігається взаємний вплив виробок, який наочно відображає те, що ізополя мають спільну ізолінію. Ізополя мають витягнуту форму, горизон-

тальні переміщення незначні, але порівняно з поодинокую виробкою вони збільшились, що можна пояснити явним взаємним впливом виробок між собою (рис. 3, а).

Аналізуючи ізополя вертикальних переміщень по осі, також можна виявити значний вплив виробок одна на одну. Переміщення лінійно зменшуються з точки 1 (замок) до точки 5 (лоток). Ізополя мають вигляд смуг, які замикаються на виробках.

Проаналізувавши ізополя напружень по горизонтальній осі, можна зробити висновок, що на відстані одного діаметра (D) між виробками вони вирости в 1,2...1,3 раза порівняно з поодинокую виробкою. За характером ізополів напружень по вертикальній осі спостерігаємо, що виробки мають спільні ізополя напружень, які сходяться у верхніх частинах виробок. Найбільші напруження виникають у точці 3 (90°), що закономірно, оскільки точка на горизонтальному діаметрі є характерною для задачі пошуку взаємного впливу.

Аналіз ізополів на відстані трьох діаметрів ($3D$) між виробками свідчить, що їхній характер значно змінився, зони ізополів між виробками стали більшими і розтягнутими, у точці 1 (замок) та 5 (лоток) спостерігаються певні переміщення, а в точці 5 (лоток) переміщення вже не нульові і дорівнюють 1 мм. Але якщо порівняти з переміщеннями на відстані між виробками один діаметр (D), то можна побачити, що переміщення стали меншими.

Вигляд ізополів по вертикальній осі змінився, ізополя між виробками стали більш схожими на прямі смуги (рис. 3, б). Переміщення дещо зменшились, у точці 1 (замок) переміщення в 1,2 раза менші від переміщень на відстані між виробками один діаметр (D).

Вигляд ізополів напружень змінився, між виробками ізополя більш розтягнуті, у точках 2 (45°) та 4 (135°) напруження стали меншими майже в 1,2...1,3 раза. Напруження в цих точках є меншими за напруження в цих самих точках для варіанта поодинокієї виробки, що можна пояснити тим, що напруження взаємно компенсуються.

Вигляд ізополів над виробками змінився, якщо порівняти з варіантом, у якому відстань між виробками становить один діаметр (D). Ізополя по вертикальній осі стали більш розтя-

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

гнуті, напруження трохи зменшилися. Ізополе блакитного кольору дуже змінило свій вигляд порівняно з ізополем на відстані одного діаметра (D) між виробками.

Розгляд ізополів на відстані п'яти діаметрів ($5D$) між виробками свідчить, що переміщення по горизонтальній осі схожі з переміщеннями в поодинокій виробці, крім точки 4 (135°), у якій переміщення на 1 мм більші. Переміщення по вертикальній осі стали меншими, а ізополя ще більше набувають вигляду схожого на недоторканий.

Аналіз ізополів напружень по горизонтальній осі (рис. 3, в) свідчить про те, що вони мають такий самий характер, як і напруження для відстані між виробками три діаметри ($3D$), а також у точках 2 (45°) та 4 (135°) відбувається взаємна компенсація напружень.

Напруження по вертикальній осі майже не відрізняються від напружень, коли відстань між виробками становить три діаметри ($3D$), а ізополя напружень дуже схожі на напруження попереднього варіанта.

Наукова новизна та практична значимість

Отримано результати аналізу й оцінки зміни напружень та переміщень двох незакріплених взаємовпливних виробок колового окреслення для різних варіантів відстані між ними. Розроблено пропозиції щодо розташування двох незакріплених виробок колового окреслення з таким розрахунком, щоб вплив між ними був визначеним і контрольованим.

Висновки

У статті наведено результати чисельного аналізу напружено-деформованого стану двох незакріплених взаємовпливних виробок коло-

вого окреслення і визначення зміни напружень і деформацій скінченноелементних моделей залежно від відстані між виробками.

Результати отримано шляхом розрахунку трьох скінченноелементних моделей двох незакріплених виробок колового окреслення з відстанню між ними, що складає один, три і п'ять діаметрів. Аналіз отриманих результатів свідчить про те, що саме чисельний аналіз може надати змогу в подальшому отримати закономірності зміни деформацій і напружень виробок колового окреслення (незакріплених і закріплених) від відстані між ними.

Порівняння деформацій і напружень розрахункових випадків із поодинокую виробкою якісно й кількісно демонструє значний взаємний вплив між варіантами відстаней в один і три діаметри. Скінченноелементна модель із відстанню в п'ять діаметрів також виявляє взаємний вплив, однак його значення досить близьке до аналітичного в 10 %.

Проведена наукова робота потребує подальшої розробки, що запланована в двох напрямках. У рамках першого напрямку на вже розроблених моделях буде проведено параметричний аналіз напружено-деформованого стану з варіацією деформативних характеристик масиву. Це дозволить з'ясувати вплив модуля пружності у сукупності зі зміною відстані між виробками на формування загального напружено-деформованого стану.

У рамках другого напрямку, на основі отриманих результатів незакріпленого варіанта, заплановано дослідити дві закріплені виробки колового окреслення з різним типом оправи, тобто дослідити вплив модуля пружності конструкції на розподіл сукупного напружено-деформованого стану системи.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Савин Г. Н. *Концентрация напряжений около отверстий*. Киев : Наукова думка. 1968. 891 с.
2. Тютюкін О. Л. *Теоретичні основи комплексного аналізу тунельних конструкцій*. Дніпро : Журфонд. 2020. 187 с.
3. Attewell P. B., Yeates J., Selby A. R. *Soil movements induced by tunnelling and their effects on pipelines and structures*. London : Chapman & Hall. 1986. 336 p.
4. Byun G. W., Kim D. G., Lee S. D. Behavior of the ground in rectangularly crossed area due to tunnel excavation under the existing tunnel. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2006. Vol. 21. Iss. 3–4. P. 361. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tust.2005.12.178>

5. Do N. A., Dias D., Oreste P., Djeran-Maigre I. 2D numerical investigation of segmental tunnel lining behavior. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2013. Vol. 37. P. 115–127. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tust.2013.03.008>
6. Fang Q., Zhang D., Li Q., Wong L. N. Y. Effects of twin tunnels construction beneath existing shield-driven twin tunnels. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2015. Vol. 45. P. 128–137. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tust.2014.10.001>
7. Ghaboussi J., Ranken R. E. Interaction between two parallel tunnels. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*. 1977. Vol. 1. Iss. 1. P. 75–103.
8. Hage Chehade F., Shahrou I. Numerical analysis of the interaction between twin-tunnels: Influence of the relative position and construction procedure. *Tunnelling and underground space technology*. 2008. Vol. 23. Iss. 2. P. 210–214. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tust.2007.03.004>
9. Kim S.-H. Interaction behaviours between parallel tunnels in soft ground. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2004. Vol. 19. Iss. 4–5. P. 448–459.
10. Nawel B., Salah M. Numerical modeling of two parallel tunnels interaction using three-dimensional finite elements method. *Geomechanics & engineering*. 2015. Vol. 9. Iss. 6. P. 775–791. DOI: <http://doi.org/10.12989/gae.2015.9.6.775>
11. Singh C. S., Shrivastva B. K. Stability analysis of twin tunnels by finite element method. *Indian Journal of Engineering & Materials Sciences*. 2000. Vol. 2. P. 57–60.
12. Zhang D. M., Huang Z. K., Li Z. L., Zong X., Zhang D. M. Analytical solution for the response of an existing tunnel to a new tunnel excavation underneath. *Computers and Geotechnics*. 2019. Vol. 108. P. 197–211. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2018.12.026>

O. L. TIUTKIN^{1*}, I. V. DEMCHENKO²

^{1*}Dep. «Transport Infrastructure», Ukrainian State University of Science and Technologies, SEI DIIT, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (066) 290 45 18, e-mail o.l.tiutkin@ust.edu.ua, ORCID 0000-0003-4921-4758

²Dep. «Transport Infrastructure», Ukrainian State University of Science and Technologies, SEI DIIT, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (063) 422 21 99, e-mail igord8411@gmail.com, ORCID 0009-0000-5385-9503

Numerical Analysis of the Stress-Strain State of Two Unanchored Interacting Circular-Shaped Workings

Purpose. The authors aim to perform a numerical analysis of the stress-strain state of two unsupported circularly influenced workings and determine the change in stresses and strains of finite element models depending on the distance between the workings. **Methodology.** We analyze analytical and numerical approaches to solving the problem of the stress-strain state of two unsupported circularly influenced workings. Within the framework of the analytical approach, two hypotheses of the occurrence of mutual influence based on the theoretical principles of geomechanics, but without a thorough generalization, are considered. In contrast to analytical methods, a more fruitful approach to the problem can be considered the use of numerical methods, in particular the finite element method. Using the professional calculation complex Structure CAD, three finite element models of two unsupported circular workings with a distance between them of one, three, and five diameters were developed. **Findings.** The analysis of the displacement components and normal stresses along the horizontal and vertical axes for different distances between two unsupported workings ranging from one to five diameters was performed. Moreover, in order to compare the stresses of the considered cases, a single working was also calculated, the stress-strain state of which is considered in this study to be the reference state. It was found that the stress isofields along the horizontal axis at a distance of one diameter (D) between the workings increased by 1.2...1.3 times compared to a single workings, which indicates a clearly expressed mutual influence. **Originality.** Based on the analysis of the obtained results, the change in stresses and displacements of two unsupported circularly influenced workings for different options of distances between them was estimated. **Practical value.** Proposals have been developed for the location of two unsupported circular workings in such a way that the influence between them is determined and controlled.

Keywords: circular outline excavation; interaction between excavations; stress-strain state; numerical analysis; finite element method

REFERENCES

1. Savin, G. N. *Kontsentratsiya napryazheniy okolo otverstiy*. Kiev: Naukova dumka. (in Russian)
2. Tiutkin, O. L. (2020). *Teoretychni osnovy kompleksnoho analizu tunelnykh konstrukttsii*. Dnipro: Zhurfond. (in Ukrainian)
3. Attewell, P. B., Yeates, J., & Selby, A. R. (1986). *Soil movements induced by tunnelling and their effects on pipelines and structures*. London: Chapman & Hall. (in English)
4. Byun, G. W., Kim, D. G., & Lee, S. D. (2006). Behavior of the ground in rectangularly crossed area due to tunnel excavation under the existing tunnel. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 21(3–4), 361. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tust.2005.12.178> (in English)
5. Do, N.-A., Dias, D., Oreste, P., & Djeran-Maigre, I. (2013). 2D numerical investigation of segmental tunnel lining behavior. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 37, 115-127. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tust.2013.03.008> (in English)
6. Fang, Q., Zhang, D., Li, Q., & Wong, L. N. Y. (2015). Effects of twin tunnels construction beneath existing shield-driven twin tunnels. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 45, 128-137. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tust.2014.10.001> (in English)
7. Ghaboussi, J., & Ranken, R. E. (1977). Interaction between two parallel tunnels. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 1(1), 75-103. (in English)
8. Hage Chehade, F., & Shahrour, I. (2008). Numerical analysis of the interaction between twin-tunnels: Influence of the relative position and construction procedure. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 23(2), 210-214. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tust.2007.03.004> (in English)
9. Kim, S.-H. (2004). Interaction behaviours between parallel tunnels in soft ground. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 19(4-5), 448. (in English)
10. Nawel, B., & Salah, M. (2015). Numerical modeling of two parallel tunnels interaction using three-dimensional finite elements method. *Geomechanics & engineering*, 9(6), 775-791. DOI: <http://doi.org/10.12989/gae.2015.9.6.775> (in English)
11. Singh, C. S., & Shrivastva, B. K. (2000). Stability analysis of twin tunnels by finite element method. *Indian Journal of Engineering & Materials Sciences*, 2, 57-60. (in English)
12. Zhang, D. M., Huang, Z. K., Li, Z. L., Zong, X., & Zhang, D. M. (2019). Analytical solution for the response of an existing tunnel to a new tunnel excavation underneath. *Computers and Geotechnics*, 108, 197-211. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2018.12.026> (in English)

Надійшла до редколегії: 06.05.2025

Прийнята до друку: 09.09.2025