

## МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

УДК 624.196:[625.111:519.6]

В. П. КУПРІЙ<sup>1\*</sup>, О. Л. ТЮТЬКІН<sup>2</sup>, П. Є. ЗАХАРЧЕНКО<sup>3</sup>

<sup>1\*</sup> Кафедра «Мости і тунелі», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (099) 616 77 46, ел. пошта kurgiy@i.ua, ORCID 0000-0002-6517-2554

<sup>2</sup> Кафедра «Мости і тунелі», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (066) 290 45 18, ел. пошта alexeytutkin@gmail.com, ORCID 0000-0003-4921-4758

<sup>3</sup> Кафедра «Мости і тунелі», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (096) 354 34 96

### ОБґРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ДИСКРЕТИЗАЦІЇ ПРИ ЧИСЕЛЬНОМУ АНАЛІЗІ ТУНЕЛІВ НЕКОЛОВОГО ОКРЕСЛЕННЯ

**Мета.** В статті досліджено вплив на напружено-деформований стан дискретизації скінчено-елементної моделі в чисельному аналізі тунелів неколового окреслення. **Методика.** Для досягнення поставленої мети, авторами було розроблено три скінчено-елементні моделі калотної частини виробки при будівництві двокільного залізничного тунелю. В кожній з моделей в програмному комплексі «Ліра» конкретним чином було дискретизовано зону взаємодії з тимчасовим кріпленням. Після створення моделей, проводився їх чисельний аналіз із детальним дослідженням його результатів. **Результати.** Отримано значення деформацій і напружень скінчено-елементних моделей по горизонтальній і вертикальній осям, а також максимальні значення моментів і поздовжніх сил в тимчасовому кріпленні. Проведено порівняльний аналіз отриманих значень. Побудовані графіки закономірностей вказаних результатів від особливостей дискретизації двох моделей. Досліджено третю скінчено-елементну модель з радіальною розбивкою вузлів у зоні взаємодії тимчасового кріплення з оточуючим ґрунтовим масивом. **Наукова новизна.** Встановлено, що при чисельному аналізі НДС тунельної оправи неколового окреслення його результати суттєво залежать від форми, розмірів та конфігурації застосовуваних скінчених елементів, від розмірів розрахункової області ґрунтового масиву, а також від умов його закріплення (граничних умов). **Практична значимість.** Визначено особливості дискретизації та необхідні розміри розрахункової області ґрунтового масиву при моделюванні системи «оправа – ґрунтовий масив», що забезпечують достатню точність розрахунку параметрів напружено-деформованого стану оправи.

*Ключові слова:* метод скінчених елементів; тунель неколового окреслення; дискретизація; напружено-деформований стан

#### Вступ

При розрахунках тунелів широко використовуються чисельні методи, наприклад, метод скінчених елементів (МСЕ), реалізований в сучасних ПК (програмних комплексах) [1-4].

При виборі дискретної розрахункової схеми система «оправа – ґрунтовий масив» відтворюється в вигляді середовища, розбитого на скінченні елементи [5, 6, 13-15]. Процес дискретизації, тобто заміни дискретною скінчено-елементною моделлю (СЕ-моделлю) суцільного середовища, підкріпленого тунельною оправою, частіш усього проводиться за допомогою автоматичних процедур, які вбудовані в розрахункові комплекси [7-9]. Однак автоматичні програмні процеси дискретизації, наприклад,

автоматична триангуляція чи створення прямокутної СЕ-сітки має декілька варіантів, що характеризуються розміром скінченого елемента і, відповідно, їх кількістю, формою та умовами стикування тощо [6, 7, 10].

Із основ МСЕ відомо [11-12], що всі перераховані вище особливості дискретизації є суттєвими для отримання результатів чисельного аналізу, які можуть бути характеризовані як адекватні реальним умовам взаємодії в системі «оправа – ґрунтовий масив». Проте автоматичні процеси дискретизації вже сприймаються дослідниками, що застосовують програмні комплекси, як такі, що не потребують додаткового аналізу їх впливу, хоча знання впливу дискретизації конкретного комплексу є визначними для проведення аналізу на його основі.

## МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

**Мета**

Враховуючи аналіз ситуації в розрахунках тунелів, метою наданої роботи є з'ясування впливу на напружено-деформований стан (НДС) та подальше врахування дискретизації скінчено-елементної моделі в чисельному аналізі тунелів неколового окреслення.

**Методика**

Моделювання взаємодії з оточуючим ґрунтовим масивом тимчасового кріплення при будівництві двоколісного залізничного тунелю проводилося на основі ПК «Ліра» лише для калотної частини виробки. Ґрунтовий масив дискретизовано за допомогою прямокутних, універсальних чотирикутних та трикутних скінчених елементів (в СЕ-бібліотеці ПК «Ліра» – № 281, 284, 282). Тимчасове кріплення змодельоване як аркове безшарнірне з двотавру № 20 за допомогою стержневих СЕ № 10 довжиною 0,569 м (рис. 1).



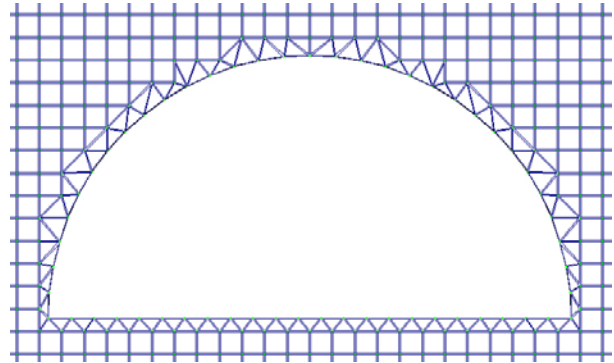
Рис. 1. Загальний вигляд моделі

Ґрунтовий масив змодельований за допомогою скінчених елементів № 281 розміром  $0,5 \times 0,5$  м. Виробка мала наступні параметри: ширина – 11,6 м, висота – 5,8 м. Модель мала розміри: ширина – 81,2 м, висота – 81 м.

Оскільки склепіння виробки має неколове окреслення, то дискретизувати ґрунтовий масив за допомогою тільки прямокутних скінчених елементів неможливо. У ПК «Ліра» дискрети-

зація ґрунтового масиву з трикутних або чотирикутних скінчених елементів в зоні взаємодії з тимчасовим кріпленням проводиться за допомогою інструменту «Створення та триангуляція контуру» (рис. 2).

а)



б)

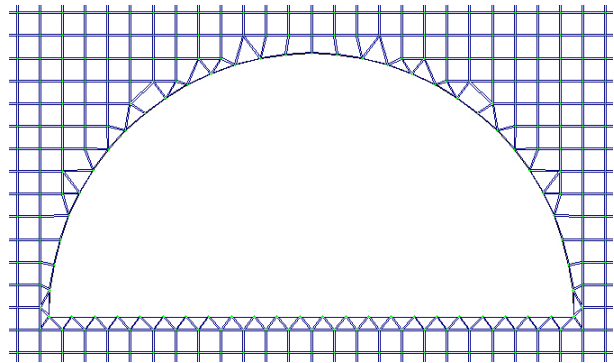


Рис. 2. Триангуляція чотирикутними скінченими елементами:

а) модель 1; б) модель 2

Розглядаємо дві моделі: модель 1 – зона взаємодії тимчасового кріплення з ґрунтовим масивом дискретизовано за допомогою СЕ № 282, модель 2 – за допомогою СЕ № 284.

Модель 2 (див. рис. 2, б) демонструє, що інструмент автоматичної триангуляції контуру в ПК «Ліра» не дає стовідсоткового моделювання чотирикутними скінченими елементами, тому необхідно вручну видаляти трикутні елементи та моделювати замість них чотирикутні.

Скінчені елементи для моделювання ґрунту мають такі характеристики: модуль деформації ґрунту по ланці первинного навантаження ( $E$ ), коефіцієнт Пуассона ( $\nu$ ), товщина ґрунтового масиву ( $H$ ), питома вага ґрунту ( $R_0$ ), граничне напруження на стиск ( $\sigma_p$ ), зчеплення ( $C$ ), граничне напруження на розтяг ( $R_t$ ), кут внутріш-

нього тертя ( $F_i$ ), коефіцієнт переходу до модуля деформації ґрунту по ланці вторинного навантаження ( $K_e$ ).

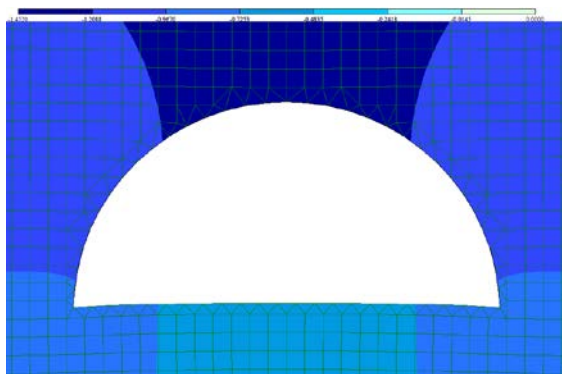
Для моделювання обрано аргіліт з коефіцієнтом міцності  $f = 2,6$ , який має такі характеристики:  $E = 4,5 \cdot 10^7$  кН/м<sup>2</sup>;  $\nu = 0,3$ ;  $H = 1$  м;  $R_0 = 25,4$  кН/м<sup>3</sup>;  $\sigma_p = 260000$  кН/м<sup>2</sup>;  $\tilde{N} = 5000$  кН/м<sup>2</sup>;  $R_t = 5000$  кН/м<sup>2</sup>;  $F_i = 30$ ;  $K_e = 1$ .

Після створення обох моделей, проводився їх чисельний аналіз із детальним дослідженням його результатів.

### Результати

В результаті розрахунку двох моделей отримані результати НДС.

а)



б)

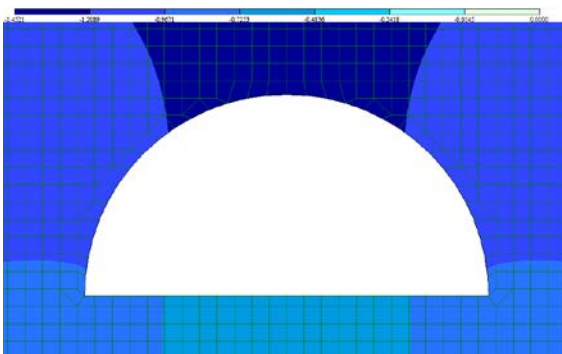


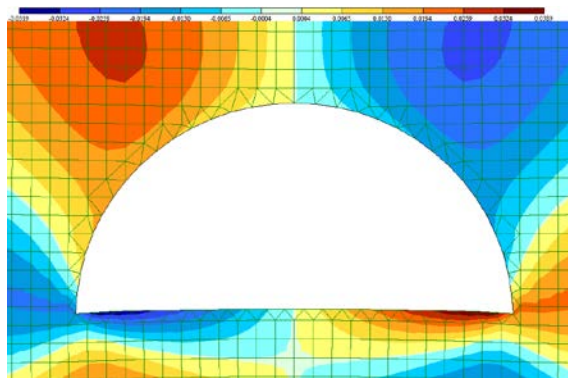
Рис. 3. Ізополя переміщень по вертикальній вісі:  
а) модель 1; б) модель 2

Ізополя переміщень по вертикальній вісі (див. рис. 3) в зоні взаємодії тимчасового кріплення з ґрунтовим масивом для моделей 1 і 2 змінюються в діапазоні від  $-1,45$  до  $0$  мм. Для моделей 1 і 2 максимальне переміщення по вертикальній вісі у склепінні має величину  $-1,270$

мм (у вузлі № 17, замок), мінімальне –  $-0,891$  мм (у вузлах № 1 та 33) для моделі 1 і  $-0,892$  мм для моделі 2.

Максимальне переміщення по вертикальній вісі у підшві має величину  $-0,824$  мм (у вузлах № 34 та 55), мінімальне –  $-0,673$  мм (у вузлах № 44 та 45) для моделі 1 і  $-0,844$  мм (у вузлах № 34 та 56), мінімальне –  $-0,673$  мм (у вузлі № 45) для моделі 2.

а)



б)

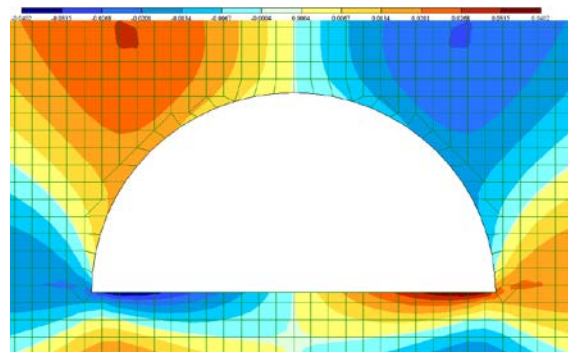


Рис. 4. Ізополя переміщень по горизонтальній вісі:  
а) модель 1; б) модель 2

Ізополя переміщень по горизонтальній вісі (див. рис. 4) в зоні взаємодії тимчасового кріплення з ґрунтовим масивом для моделі 1 змінюються в діапазоні від  $-0,0389$  до  $0,0389$  мм, для моделі 2 – від  $-0,0402$  до  $0,0402$  мм.

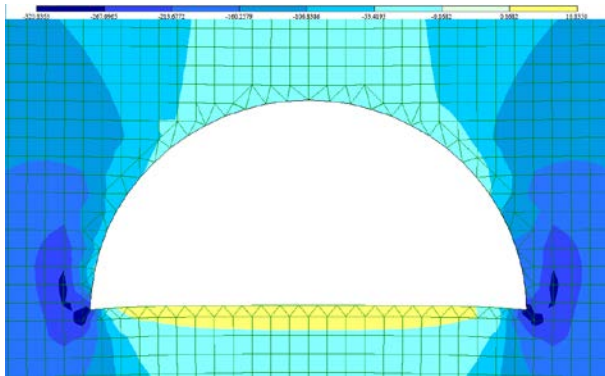
Максимальні переміщення по горизонтальній вісі у склепінні мають величину  $0,021$  та  $-0,021$  мм (у вузлах № 1 та 33), мінімальне –  $0$  мм (у вузлі № 17) для моделі 1;  $0,023$  та  $-0,023$  мм (у вузлах № 1 та 33), мінімальне –  $0$  мм (у вузлі № 17) – для моделі 2.

Напруження у ґрунтовому масиві по вертикальній вісі (рис. 5) в зоні взаємодії тимчасового кріплення з ґрунтовим масивом для моделі 1

## МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

змінюються у діапазоні від  $-320,8$  до  $16,8$  т/м<sup>2</sup>, в моделі 2 – у діапазоні від  $-281,7$  до  $-0,38$  т/м<sup>2</sup>.

а)



б)

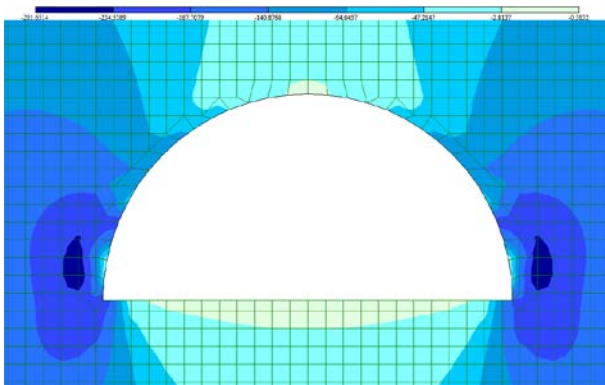


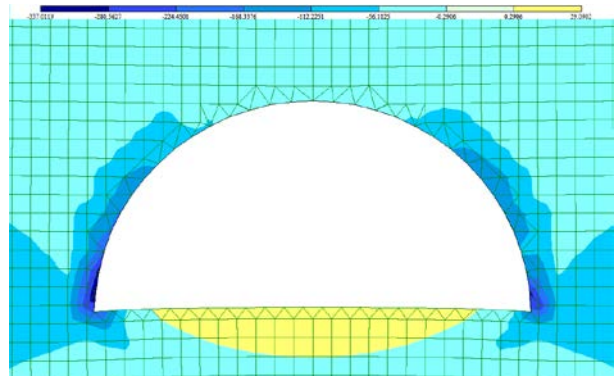
Рис. 5. Ізополя напружень по вертикальній вісі:  
а) модель 1; б) модель 2

Слід відмітити, що в моделі 1 ізополя напружень у зоні взаємодії тимчасового кріплення з ґрунтовим масивом мають несиметричне окреслення у склепінні, у підшві та у місцях концентрації напружень, а в моделі 2 ізополя навколо тимчасового кріплення у склепінні мають симетричний обрис, у місцях концентрації напружень – не симетричний обрис. У підшві, крім крайніх елементів, в моделі 2 ізополя напружень мають симетричний обрис.

Напруження у ґрунтовому масиві по горизонтальній вісі (рис. 6) в зоні взаємодії тимчасового кріплення з ґрунтовим масивом для моделі 1 змінюються у діапазоні від  $-337,0$  до  $29,1$  т/м<sup>2</sup>, для моделі 2 – у діапазоні від  $-423,137$  до  $43,0$  т/м<sup>2</sup>. Ізополя напружень для моделі 1 у зоні взаємодії тимчасового кріплення з ґрунтовим масивом мають несиметричний обрис у склепінні, у підшві та у місцях концентрації напружень, а для моделі 2 ізополя напружень у зоні взаємодії тимчасового кріплення

з оточуючим ґрунтовим масивом у склепінні мають симетричний обрис.

а)



б)

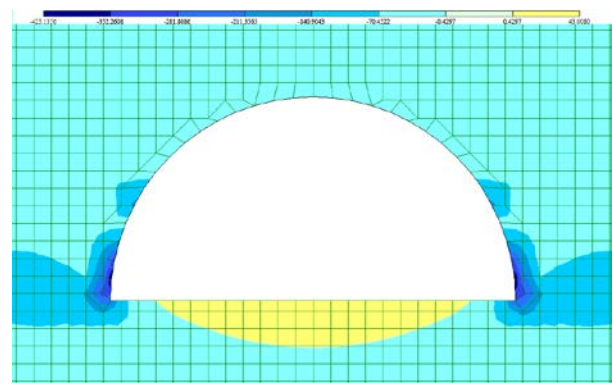


Рис. 6. Ізополя напружень по горизонтальній вісі:  
а) модель 1; б) модель 2

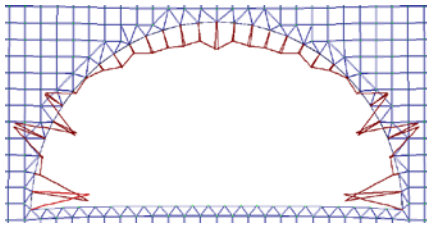
Максимальні напруження у склепінні для моделі 1:  $N_x = -421,9$  т/м<sup>2</sup> (у елементах № 33 та 64) і  $N_z = -313,1$  т/м<sup>2</sup> (у елементі № 62), мінімальні напруження –  $N_x = -5,43$  т/м<sup>2</sup> (у елементі № 62) і  $N_z = -0,51$  т/м<sup>2</sup> (у елементах № 48-49); максимальні напруження у склепінні для моделі 2:  $N_x = -480,8$  т/м<sup>2</sup> (у елементах № 33 та 64);  $N_z = -252,2$  т/м<sup>2</sup> (у елементах № 36 та 61), мінімальні напруження:  $N_x = -2,8$  т/м<sup>2</sup> (у елементах № 42 та 55);  $N_z = -1,41$  т/м<sup>2</sup> (у елементах № 48-49).

Максимальні напруження у підшві для моделі 1:  $N_x = -317,74$  т/м<sup>2</sup> (у елементі № 65) і  $N_z = -324,5$  т/м<sup>2</sup> (у елементі № 87), мінімальні напруження –  $N_x = 18,5$  т/м<sup>2</sup> (у елементі № 74) і  $N_z = 27,1$  т/м<sup>2</sup> (у елементі № 74); максимальні напруження у підшві для моделі 2:

$N_x = -296,7 \text{ т/м}^2$  (у елементах № 65 та 90);  
 $N_z = -323,6 \text{ т/м}^2$  (у елементі № 66), мінімальні  
 напруження:  $N_x = 42,9 \text{ т/м}^2$  (у елементах № 77  
 та 78);  $N_z = -0,28 \text{ т/м}^2$  (у елементі № 69).

Максимальний згинальний момент в тимчасовому кріпленні (рис. 7) має величини 0,0092 кН·м (модель 1) і 0,0278 кН·м (модель 2).

а)



б)

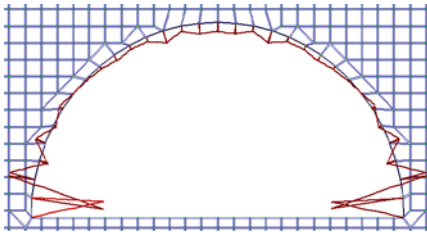
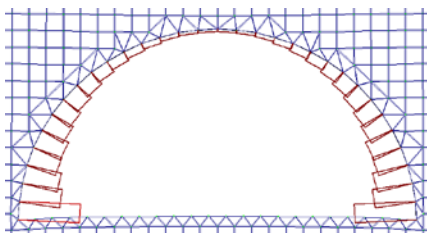


Рис. 7. Епюра моментів:  
 а) модель 1; б) модель 2

Максимальна поздовжня сила (рис. 8) має однакову величину  $-5,9 \text{ кН}$  (у елементах 1 та 32) для обох моделей.

а)



б)

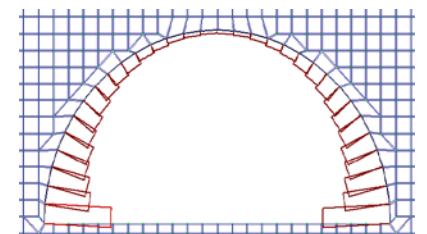


Рис. 8. Епюра поздовжніх сил:  
 а) модель 1; б) модель 2

З діаграми (рис. 9) видно, що у вузлах 3-16 переміщення відрізняються на незначну вели-

© В. П. Купрій, О. Л. Тютюкін, П. Є. Захарченко, 2017

чину, у вузлах, які знаходяться в місцях концентрації напружень (№ 1 і 2), переміщення відрізняються на величину більшу, ніж у всіх інших вузлах. Це пов'язано із особливостями роботи трикутних та універсальних чотирикутних скінчених елементів.

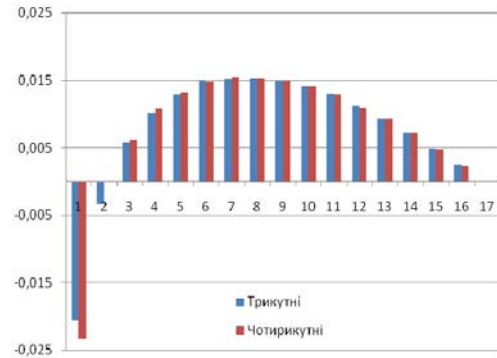
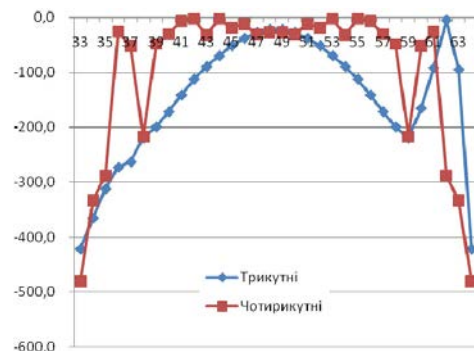


Рис. 9. Порівняльна діаграма переміщень по вісі X між моделями 1 та 2

На графіку горизонтальних і вертикальних напружень у ґрунті (рис. 10) чітко видно несиметричність у моделі 1 та різницю між напруженнями у моделях 1 та 2.

а)



б)

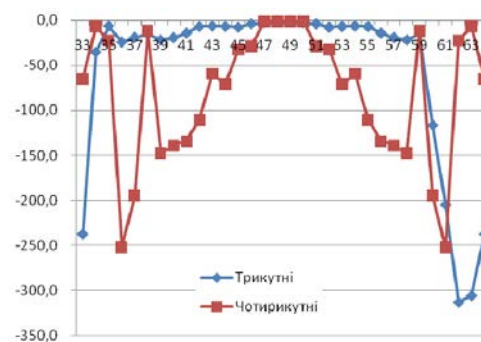


Рис. 10. Графік напружень у ґрунті по осям:  
 а) горизонтальна; б) вертикальна

## МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

Це пов'язано із особливостями роботи трикутних та універсальних чотирикутних скінченних елементів.

Найбільш показовим є порівняльний графік згинальних моментів у елементах тимчасового кріплення (рис. 11). В графіку наведено згинальні моменти, причому їх значення відрізняються через особливості роботи трикутних та універсальних чотирикутних скінченних елементів.

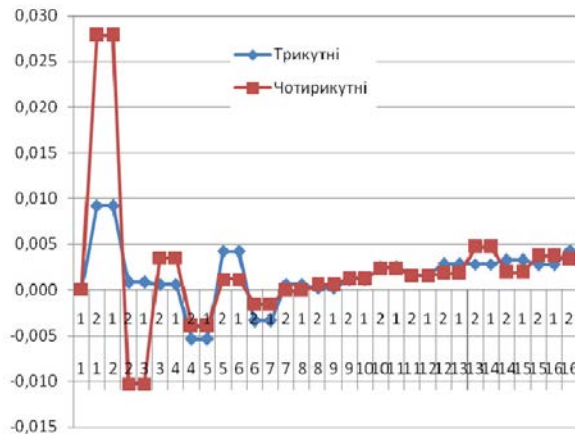


Рис. 11. Порівняльний графік значень згинального моменту у тимчасовому кріпленні

З наведених вище результатів аналізу можна зробити висновок, що універсальні трикутні скінченні елементи дають несиметричні результати, відповідно їх краще використовувати в місцях, в яких отримані напруження та переміщення не будуть впливати на результати. Це реалізується у моделі радіальною розбивкою вузлів у зоні взаємодії тимчасового кріплення з оточуючим ґрунтовим масивом.

Моделі із радіальною розбивкою вузлів в зоні взаємодії тимчасового кріплення з оточуючим ґрунтовим масивом дозволяє використовувати трикутні та універсальні чотирикутні скінченні елементи, як перехідні до прямокутних чотирикутних, в місцях, де отримані напруження не впливають на результати моделювання зони взаємодії ґрунту та тимчасового кріплення.

Така модель дозволяє отримати більш дрібну сітку вузлів у зоні взаємодії тимчасового кріплення з ґрунтовим масивом, що дозволяє отримувати більш точні результати розрахунку (рис. 12).

Не наводячи рисунків результатів моделі 3 для економії місця, наведено основні параметри

її напружено-деформованого стану.

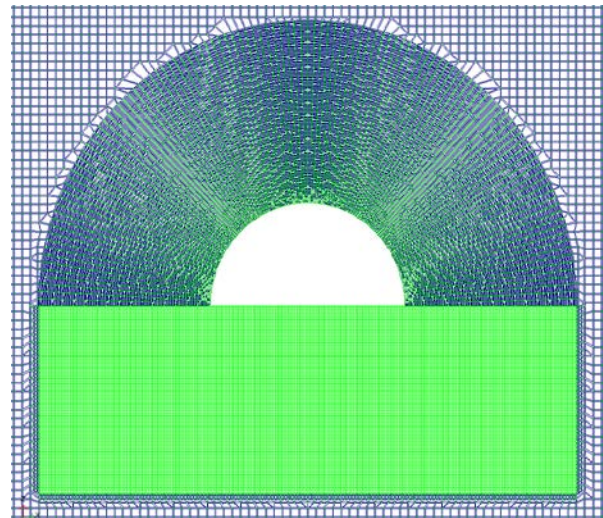


Рис. 12. Модель із радіальною розбивкою вузлів (моделі 3)

Переміщення по вісі Z змінюються в діапазоні від  $-1,45$  до  $0$  мм. Переміщення по вісі X змінюються в діапазоні від  $-0,0424$  до  $0,0424$  мм. Максимальні переміщення по вісі X у склепінні мають величину  $0,026$  та  $-0,026$  мм (у вузлах № 1 та 121), мінімальне  $-0$  мм (у вузлі № 61). Максимальне переміщення по вісі Z у склепінні має величину  $-1,27$  мм (у вузлі № 61, замковий вузол), мінімальне  $-0,898$  мм (у вузлах № 1 та 121).

Напруження у ґрунтовому масиві по вісі Z змінюються у діапазоні від  $-418,8$  до  $-0,13$  т/м<sup>2</sup>, по вісі X – у діапазоні від  $-562,9$  до  $47,9$  т/м<sup>2</sup>. Ізополя напружень у зоні взаємодії тимчасового кріплення з оточуючим ґрунтовим масивом мають симетричний обрис.

Максимальні напруження у склепінні мають величину:  $N_x = -643,4$  т/м<sup>2</sup> (у елементах № 121 та 240);  $N_z = -206,8$  т/м<sup>2</sup> (у елементах № 121 та 240). Мінімальні напруження у склепінні складають:  $N_x = -23,4$  т/м<sup>2</sup> (у елементах № 180 та 181);  $N_z = -0,13$  т/м<sup>2</sup> (у елементах № 180-181). Чисельні результати напружень у склепінні є симетрично рівними.

Максимальна поздовжня сила має величину  $-8,1$  кН (у елементах 1 та 120). Максимальний згинальний момент має величину  $0,17$  кН·м (елемент 1 та 2, 119 та 120). Зусилля симетрично рівні.

### Наукова новизна та практична значимість

Наукова новизна отриманих результатів полягає у встановленні того факту, що при чисельному аналізі НДС тунельної оправи неколового окреслення його результати (напруження та переміщення елементів оправи тунелю, зусилля в тимчасовій оправі) суттєво залежать від форми, розмірів та конфігурації застосовуваних СЕ, від розмірів розрахункової області ґрунтового масиву, а також від умов закріплення ґрунтового масиву (граничних умов).

Практичну значимість отримано при визначенні особливостей дискретизації та необхідних розмірів розрахункової області ґрунтового масиву при моделюванні системи «оправа – ґрунтовий масив», що забезпечують достатню точність розрахунку параметрів напружено-деформованого стану оправи.

### Висновки

Результати проведеного дослідження свідчать про те, що навіть відомі та вже автоматизовані процеси програмних комплексів, наприклад, такі як дискретизація розрахункової області, не можна вважати остаточними. Безсумнівно те, що чисельний аналіз на основі методу скінченних елементів є не стовідсотково формалізованим процесом, і деякі його процедури потребують наукового обґрунтування в кожному конкретному випадку. В розглянутій конструкції неколового окреслення, для якої було створено три моделі із різним типом дискретизації, доведено, що її вплив є надто важливим при отриманні адекватних реальності результатам, і їм неможна нехтувати.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Городецкий, А. С. Метод конечных элементов в проектировании транспортных сооружений [Текст] / А. С. Городецкий, В. И. Заворицкий, А. И. Лантух-Лященко, А. О. Рассказов. – Москва : Транспорт, 1981. – 143 с.
2. Фадеев, А. Б. Метод конечных элементов в геомеханике [Текст] / А. Б. Фадеев. – Москва : Недра, 1989. – 260 с.
3. Немчинов, Ю. И. Метод пространственных конечных элементов [Текст] / Ю. И. Немчинов. – Киев : НИИСК, 1995. – 368 с.
4. Перельмутер, А. В. Расчетные модели сооружений и возможность их анализа [Текст] /

- А. В. Перельмутер, В. И. Сливкер. – Киев : Сталь, 2002. – 600 с.
5. Петренко, В. Д. Обзор аналитических и экспериментальных методов исследования взаимодействия массива и крепи [Текст] / В. Д. Петренко, А. Л. Тютюкин, В. И. Петренко // Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика. – 2012. – Вип. 1. – С. 75-81.
  6. Купрій, В. П. Моделювання сумісної роботи конструкції кріплення котловану та ґрунту з застосуванням методу скінчених елементів (МСЕ) [Текст] / В. П. Купрій, Є. Ю. Кулаженко, А. С. Гудкова // Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика. – 2015. – Вип. 7. – С. 19-26.
  7. Петренко, В. Д. К вопросу о дискретизации конечно-элементных моделей [Текст] / В. Д. Петренко, А. Л. Тютюкин // Строительство. Материаловедение. Машиностроение. – 2002. – Вып. 18. – С. 123-128.
  8. Тютюкін, О. Л. Практичні основи створення моделі станції метрополітену методом автоматичної триангуляції [Текст] / О. Л. Тютюкін, Т. А. Педосенко // Тези 75 Міжнар. наук.-техн. конференції «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту». – Дніпропетровськ, ДНУЗТ, 2015. – С. 285-286.
  9. Тютюкін, О. Л. Автоматична триангуляція для вирішення задач пошуку НДС взаємовпливаючих виробок [Текст] / О. Л. Тютюкін, В. М. Бізяєв // Тези 76 Міжнар. наук.-техн. конференції «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту». – Дніпропетровськ, ДНУЗТ, 2016. – С. 169-170.
  10. Купрій, В. П. Оптимізація режиму роботи тимчасового кріплення під час будівництва гірничого тунелю [Текст] / В. П. Купрій, Є. В. Сьомкіна // Тези 76 Міжнар. наук.-техн. конференції «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту». – Дніпропетровськ, ДНУЗТ, 2016. – С. 199-201.
  11. Зенкевич, О. Метод конечных элементов в технике [Текст] / О. Зенкевич. – Москва : Мир, 1975. – 542 с.
  12. Рикардс, Р. Б. Метод конечных элементов в теории оболочек и пластин [Текст] / Р. Б. Рикардс. – Рига : Зинатне, 1988. – 284 с.
  13. Cheon, D. S. Numerical analysis of geotechnical parameters on subsidence due to underground mining / D. S. Cheon, S. O. Choi, Y. S. Jeon, C. Ryu. – Underground Space Use: Analysis of the Past and Lessons for the Future, Erdem & Solak, 2005. – London : Taylor & Francis Group, 2005. – pp. 245-251.
  14. Irons, B. M. The superpatch theorem and other proposition relating to the patch tests / B. M. Irons

## МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

- // Proc. of the 5<sup>th</sup> Canadian Congress of Applied Mechanics, Fredericton, 1975. – pp. 651-652.
15. Pang, C. H. Some considerations in finite element analysis of tunneling / C. H. Pang, K. Y. Yong, G. R. Dasari. – Underground Space Use: Analysis of the Past and Lessons for the Future, Erdem & Solak, 2005. – London : Taylor & Francis Group, 2005. – pp. 1149-1154.

В. П. КУПРИЙ<sup>1\*</sup>, А. Л. ТЮТЬКИН<sup>2</sup>, П. Е. ЗАХАРЧЕНКО<sup>3</sup>

<sup>1\*</sup> Кафедра «Мости и тоннели», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепр, Украина, 49010, тел. +38 (099) 616 77 46, эл. почта kypriy@i.ua, ORCID 0000-0002-6517-2554

<sup>2</sup> Кафедра «Мости и тоннели», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепр, Украина, 49010, тел. +38 (066) 290 45 18, эл. почта alexeytutkin@gmail.com, ORCID 0000-0003-4921-4758

<sup>3</sup> Кафедра «Мости и тоннели», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепр, Украина, 49010, тел. +38 (096) 354 34 96

## ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ДИСКРЕТИЗАЦИИ ПРИ ЧИСЛЕННОМ АНАЛИЗЕ ТОННЕЛЕЙ НЕКРУГОВОГО ОЧЕРТАНИЯ

**Цель.** В статье исследовано влияние на напряженно-деформированное состояние дискретизации конечно-элементной модели в численном анализе тоннелей некругового очертания. **Методика.** Для достижения поставленной цели, авторами были разработаны три конечно-элементные модели калотной части выработки при строительстве двухпутного железнодорожного тоннеля. В каждой из моделей в программном комплексе «Лира» была конкретным способом дискретизирована зона взаимодействия с временным креплением. После создания моделей, проводился их численный анализ с детальным исследованием его результатов. **Результаты.** Получены значения деформаций и напряжений конечно-элементных моделей по горизонтальной и вертикальной осям, а также максимальные значения моментов и продольных сил во временном креплении. Проведен сравнительный анализ полученных значений. Построены графики закономерностей указанных результатов от особенностей дискретизации двух моделей. Исследована третья конечно-элементная модель с радиальной разбивкой узлов в зоне взаимодействия временного крепления с окружающим грунтовым массивом. **Научная новизна.** Установлено, что при численном анализе НДС тоннельной обделки некругового очертания его результаты существенно зависят от формы, размеров и конфигурации применяемых конечных элементов, от размеров расчетной области грунтового массива, а также от условий его закрепления (пределных условий). **Практическая значимость.** Определено особенности дискретизации и необходимые размеры расчетной области грунтового массива при моделировании системы «обделка – грунтовый массив», которые обеспечивают достаточную точность расчета параметров напряженно-деформированного состояния обделки.

**Ключевые слова:** метод конечных элементов; тоннель некругового очертания; дискретизация; напряженно-деформированное состояние

V. P. KUPRIY<sup>1\*</sup>, O. L. TIUTKIN<sup>2</sup>, P. YE. ZAKHARCHENKO<sup>3</sup>

<sup>1\*</sup> Department «Bridges and Tunnels» of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, 2 Lazaryan Str., Dnepr, Ukraine, 49010, tel. +38 (099) 616 77 46, e-mail kypriy@i.ua, ORCID 0000-0002-6517-2554

<sup>2</sup> Department «Bridges and Tunnels» of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, 2 Lazaryan Str., Dnepr, Ukraine, 49010, tel. +38 (066) 290 45 18, e-mail alexeytutkin@gmail.com, ORCID 0000-0003-4921-4758

<sup>3</sup> Department «Bridges and Tunnels» of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, 2 Lazaryan Str., Dnepr, Ukraine, 49010, tel. +38 (096) 354 34 96

## GROUND OF PARAMETERS OF DISCRETISATION AT THE NUMERICAL ANALYSIS OF NON-CIRCULAR OUTLINE TUNNELS



**Purpose.** Influence on the strain-stress state of discretization of finite element model in the numerical analysis of non-circular outline tunnels is explored in the article. **Methodology.** For achievement of the put purpose, authors developed three finite element models of callote part at building of two-line railway tunnel. In each of models in a programmatic complex «Lira» was a concrete method of discretization area of cooperation with the temporal fastening. After creation of models, their numerical analysis with the detailed research of his results was conducted. **Findings.** The values of deformations and tensions of finite element models on horizontal and vertical axes, and also maximal values of moments and longitudinal forces in the temporal support are got. The comparative analysis of the got values is conducted. The graphs of conformities to the law of the indicated results from the features of discretization of two models are built. The third finite element model with the radial laying out of knots in the area of cooperation of the temporal fastening with the surrounding ground array is explored. **Originality.** It is set that at the numerical analysis of SSS of tunnel support of non-circular outline his results substantially depend on a form, sizes and configuration of the applied finite elements, from the sizes of calculation area of the ground massif, and also from the terms of his fixing (maximum terms). **Practical value.** The features of discretization and necessary sizes of calculation area of the ground massif at the design of the system are certain «support – ground massif », which provide sufficient exactness of calculation of parameters of the strain-stress state of support.

*Keywords:* finite element method; non-circular outline tunnels; discretization; strain-stress state

#### REFERENCES

1. Gorodetskiy A. S., Zavoritskiy V. I., Lantukh-Lyashchenko A. I., Rasskazov A. O. *Metod konechnykh elementov v proektirovanii transportnykh sooruzheniy* [The finite element method in the design of transport structures]. Moscow, Transport Publ., 1981. 143 p.
2. Fadeev A. B. *Metod konechnykh elementov v geomekhanike* [Finite element method in geomechanics]. Moscow, Nedra Publ., 1989. 260 p.
3. Nemchinov Yu. I. *Metod prostranstvennykh konechnykh elementov* [The method of spatial finite elements]. Kyjiv, NIISK Publ., 1995. 368 p.
4. Perelmuter A. V., Slivker V. I. *Raschetnye modeli sooruzheniy i vozmozhnost ikh analiza* [Calculation models of constructions and possibility of their analysis]. Kyjiv, Stal Publ., 2002. 600 p.
5. Petrenko V. D., Tyutkin A. L., Petrenko V. I. *Obzor analiticheskikh i eksperimentalnykh metodov issledovaniya vzaimodeystviya massiva i krepki* [Review of analytical and experimental methods of research of co-operation of massif and support]. *Mosty ta tuneli: teoriya, doslidzhennja, praktyka – Bridges and tunnels: theory, research, practice*, 2012, issue 1, pp. 75-81.
6. Kuprii V. P., Kulazhenko Ye. Yu., Hudkova A. S. *Modeliuvannia sumisnoi roboty konstruktsii kriplennia kotlovanu ta gruntu z zastosuvanniam metodu skinchenykh elementiv (MSE)* [Simulation of the joint operation of the foundation foundation and soil fixation using the finite element method (FEM)]. *Mosty ta tuneli: teoriya, doslidzhennja, praktyka – Bridges and tunnels: theory, research, practice*, 2015, issue 7, pp. 19-26.
7. Petrenko V. D., Tyutkin A. L. *K voprosu o diskretizatsii konechno-elementnykh modeley* [On the question of discretization of finite element models]. *Stroitelstvo. Materialovedenie. Mashinostroenie – Construction. Materials Science. Mechanical engineering*, 2002, issue 18, pp. 123-128.
8. Tiutkin O. L., Pedosenko T. A. *Praktychni osnovy stvorennia modeli stantsii metropolitenu metodom avtomatichnoi trianhuliatsii* [Practical bases for creating a model of a subway station by the method of automatic triangulation]. *Tezy 75 Mizhnar. nauk.-tekhn. konferentsii «Problemy ta perspektyvy rozvytku zaliznychnoho transportu»* [Abstracts 75 International Sci.-Tech. Conference «Problems and Prospects for the Development of Railway Transport»]. Dnipropetrovsk, 2015, pp. 285-286.
9. Tiutkin O. L., Biziaiev V. M. *Avtomatychna trianhuliatsiia dlia vyrishennia zadach poshuku NDS vzaiemovplyvaiuchykh vyrobok* [Automatic triangulation for solving search problems for VAT interfacing workings]. *Tezy 76 Mizhnar. nauk.-tekhn. konferentsii «Problemy ta perspektyvy rozvytku zaliznychnoho transportu»* [Abstracts 76 International Sci.-Tech. Conference «Problems and Prospects for the Development of Railway Transport»]. Dnipropetrovsk, 2016, pp. 169-170.
10. Kuprii V. P., Somkina Ye. V. *Optymizatsiia rezhymu roboty tymchasovoho kriplennia pid chas budivnytstva hirnychoho tuneliu* [Optimization of the mode of temporary fixing during the construction of a mining tunnel]. *Tezy 76 Mizhnar. nauk.-tekhn. konferentsii «Problemy ta perspektyvy rozvytku zaliznychnoho transportu»* [Abstracts 76 International Sci.-Tech. Conference «Problems and Prospects for the Development of Railway Transport»]. Dnipropetrovsk, 2016, pp. 199-201.

## МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

11. Zenkevich O. *Metod konechnyh jelementov v tehnikе* [Finite element method in engineering]. Moscow, Mir Publ., 1975. 542 p.
12. Rikards R. B. *Metod konechnyh jelementov v teorii obolochek i plastin* [The finite element method in the theory of shells and plates]. Riga, Zinatne Publ., 1988. 284 p.
13. Cheon D. S., Choi S. O., Jeon Y. S., Ryu C. Numerical analysis of geotechnical parameters on subsidence due to underground mining. *Underground Space Use: Analysis of the Past and Lessons for the Future, Erdem & Solak*, 2005. London, Taylor & Francis Group, 2005, pp. 245-251.
14. Irons B. M. The superpatch theorem and other proposition relating to the patch tests. *Proc. of the 5<sup>th</sup> Canadian Congress of Applied Mechanics*, Fredericton, 1975, pp. 651-652.
15. Pang C. H., Yong K. Y., Dasari G. R. Some considerations in finite element analysis of tunneling. *Underground Space Use: Analysis of the Past and Lessons for the Future, Erdem & Solak*, 2005. London, Taylor & Francis Group, 2005, pp. 1149-1154.

Стаття рекомендована до публікації д.т.н., проф. М. М. Біляєвим (Україна), д.т.н., проф. Й. Й. Лучком (Україна).

Надійшла до редколегії 20.08.2017.

Прийнята до друку 25.09.2017.