

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

УДК 624.191:[622.1:519.6]

Н. К. БОНДАРЕНКО¹, О. Л. ТЮТЬКІН^{2*}

¹Каф. «Транспортна інфраструктура», Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (093) 696 14 44, ел. пошта vidpsec.mit@gmail.com, ORCID 0000-0003-0804-7500

^{2*}Каф. «Транспортна інфраструктура», Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (066) 290 45 18, ел. пошта alexeyutkin@gmail.com, ORCID 0000-0003-4921-4758

Порівняльний аналіз результатів маркшейдерських та чисельних досліджень перегінного тунелю Київського метрополітену

Мета. У роботі передбачено провести порівняльний аналіз результатів маркшейдерських та чисельних досліджень перегінного тунелю Київського метрополітену й отримати достовірність авторської системи параметричного аналізу. **Методика.** Порівняльний аналіз результатів досліджень переміщень перегінного тунелю проведено за двома етапами. На першому етапі проаналізовано переміщення оправи перегінних тунелів між станціями «Славутич» – «Осокорки», «Осокорки» – «Позняки» та «Позняки» – «Харківська», отримані в ході маркшейдерських досліджень. На другому етапі виконано чисельний аналіз методом скінчених елементів. Для цього аналізу створено моделі трьох кілець оправи. Саме ці кільця обрані тому, що в них спостерігався максимальний рівень вертикальних переміщень, спричинених впливом інженерно-геологічних умов частини Сирецько-Печерської лінії на лівому березі Дніпра. Ці умови характеризуються шаруватістю слабких та водонасичених ґрунтів (піски різної крупності та щільності, супіски, легкі суглинки та глини). Оправа реального перегінного тунелю є стандартною конструкцією, яку застосовано під час щитової проходки Київського метрополітену. У моделях відображено геометричні розміри перегінних тунелів, а також деформаційні характеристики та щільність ґрунтів шаруватого масиву. **Результати.** Автори проаналізували характеристики шаруватого масиву та максимальні переміщення тунелів частини Сирецько-Печерської лінії на лівому березі р. Дніпро. У ході чисельного аналізу отримано вертикальні переміщення моделей трьох кілець оправи. Проведено порівняльний аналіз результатів маркшейдерських та чисельних досліджень. Отриманий рівень похибки (до 15 %) між результатами маркшейдерських та чисельних досліджень доводить, що розроблені основи параметричного аналізу є достовірними. **Наукова новизна.** Уперше впроваджено теоретичні основи параметричного аналізу для реального підземного об'єкта. Авторські розробки, пов'язані зі створенням скінчено-елементних моделей на основі реальних характеристик ґрунтів шаруватого масиву, надають високий рівень близькості результатів теоретичних розробок та інструментальних маркшейдерських вимірювань. **Практична значимість.** Обґрунтовано параметри деформованого стану, що виникає в горизонтальній виробці під час щитової проходки.

Ключові слова: метрополітен; перегінний тунель; шаруватий масив; щитова проходка; порівняльний аналіз; параметричний аналіз; маркшейдерські вимірювання; метод скінчених елементів

Вступ

Освоєння підземного простору мегаполісів та розвиток пов'язаної з ним інфраструктури є важливим завданням будівництва як галузі [9]. Спорудження метрополітену – один зі способів його вирішення, однак існує низка факторів, що перешкоджають нормальній експлуатаційній роботі цього виду міського транспорту.

Відомо, що найбільш ефективним способом спорудження перегінних тунелів, які з'єднують станції метрополітену, є щитова проходка [3, 6]. Однак навіть наявність повністю підкріпленого прохідницьким щитом забою не виключає ситуації зменшення міцності та стійкості горизонтальної виробки [2, 10]. Під час спорудження перегінних тунелів за допомогою прохідницького

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

щита спостерігався негативний вплив породного шаруватого масиву, а саме поява значних вертикальних переміщень [5].

Причиною подібного розвитку деформованого стану є складна інженерно-геологічна ситуація. Наприклад, у м. Києві більша частина Сирецько-Печерської лінії метрополітену на лівому березі р. Дніпро знаходиться в межах старого русла й характеризується складним шаруватим масивом, що складений водонасиченими (піски різної крупності та щільності) та слабкими (супіски, легкі суглинки та глини) ґрунтами.

Безсумнівно, навіть однорідний масив із таких ґрунтів викликав би в оправі перегінного тунелю значні переміщення, що вимірюються десятками міліметрів [2, 3, 5]. Наявність шаруватості, яку на деяких ділянках Київського метрополітену доповнюють ґрунтові вклинювання та лінзи, ускладнює цю ситуацію, збільшуючи рівень переміщень.

Оцінити деформований стан перегінного тунелю, що залягає в шаруватому масиві, можна за допомогою чисельного аналізу [4, 7], од-

нак будь-які скінченно-елементні моделі потребують перевірки та верифікації. А їх можна провести лише за умови порівняння чисельного дослідження, що складає основи параметричного аналізу [1], та маркшейдерських вимірювань переміщень оправы перегінного тунелю.

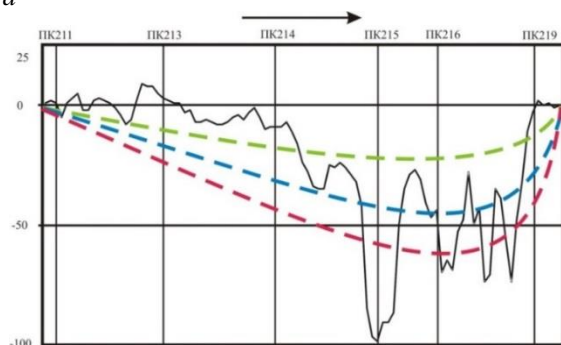
Мета

Ми ставимо за мету статті провести порівняльний аналіз результатів маркшейдерських та чисельних досліджень перегінного тунелю Київського метрополітену й отримати достовірності авторської системи параметричного аналізу на основі близькості отриманих результатів скінченно-елементного аналізу й інструментальних вимірювань.

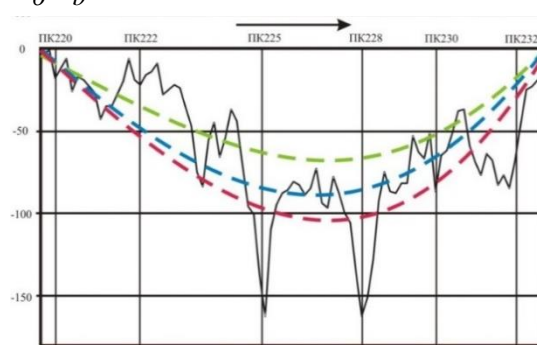
Методика

У рамках статті проаналізовано переміщення перегінних тунелів, споруджених за допомогою щитової проходки (рис. 1).

a – a



б – б



в – в

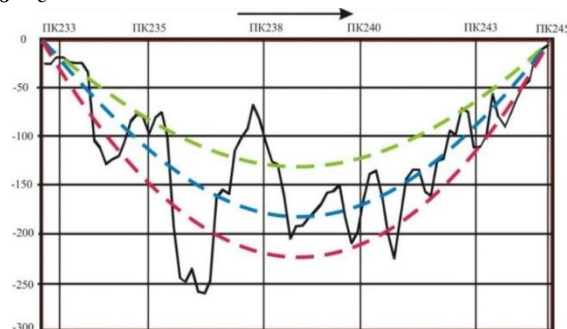


Рис. 1. Діаграми вертикальних переміщень перегінних тунелів між станціями: *a)* «Славутич» – «Осокорки»; *б)* «Осокорки» – «Позняки»; *в)* «Позняки» – «Харківська»

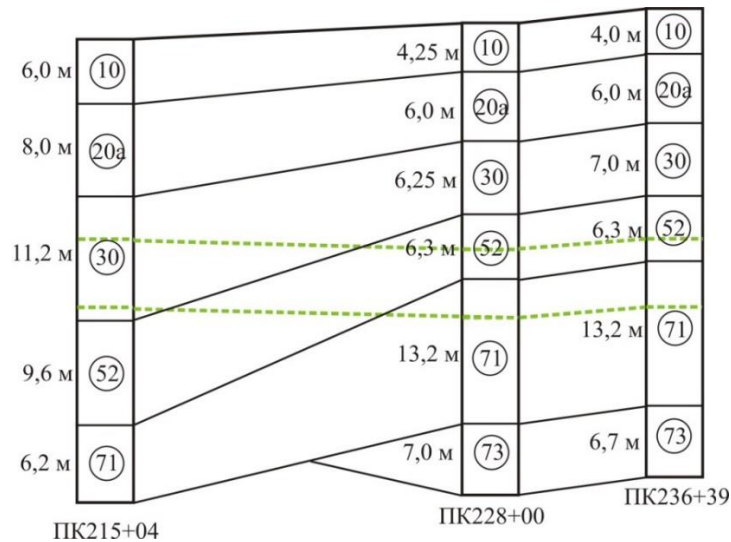
Fig. 1. Diagrams of vertical movements of running tunnels between stations: *a)* «Slavutych» – «Osokorky»; *b)* «Osokorky» – «Pozniaky»; *c)* «Pozniaky» – «Kharkivska»

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

Переміщення оправи отримано спеціалістами АТ «Київметробуд» і ДП «Укргеодезмарк» у ході маркшейдерських досліджень протягом 1995–2001 рр. Слід звернути увагу, що в плані, окрім звичайних ліній, застосовано так звані «короткі» пікети (50 і 75 м), тому на графіках переміщень по осі абсцис сітка не є рівномірною (рис. 1). На них визначено чотири рівні переміщень: чорна суцільна лінія – вертикальні переміщення, виміряні 1995 року після спорудження перегінних тунелів; зелена пунктирна лінія – вертикальні переміщення, прогнозовані під час проєктування; синя пунктирна лінія – вертикальні переміщення, притаманні інженерно-

геологічним умовам Сирецько-Печерської лінії на лівому березі (приблизний діапазон –35...–90 мм); червона пунктирна лінія – максимальні вертикальні переміщення (чорною стрілкою зверху графіка показано напрямок руху метропоїзда по перегінному тунелю).

Для порівняльного аналізу розроблено скінченно-елементні моделі трьох кілець оправи (рис. 2). У цих моделях відображено геометричні розміри перегінних тунелів між станціями «Славутич» – «Осокорки», «Осокорки» – «Позняки» та «Позняки» – «Харківська», а також деформаційні характеристики та щільність ґрунтів шаруватого масиву.



б – б

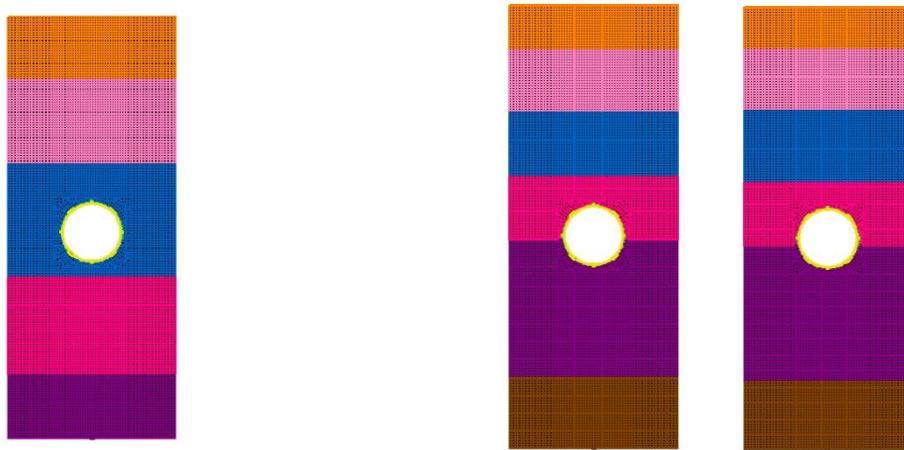


Рис. 2. Інженерно-геологічний розріз (а) (зеленою пунктирною лінією показано розташування перегінного тунелю) і карти деформаційних характеристик моделей, що йому відповідають (б)

Fig. 2. Engineering and geological section (a) (the location of the running tunnel is shown by the green dashed line) and maps of the deformation characteristics of the models corresponding to it (b)

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

Слід також зазначити, що масив, який у реальності характеризується значними нашаруваннями, дещо спрощено. Далі шари з близькими значеннями модулів пружності (у рамках діапазону $\chi=1,05\dots 1,07$) вважаємо одним шаром із середньозваженими характеристиками модуля пружності E_m (рис. 2, а). Після надання деформаційних характеристик (рис. 2, б), прикладення власної ваги та граничних умов проведено аналіз методом скінченних елементів.

Результати

Результати параметричного аналізу перегінного тунелю Київського метрополітену, основи якого викладено в [1], є підґрунтям для порівняння з інструментальними даними (вертикальні переміщення кілець).

Оправа перегінного тунелю є стандартною конструкцією, яку застосовано під час щитової проходки Київського метрополітену. Параметри оправи: матеріал трапецієподібних блоків із гумовою гідроізоляцією шириною 1,2 м – залізобетон, внутрішній діаметр – 5,1 м (габарит перегінного тунелю), зовнішній діаметр – 5,6 м, модуль пружності $E_k=32,5 \cdot 10^3$ МПа.

До подальшого аналізу взято такі кільця оправи перегінного тунелю: кільце № 1 (дільниця між станціями «Славутич» – «Осокорки», ПК215+04); кільце № 2 (дільниця між станціями «Осокорки» – «Позняки», ПК228+00); кільце № 3 (дільниця між станціями «Позняки» – «Харківська», ПК236+39).

Саме ці кільця обрано тому, що в них спостерігався максимальний рівень вертикальних переміщень, причиною чого є вплив інженерно-геологічних умов частини Сирецько-Печерської лінії на лівому березі Дніпра, що характеризується шаруватістю слабких та водонасичених ґрунтів. Аналіз цих властивостей свідчить, що інженерно-геологічні елементи (ІГЕ) мають малі деформаційні характеристики, а саме максимальний модуль пружності $E_m=45$ МПа (глина тугопластична (ІГЕ–73)) та мінімальний $E_m=10\dots 15$ МПа (якщо не брати до уваги ІГЕ–1, який не бере участі в проходці, межами діапазону є пісок дрібний гумусований (ІГЕ–10) та супісок плинний (ІГЕ–20а)). Таким чином, κ -параметр для меж визначеного діапазону модуля пружності матриці $E_m=10\dots 45$ МПа складає відповідно $\kappa=722,2\dots 3250$, і залізобетонної оправи

не вистачає, щоб протидіяти значному деформуванню ґрунтового масиву.

Значення χ -параметру для меж визначеного діапазону, що характеризує відношення між модулем пружності матриці та шару [1], перебуває в діапазоні $\chi=2,0\dots 2,33$ (до 3,0 для піску дрібного водонасиченого (ІГЕ–30) з $E_m=30$ МПа та супіску плинного (ІГЕ–20а) з $E_s=10$ МПа). Із рис. 1 зрозуміло, що вертикальні переміщення в характерних точках виробки за товщини шару навіть 0,5R для $\chi=2,0$ є такими, що призведуть до обвалення виробки $R=3,0$ м. Тому застосування щитової проходки, під час якої всі частини виробки захищені конструкцією прохідницького щита, є логічним, однак потребує обґрунтування параметрів та матеріалу оправи.

Розрахунок напружено-деформованого стану виробки з одиничним радіусом та скейлінг переміщень і напружень для радіуса $R=3,0$ м дозволяють стверджувати, що для діапазону $\kappa=1\,000\dots 3\,000$ (залізобетонна оправа, що знаходиться в ґрунтовій матриці, складеній слабкими пісками, супісками та суглинками) застосування оправи із залізобетонних блоків потребує перегляду й заміни на чавунну. Щоб проаналізувати цей розрахунковий випадок і довести правильність авторських положень параметричного аналізу, було розраховано реальні кільця оправи в реальному ґрунтовому масиві Київського метрополітену.

Аналіз деформованого стану свідчить (див. рис. 1), що в реальній ситуації будівництва та експлуатації цієї частини Сирецько-Печерської лінії спостерігаються зони надмірних переміщень, незначний відсоток вірогідності їх появи на «червоному» рівні. Так, пікові вертикальні переміщення між станціями «Славутич» – «Осокорки» відзначено на ПК215+04 (–99 мм), ПК216+20 (–70 мм), ПК217+39 (–74 мм), ПК218+20 (–74 мм); між станціями «Осокорки» – «Позняки» – два явні піки на ПК225+19 (–163 мм) й ПК228+00 (–163 мм), два піки на ПК223+20 (–84 мм) й ПК230+00 (–87 мм) та протяжна зона значного деформування між ПК230+61 (–77 мм) й ПК231+60 (–85 мм); між станціями «Позняки» – «Харківська» – на ПК236+39 (–263 мм), ПК238+80 (–205 мм), ПК239+70 (–210 мм) та ПК241+00 (–226 мм).

Оскільки результати вимірювання під час маркшейдерських досліджень наведено для

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

шелиги склепіння, то максимальні значення чисельного аналізу надаємо також для неї. Вертикальні переміщення шелиги склепіння для кільця № 1 (ПК215+04) становлять –114,49 мм, кільця № 2 (ПК228+00) – –190,61 мм, кільця № 3 (ПК236+39) – –255,07 мм. Потрібні для порівняльного аналізу результати наведено на рис. 3.

Максимальні вертикальні переміщення кільця № 2 і 3 пояснюються тим, що вони перетинають два шари ґрунту, що було досліджено раніше для випадку переходу тунелю від буча-

цьких пісків до спондилової глини [8]. Найбільш точно відображає авторську систему параметричного аналізу кільце № 1, яке майже повністю відповідає розрахунковому випадку (див. рис. 2, а). Слід підкреслити, що розглянуті розрахункові випадки дещо ускладнюються наявністю декількох шарів. Відповідно, під час порівняння вертикальних переміщень, отриманих у ході чисельного аналізу та маркшейдерських вимірювань, спостерігаються деякі похибки.

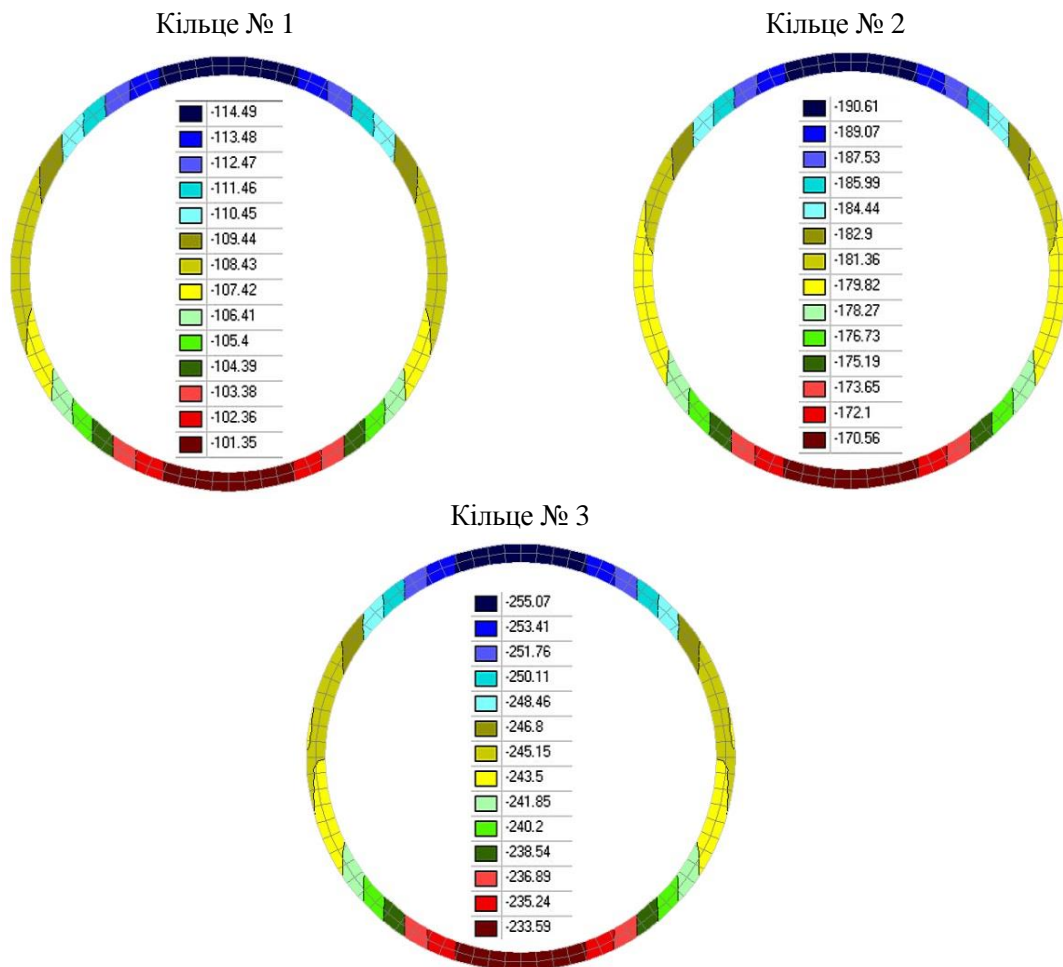


Рис. 3. Вертикальні переміщення фрагмента скінченно-елементної моделі (оправа перегінного тунелю)

Fig. 3. Vertical movements of a fragment of a finite element model (lining of running tunnel)

Для доведення достовірності авторських положень проведено порівняння вертикальних переміщень, отриманих у ході чисельного аналізу

та маркшейдерських вимірювань реальних кільць перегінного тунелю частини Сирецько-Печерської лінії (табл. 1).

Таблиця 1

Порівняння параметрів деформованого стану

Table 1

Comparison of parameters of the deformed state

Вертикальні переміщення, мм	Кільце № 1 (ПК215+04)	Кільце № 2 (ПК228+00)	Кільце № 3 (ПК236+39)
Результат чисельного аналізу	–114,5	–190,6	–255,1
Результат маркшейдерських вимірювань	–99,0	–163,0	–263,0
Похибка, %	13,5	14,5	3,0

Діапазон похибки (3,0...14,5 %) свідчить про високий ступінь адекватності розроблених теоретико-практичних положень параметричного аналізу, який дозволяє з достатньою мірою точності прогнозувати стан закріпленої горизонтальної виробки, що залягає в шаруватому масиві.

Наукова новизна та практична значимість

У рамках наукової статті вперше впроваджено теоретичні основи параметричного аналізу для реального підземного об'єкта. Авторські розробки, пов'язані зі створенням скінченно-елементних моделей на основі реальних характеристик ґрунтів шаруватого масиву, свідчать про високий рівень близькості результатів теоретичних розробок та інструментальних маркшейдерських вимірювань. Практична значимість наукового дослідження полягає в обґрунтуванні параметрів деформованого стану, що виникає в горизонтальній виробці під час щитової проходки.

Висновки

На підставі викладеного можемо зробити такі висновки:

1. Проведений аналіз маркшейдерських вимірювань частини Сирецько-Печерської лінії

Київського метрополітену на лівому березі р. Дніпро доводить, що вплив шаруватості слабких і водонасичених порід ґрунту є вирішальним для генезису деформованого стану (вертикальні переміщення в десятки та сотні міліметрів).

2. Розроблені скінченно-елементні моделі, що враховують реальні параметри оправи перегінного тунелю та характеристики ґрунтів шаруватого масиву, можуть характеризуватися як такі, що забезпечують високу точність отриманих у ході чисельного аналізу результатів.

3. Отриманий рівень похибки (до 15 %) між результатами чисельних та маркшейдерських досліджень доводить, що розроблені основи параметричного аналізу є достовірними й можуть бути запроваджені під час практичних розрахунків перегінних тунелів та інших горизонтальних виробок Київського метрополітену.

У ході подальших досліджень заплановано створити спеціалізований алгоритм, який дозволить прогнозувати деформований стан горизонтальної виробки безпосередньо під час проведення щитової проходки.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Alkhdour A., Radkevych A., Tiutkin O., Bondarenko N. The parametric analysis of the supported circular working interacting with the layered massif. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2022. Vol. 970. Iss. 012033. P. 1–7. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/970/1/012033>
2. Atkinson J. H., Potts D. M. Stability of a shallow circular tunnel in cohesionless soil. *Geotechnique*. 1977. Vol. 27. Iss. 2. P. 203–215. DOI: <https://doi.org/10.1680/geot.1977.27.2.203>

3. De Oliveira D. G. G., Thewes M., Diederichs M. S., Langmaack L. EPB tunnelling through clay-sand mixed soils: Proposed methodology for clogging evaluation. *Geomechanics and Tunneling*. 2018. Vol. 11. Iss. 4. P. 375–387. DOI: <https://doi.org/10.1002/geot.201800009>
4. Do N., Dias D., Oreste P., Djeran-Maigre I. Three-dimensional numerical simulation for mechanized tunneling in soft ground: the influence of the joint pattern. *Acta Geotechnica*. 2014. Vol. 9. Iss. 4. P. 673–694. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11440-013-0279-7>
5. Hefny A., Chua H. An investigation into the behavior of jointed tunnel lining. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2006. Vol. 21. Iss. 3–4. P. 428. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tust.2005.12.070>
6. Maidl B., Herrenknecht M., Maidl U., Wehrmeyer G. *Mechanised shield tunneling*. Berlin : Ernst & Sohn Verlag, 2012. 490 p.
7. Migliazza M. R., Chiorboli M., Giani G. P. Comparison of analytical method, 3D finite element model with experimental subsidence measurements resulting from the extension of the Milan underground. *Computers and Geotechnics*. 2009. Vol. 36. Iss. 1–2. P. 113–124. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2008.03.005>
8. Petrenko V. D., Huzchenko V. T., Tiutkin O. L., Tiutkin D. V. Analysis of deformed state structures of the Kyiv metro running tunnels on a transition zone from spondylov's clay to buchatskiy sands. *Science and Transport Progress*. 2014. Vol. 4. Iss. 52. P. 127–138. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2014/27321>
9. Pshynko O., Radkevych A., Netesa M., Netesa A. Problems of development of an underground transport infrastructure of cities. *Transport Problems*. 2020. Vol. 15. Iss. 1. P. 81–91. DOI: <https://doi.org/10.21307/tp-2020-008>
10. Yang X. L., Wang J. M. Ground movement prediction for tunnels using simplified procedure. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2011. Vol. 26. P. 462–471. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tust.2011.01.002>

N. K. BONDARENKO¹, O. L. TIUTKIN^{2*}

¹Dep. «Transport Infrastructure», Ukrainian State University of Science and Technologies, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (093) 696 14 44, e-mail vidpsec.mit@gmail.com, ORCID 0000-0003-0804-7500

^{2*}Dep. «Transport Infrastructure», Ukrainian State University of Science and Technologies, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (066) 290 45 18, e-mail alexeytutkin@gmail.com, ORCID 0000-0003-4921-4758

Comparative Analysis of the Results of Mine Surveying and Numerical Studies of the Running Tunnel of the Kyiv Metro

Purpose. The article is aimed to perform a comparative analysis of the results of mine surveying and numerical studies of the running tunnel of the Kyiv metro and obtain the reliability of the author's system of parametric analysis. **Methodology.** The comparative analysis of the results of research on the displacements of the running tunnel was carried out in two directions. In the first direction, the movement of the lining of the running tunnels between the stations «Slavutych» – «Osokorky», «Osokorky» – «Pozniaky» and «Pozniaky» – «Kharkivska» obtained in the course of mine surveying studies was analyzed. In the second direction, a numerical analysis using the finite element method was performed. For this analysis, models of three lining rings were created. These rings were chosen because the maximum level of vertical movements was observed in them. Their reason is the influence of the engineering and geological conditions of the part of the Syretsko-Pecherska line on the left bank of the Dnipro River. These conditions are characterized by the layering of weak and water-saturated soils (sands of various sizes and densities, sandy loams, light loams and clays). The lining of the real tunnel is a standard structure used for shield tunneling of the Kyiv metro. The models reflect the geometric dimensions of the running tunnels, as well as the deformation characteristics and soil density of the surrounding layered massif. **Findings.** The authors analyzed the characteristics of the layered massif and the maximum displacements of the running tunnels of the part of the Syretsko-Pecherska line on the left bank of the Dnipro River. In the course of the numerical analysis, the vertical displacements of the models of the three lining rings were obtained. A comparative analysis of the results of mine surveying and numerical studies was carried out. The obtained level of error (up to 15 %) between the results of mine surveying and numerical studies proves that the developed bases of parametric analysis are reliable. **Originality.** For the first time, the theoretical foundations of parametric analysis for a real underground object were introduced. The author's developments related to the creation of finite-element models based on the real characteristics of the soils of the layered massif provide a high level of similarity to the results of theoretical developments and instrumental

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

mine surveying measurements. **Practical value.** It consists in the substantiation of the parameters of the deformed state that occurs in the horizontal working during shield tunneling.

Keywords: metro; running tunnel; layered massif; shield tunneling; comparative analysis; parametric analysis; mine surveying measurements; finite element method

REFERENCES

1. Alkhdour, A., Radkevych, A., Tiutkin, O., & Bondarenko, N. (2022). The parametric analysis of the supported circular working interacting with the layered massif. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 970, Iss. 012033, pp. 1-7). DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/970/1/012033> (in English)
2. Atkinson, J. H., & Potts, D. M. (1977). Stability of a shallow circular tunnel in cohesionless soil. *Geotechnique*, 27(2), 203-215. DOI: <https://doi.org/10.1680/geot.1977.27.2.203> (in English)
3. De Oliveira, D. G. G., Thewes, M., Diederichs, M. S., & Langmaack, L. (2018). EPB tunnelling through clay-sand mixed soils: Proposed methodology for clogging evaluation. *Geomechanics and Tunnelling*, 11(4), 375-387. DOI: <https://doi.org/10.1002/geot.201800009> (in English)
4. Do, N., Dias, D., Oreste, P., & Djeran-Maigre, I. (2014). Three-dimensional numerical simulation for mechanized tunnelling in soft ground: the influence of the joint pattern. *Acta Geotechnica*, 9(4), 673-694. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11440-013-0279-7> (in English)
5. Hefny, A., & Chua, H. (2006). An investigation into the behavior of jointed tunnel lining. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 21(3-4), 428. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tust.2005.12.070> (in English)
6. Maidl, B., Herrenknecht, M., Maidl, U., & Wehrmeyer, G. (2012). *Mechanised shield tunneling*. Berlin : Ernst & Sohn Verlag. (in English)
7. Migliazza, M. R., Chiorboli, M., & Giani, G. P. (2009). Comparison of analytical method, 3D finite element model with experimental subsidence measurements resulting from the extension of the Milan underground. *Computers and Geotechnics*, 36(1-2), 113-124. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2008.03.005> (in English)
8. Petrenko, V. D., Huzchenko, V. T., Tiutkin, O. L., & Tiutkin, D. V. (2014). Analysis of deformed state structures of the Kyiv metro running tunnels on a transition zone from spondylov's clay to buchatskiy sands. *Science and Transport Progress*, 4(52), 127-138. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2014/27321> (in English)
9. Pshynko, O., Radkevych, A., Netesa, M., & Netesa, A. (2020). Problems of development of an underground transport infrastructure of cities. *Transport Problems*, 15(1), 81-91. DOI: <https://doi.org/10.21307/tp-2020-008> (in English)
10. Yang, X. L., & Wang, J. M. (2011). Ground movement prediction for tunnels using simplified procedure. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 26, 462-471. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tust.2011.01.002> (in English)

Надійшла до редколегії: 17.02.2022

Прийнята до друку: 15.06.2022