

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

УДК 624.191-025.49:528

О. Л. ТЮТЬКІН^{1*}, Д. О. БАННІКОВ², В. А. МІРОШНИК³, І. В. ГЕЛЕТЮК⁴

^{1*} Кафедра «Транспортна інфраструктура», Дніпровський 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

² Кафедра «Будівельне виробництво та геодезія», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (063) 400 43 07, ел. пошта bdo2020@yahoo.com, ORCID 0000-0002-9019-9679

³ Кафедра «Транспортна інфраструктура», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (097) 828 64 87, ел. пошта miroshnikvetal@gmail.com, ORCID 0000-0002-8115-0128

⁴ Представництво LІMAK, просп. Гагаріна, 7, Дніпро, Україна, 49000, тел. +38 (050) 322 48 43, ел. пошта igeletjuk@limak.com.tr

АНАЛІЗ КОМБІНОВАНОЇ КОНСТРУКЦІЇ СТВОЛА ДНІПРОВСЬКОГО МЕТРОПОЛІТЕНУ МЕТОДОМ СКІНЧЕННИХ ЕЛЕМЕНТІВ

Мета. Розвиток спорудження підземних виробок Дніпровського метрополітену потребує аналізу та наукового обґрунтування проєктних рішень, що базуються на нових для України технологіях. Метою наукової статті є аналіз комбінованої конструкції ствола Дніпровського метрополітену методом скінченних елементів із визначенням силових факторів в оболонках пальової системи та системи торкретування із подальшим обґрунтуванням на основі отриманих результатів відповідності проєктних рішень реальній ситуації будівництва Дніпровського метрополітену. **Методика.** Для аналізу ствола № 1 Дніпровського метрополітену методом скінченних елементів побудовано дві скінченно-елементних моделі. Вони відображають комбіновану конструкцію ствола, яка складається з двох частин. Окремо проаналізовано скінченно-елементну модель пальової системи, що відображає оболонку з буросічних паль, підкріплену балкою та поясами. Окремо змодельовано та проаналізовано модель для системи торкретування, яка застосовується для другої частини ствола, що залягає в міцному скельному масиві. Скінченно-елементним моделям обох систем присвоєно реальні деформаційні та геометричні параметри, а також навантаження, що стало запорукою проведення адекватних дійсності розрахунків методом скінченних елементів. **Результати.** Під час чисельного аналізу комбінованої конструкції ствола № 1 Дніпровського метрополітену визначено силові фактори (нормальні сили та згинальні моменти) для пальової системи та системи торкретування. Ці результати стали основою для проведення армування обох систем. **Наукова новизна.** Проведено чисельний аналіз конструкції ствола, який надав повну картину силових факторів, що дозволяють прогнозувати появу нормальних сил та згинальних моментів в подібних інженерно-геологічних умовах. **Практична значимість.** Результати аналізу комбінованої конструкції ствола Дніпровського метрополітену методом скінченних елементів дозволили науково обґрунтувати проєктні рішення і забезпечити високі показники експлуатації обох систем ствола № 1.

Ключові слова: метрополітен; шахтний ствол; комбінована конструкція; силові фактори; буросічні палі; торкретбетон

Вступ

З 2016 року будівництво Дніпровського метрополітену отримало друге дихання, оскільки турецька компанія LІMAK («Представництво Лімак Іншаат Санаі ве Тіджарет Анонім Шіркети») розпочала роботи із спорудження комплексу вертикальних (шахтні стволи), горизонтальних (перегінні тунелі) та похилих (ескалаторні ходи) виробок, а також трьох станцій метрополітену глибокого закладення.

Відомо, що перша пускова ділянка, яка перебуває в експлуатації з 1995 року, побудована до ПК131, на якому улаштовано ствол № 11 з класичною збірною оправою із чавуну. На ділянці маршруту від ПК131 до ПК166 були запроектовані технологічні стволи №№ 11, 12, 14, 16 також із збірною оправою. Окрім цього було розпочато спорудження вентиляційного ствола № 15 (район НТУ «Дніпровська політехніка»), яке пізніше було припинено.

Довжина даної лінії метрополітену становить близько 4 км і налічує три станції: «Театральну» (розташування в районі парку імені Лазаря Глоби), «Центральну» (розташування в районі Площі героїв Майдану) і «Музейну» (розташування в районі Дніпровського національного історичного музею імені Дмитра Яворницького і НТУ «Дніпровська політехніка»). Запланована лінія метрополітену знаходиться в межах щільно забудованої міської території, об'єкти якої в основному є архітектурними та історичними будівлями, побудованими на стрічковому фундаменті кінця XVII – початку XX століття. Глибина закладення ліній метрополітену складає 40...70 м від поверхні, перегінні тунелі залягають в скельній породі, що є раціональним для розвитку інфраструктури міста (Pshynko, Radkevych, Netesa, M., & Netesa, A., 2020).

Але, якщо горизонтальні вироби та станційні комплекси повністю залягають у міцному тріщинуватому плагіограніті, то похилі та вертикальні вироби характеризуються більш складним закладенням. Воно пояснюється доволі потужним чохлам осадових порід, що покоїться на магматичному ложі, що мало деформується. Таким чином, верхня частина ескалаторних ходів та шахтних стволів закладена в дисперсних зв'язних і незв'язних ґрунтах (піски, супіски, суглинки), а нижня частина проходить в скельному плагіогранітовому масиві.

Відповідно, конструкція ствола запроєктована як комбінована (Гарбер, 2014), кожна з частин якої відповідає реальним умовам оточуючого масиву. Перша частина закладена в слабких ґрунтах і має назву «пальова система», оскільки вона улаштована із буросічних паль. Друга («система торкретування») є основою для першої і виконується шляхом підсилення міцного скельного масиву анкерами та торкретбетоном.

Мета

Метою наукової статті є аналіз комбінованої конструкції ствола № 1 методом скінченних елементів із визначенням силових факторів в оболонках пальової системи та системи торкретування та обґрунтуванням на основі отриманих результатів відповідності проектних рішень реальній ситуації будівництва Дніпровського метрополітену.

Методика

Дослідження комбінованої конструкції ствола виконується по частинах із фрагментацією конструкції на дві системи: пальову і торкретування. Не виникає сумнівів, що пошук силових факторів в обох системах можливий в повному обсязі лише за допомогою чисельних методів (Coulthard, 1999; Bryson, & Zapata-Medina, 2010; Шейн Аунг Тун, 2012; Jia, Stace, & Williams, 2013), оскільки моделювання конструкції ствола повинно відобразити її особливості, наприклад, оболонку із буросічних паль (Zhang, & Small, 2000; Тют'якін, Мірошник, & Гелетюк, 2021).

Тому для моделювання прийнятий метод скінченних елементів, реалізований в комплексі SCAD (Карпиловский, Криксунов, Перельмутер, А. В., & al., 2000; Тют'якін, 2020). Для обох систем поперечний переріз ствола та його розміри складають в світлі 10,0 на 12,0 м (рис. 1), що дещо спрощує моделювання, яке базується на єдиному плоскому прототипі.

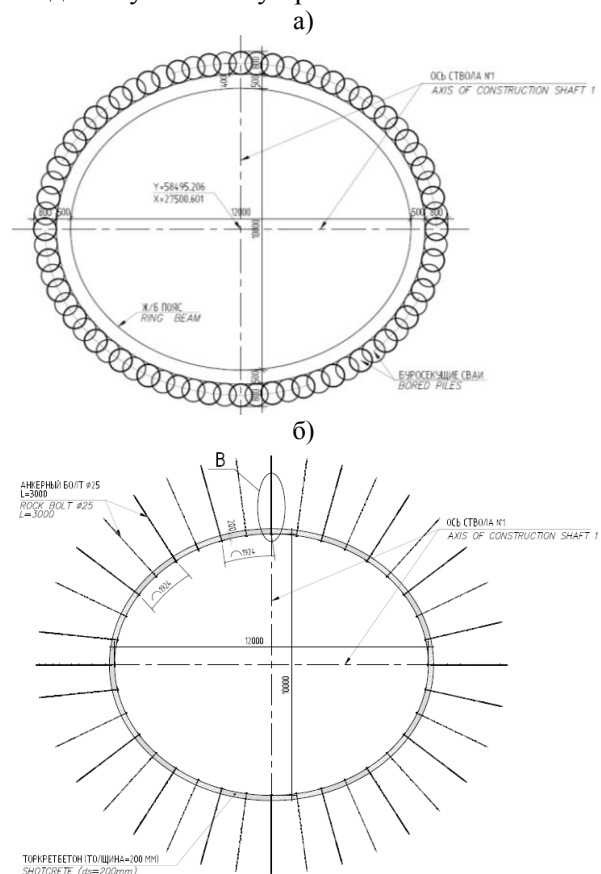


Рис. 1. Поперечний переріз ствола № 1:
а) пальова система; б) система торкретування

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

Глибина ствола № 1 від гирла до низу пальової системи – 30,8 м, глибина системи торкретування від гирла до підлоги нижньої бетонної плити системи торкретування – 24,1 м. Прийнято висоту скінченного елемента рівною 0,4 м і створено дві пластинчасті моделі оболонок двох систем будівельного ствола № 1 (рис. 2) шляхом екструзії стрижневого прототипу (Борщевский, Петренко, Тютюкин, Антонов, & Плешко, 2006; Левит, Тютюкин, & Борщевский, 2007).

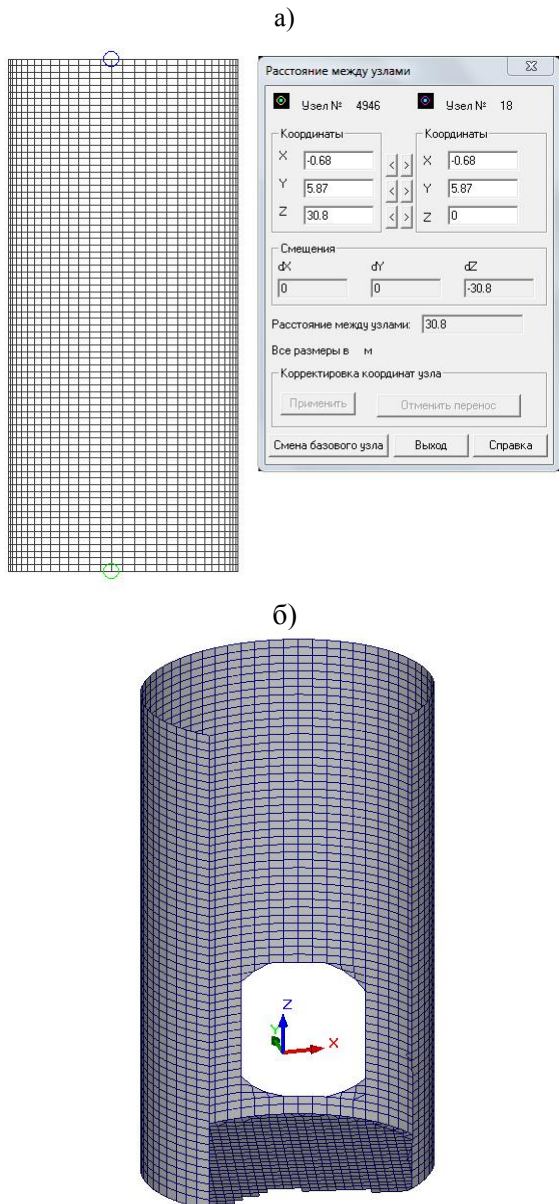


Рис. 2. Фрагменти скінченно-елементних моделей (оболонок) ствола № 1 (комплекс SCAD): а) пальова система; б) система торкретування

В конструкції пальової системи з буросічних паль діаметром 0,8 м запроєктовані чотири залізобетонні пояси поперечним перерізом $0,5 \times 0,5$ м та обв'язувальна балка поперечним перерізом $1,0 \times 1,0$ м.

Ствол № 1 Дніпровського метрополітену характеризується наявністю сполучення із горизонтальними виробками, тому в скінченно-елементній моделі системи торкретування (рис. 2, б) змодельований отвір, що відображає підхід навколоствольної виробки. Прогнозовано, що це особливе місце в оправі є концентратором силових моментів, що в подальшому було доведено результатами розрахунку системи торкретування.

Пластинам, що моделюють бетонні буросічні палі, та стержням, що моделюють обв'язувальну балку і залізобетонні пояси, в комплексі SCAD присвоєні модуль пружності $E_b = 32,5 \cdot 10^3$ МПа і розрахунковий опір на стиск $R_b = 15,5$ МПа. Такі ж самі деформаційні характеристики присвоювалися пластинам товщиною 0,2 та 0,25 м, що моделюють шар торкретування (бетон В30 з вказаними вище модулем пружності). Нижня бетонна плита моделювалася у вигляді пластини завтовшки 0,25 м.

Після завдання деформаційних характеристик, до обох моделей ствола № 1 були прикладені навантаження (ДБН В.2.3-7:2018, 2018). До скінченно-елементної моделі пальової системи були прикладені: 1) власна вага системи із буросічних паль; 2) навантаження від навколишнього ґрунту; 3) гідростатичне навантаження; 4) тимчасове навантаження від крана; до скінченно-елементної моделі системи торкретування тільки 1 і 2 навантаження.

Відповідно до положень нормативних документів (ДБН В.2.3-7:2018, 2018) розрахунок проводився на поєднання навантажень. Для пальової системи прийняті такі коефіцієнти: 1,1 (власна вага) + 1,1 (навантаження від навколишнього ґрунту) + 1,1 (гідростатичне навантаження) + 1,05 (тимчасове навантаження), а для системи торкретування 1,1 (власна вага) + 1,1 (навантаження від навколишнього ґрунту).

Після поєднання навантажень із відповідними коефіцієнтами, відбувся чисельний аналіз за допомогою комплексу SCAD двох скінченно-елементних моделей системи комбінованої конструкції ствола № 1.

Результати

Результати чисельного аналізу (рис. 3; для економії місця наведені лише характерні) нада-ли змогу віднайти найбільш навантажені місця, положення яких та значення силових факторів

стали підґрунтям для визначення концентрато-рів силових факторів.

На основі отриманих результатів також про-ведено перевірку міцності елементів для обох систем комбінованої конструкції ствола № 1 Дніпровського метрополітену.

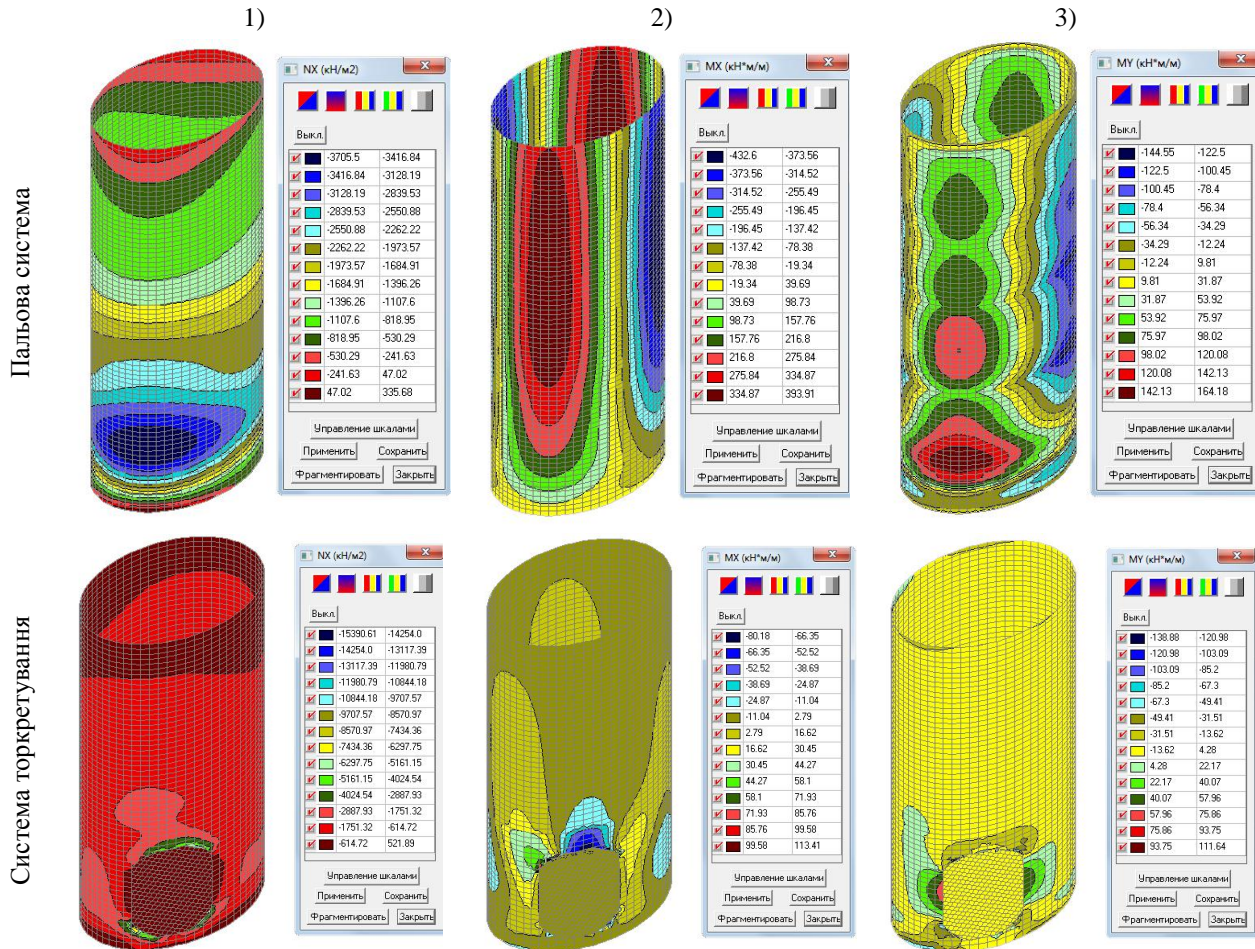


Рис. 3. Силові фактори в оболонках комбінованої конструкції ствола № 1:

1) нормальні сили (вісь X), кН/м; 2) згинальні моменти (вісь X), кН·м/м; 3) згинальні моменти (вісь Y), кН·м/м

На основі ізоліній та ізополів силових факторів було визначено їх максимальні значення в оболонці з буросічних паль: нормальні сили (вісь X) – -3705,5 кН/м (в області 4 залізобетонного поясу); згинальні моменти (вісь X) негативні – -432,6 кН·м/м, позитивні – 393,9 кН·м/м (в області 2 залізобетонного поясу); згинальні моменти (вісь Y) негативні – -144,6 кН·м/м (в області 3 залізобетонного поясу), позитивні – 164,2 кН·м/м (в області 4 залізобетонного поясу). Також було визначено максимальні значення силових факторів в оболонці системи торкретування змінної товщини: норма-

льні сили (вісь X) – -4198,3 кН/м (в області склепіння підхідної виробки); згинальні моменти (вісь X) негативні – -80,18 кН·м/м (в області склепіння підхідної виробки), позитивні – 113,4 кН·м/м (в області склепіння підхідної виробки); згинальні моменти (вісь Y) негативні – -138,8 кН·м/м (в області склепіння підхідної виробки), позитивні – 57,9 кН·м/м (в області стіни виробки, що примикає).

Особливий інтерес представляють силові фактори в елементах скінченно-елементної моделі пальової системи, таких як обв'язувальна балка і залізобетонний пояс № 2 (рис. 4).

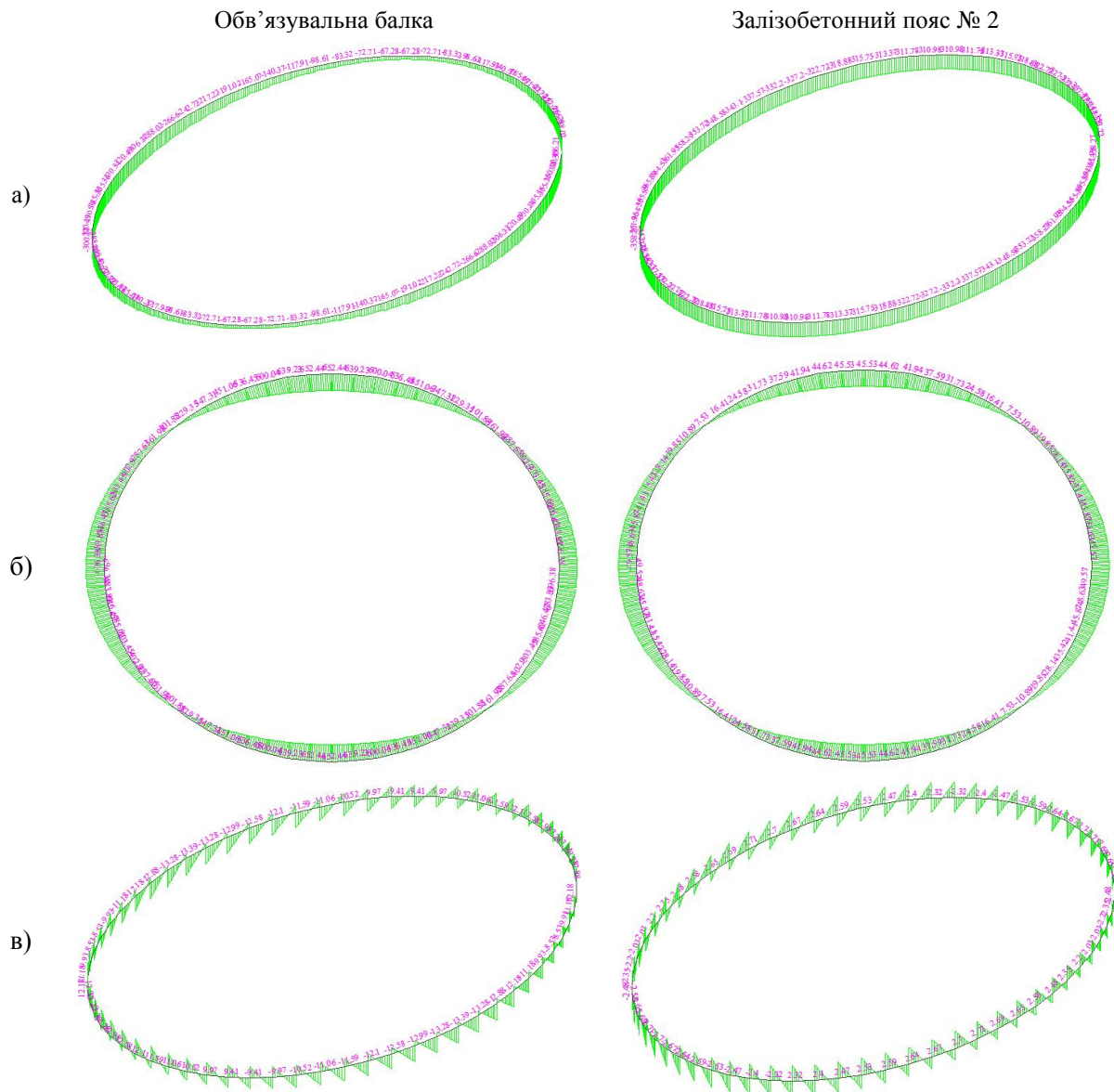


Рис. 4. Епюри нормальних сил (а), згинальних моментів (б) і поперечних сил (в)

Проаналізовано максимальні силові фактори в обв'язувальній балці/залізобетонному поясі № 2: нормальна сила – $-335,4$ кН/ $-365,9$ кН, згинальні моменти – $652,4$ кН·м/ $45,5$ кН·м, поперечні сили – $13,4$ кН/ $2,71$ кН. На основі отриманих результатів проведено розрахунок потрібного армування для буросічних паль пальової системи і отримано загальну площу арматурних стрижнів $30,5$ см² та прийнято 12 стрижнів арматури $\varnothing 18$ класу А500С, а для системи торкретування – загальну площу арматурних стрижнів $15,8$ см² та прийнято 14 стрижнів $\varnothing 12$ арматури класу А500С (20 см) з міркою 150.

Наукова новизна та практична значимість

В статті проведено чисельний аналіз конструкції ствола, який надав повну картину силових факторів, що дозволяють прогнозувати появу нормальних сил та згинальних моментів в подібних інженерно-геологічних умовах.

Результати аналізу комбінованої конструкції ствола Дніпровського метрополітену методом скінченних елементів дозволили науково обґрунтувати проєктні рішення і забезпечити високі експлуатаційні показники обох систем шахтного ствола № 1.

Висновки

Впровадження нових технологій будівництва, зокрема в області раціонального використання підземного простору та розвитку міського транспорту, потребує наукового обґрунтування проектних рішень. На прикладі Дніпровського метрополітену, що є майданчиком для впровадження вже апробованих в світу технологій, дослідження комбінованої конструкції ствола є таким, що може характеризуватися як обов'язкове.

Під час чисельного аналізу комбінованої конструкції ствола № 1 Дніпровського метрополітену визначено силові фактори (нормальні сили та згинальні моменти) для пальної системи та системи торкретування. Отримання цих результатів дозволило обґрунтувати проектні рішення та довести їх раціональність з позиції розрахунків та подальшої експлуатації.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- Bryson, L. S., & Zapata-Medina, D. G. (2010). Finite-element analysis of secant pile wall installation. *ICE Proceedings Geotechnical Engineering*, 163(4), 209-219.
- Coulthard, M. A. (1999). Applications of numerical modelling in underground mining and construction. *Geotechnical & Geological Engineering*, 17(3-4), 373-385.
- Jia, Y. D., Stace, R., & Williams, A. (2013). Numerical modelling of shaft lining stability at deep mine. *Mining Technology*, 122(1), 8-19.

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.

Zhang, H. H. & Small, J. C. (2000). Analysis of capped pile groups subjected to horizontal and vertical loads. *Computers and Geotechnics*, 26(1), 1-21.

Борщевский, С. В., Петренко, В. Д., Тюткин, А. Л., Антонов, Е. Б., & Плешко, М. С. (2006). Расчет крепи ствола методом конечных элементов. *Геотехнічна механіка*, 66, 89-96.

ДБН В.2.3-7:2018 (2018). *Метрополітени. Основні положення*. Київ: Мінрегіонбуд України.

Гарбер, В. А. (2014). Вертикальные и наклонные тоннели в транспортном строительстве (эволюция конструктивных решений и технологий сооружения). *Метро и тоннели*, 4, 34-38.

Карпиловский, В. С., Криксунов, Э. З., Перельмутер, А. В., & al. (2000). *SCAD для пользователя*. Киев: ВВП «Компас».

Левит, В. В., Тюткин, А. Л., & Борщевский, С. В. (2007). Математическое моделирование системы «ствол – горизонтальная выработка» методом конечных элементов. *Геотехнічна механіка*, 73, 41-54.

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

Тюткин, О. Л., Мірошник, В. А., & Гелетюк, І. В. (2021). Комплексний аналіз конструкції стовбуру Дніпровського метрополітену. *Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика*, 19, 91-98.

Шейн Аунг Тун (2012). Расчет модели вертикальных подземных выработок. *Мир транспорта*, 2(40), 88-91.

О. Л. TIUTKIN^{1*}, D. O. BANNIKOV², V. A. MIROSHNYK³, I. V. HELETIUK⁴

^{1*} Department «Transport infrastructure», Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryana Str., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (066) 290 45 18, e-mail alexeytutkin@gmail.com, ORCID 0000-0003-4921-4758

² Department «Construction Production and Geodesy», Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (063) 400 43 07, e-mail bdo2020@yahoo.com, ORCID 0000-0002-9019-9679

³ Department «Transport infrastructure», Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryana Str., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (097) 828 64 87, e-mail miroshnikvetal@gmail.com, ORCID 0000-0002-8115-0128

⁴ LIMAK Office, Naharin Ave., 7, Dnipro, Ukraine, 49000, tel. +38 (050) 322 48 43, e-mail igeletjuk@limak.com.tr

ANALYSIS OF THE COMBINED STRUCTURE OF THE SHAFT OF THE DNIPRO METRO BY THE FINITE ELEMENTS METHOD

Purpose. The development of construction of underground excavations of the Dnipro Metro requires analysis and scientific substantiation of design solutions based on technologies that are new for Ukraine. The aim of the scientific article is to analyze the combined design of the shaft of the Dnipro Metro by the finite element method with determination of force factors in the linings of the pile system and shotcrete system with further substantiation based on the results of design solutions to the real situation of Dnipro Metro construction. **Methodology.** Two finite element models were constructed for the analysis of the shaft № 1 of the Dnipro Metro by the finite element method. They reflect the combined design of the shaft, which consists of two parts. The finite-element model of the pile system, which reflects the shell of bored piles, supported by a cap beam and ring beams, is analyzed separately. The model for the shotcrete system, which is used for the second part of the shaft, which lies in a solid rock mass, is separately modeled and analyzed. Finite-element models of both systems are assigned real deformation and geometric parameters, as well as the load, which became the key to adequate calculations by the finite element method. **Findings.** During the numerical analysis of the combined structure of the shaft № 1 of Dnipro Metro, the force factors (normal forces and bending moments) for the pile system and the shotcrete system were determined. These results became the basis for the reinforcement of both systems. **Originality.** A numerical analysis of the shaft structure was performed, which provided a complete picture of the force factors that allow predicting the appearance of normal forces and bending moments in similar engineering and geological conditions. **Practical value.** The results of the analysis of the combined design of the shaft of the Dnipro Metro by the finite element method allowed to scientifically substantiate the design solutions and ensure high performance of both shaft systems № 1.

Keywords: metro; mine shaft; combined structure; force factors; bored piles; shotcrete

REFERENCES

- Bryson, L. S., & Zapata-Medina, D. G. (2010). Finite-element analysis of secant pile wall installation. *ICE Proceedings Geotechnical Engineering*, 163(4), 209-219. (in English)
- Coulthard, M. A. (1999). Applications of numerical modelling in underground mining and construction. *Geotechnical & Geological Engineering*, 17(3-4), 373-385. (in English)
- Jia, Y. D., Stace, R., & Williams, A. (2013). Numerical modelling of shaft lining stability at deep mine. *Mining Technology*, 122(1), 8-19. (in English)
- 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. (in English)
- Zhang, H. H. & Small, J. C. (2000). Analysis of capped pile groups subjected to horizontal and vertical loads. *Computers and Geotechnics*, 26(1), 1-21. (in English)
- Borshchevskiy, S. V., Petrenko, V. D., Tyutkin, A. L., Antonov, Ye. B., & Pleshko, M. S. (2006). Raschet krepiv stvola metodom konechnykh elementov. *Heotekhnichna mekhanika*, 66, 89-96. (in Ukrainian)
- DBN V.2.3-7:2018 (2018). *Metropoliteny. Osnovni polozhennia*. Kyiv: Minrehionbud Ukrainy. (in Ukrainian)
- Garber, V. A. (2014). Vertikalnye i naklonnye tonneli v transportnom stroitelstve (evolyutsiya kon-struktivnykh resheniy i tekhnologiy sooruzheniya). *Metro i tonneli*, 4, 34-38. (in Russian)
- Karpilovskiy, V. S., Kriksunov, E. Z., Perelmuter, A. V., & al. (2000). *SCAD dlya polzovatelya*. Kiev: VVP «Kompas». (in Russian)
- Levit, V. V., Tyutkin, A. L., & Borshchevskiy, S. V. (2007). Matematicheskoe modelirovanie sistemy «stvol – gorizontalnaya vyrabotka» metodom konechnykh elementov. *Heotekhnichna mekhanika*, 73, 41-54. (in Russian)
- Tiutkin, O. L. (2020). *Teoretychni osnovy kompleksnoho analizu tunelnykh konstruksii*. Dnipro: Zhurfond. (in Ukrainian)
- Tiutkin, O. L., Miroshnyk, V. A., & Heletiuk, I. V. (2021). Kompleksnyi analiz konstruksii stovburu Dniprovskoho metropolitenu. *Mosty ta tuneli: teoriia, doslidzhennia, praktyka*, 19, 91-98. (in Ukrainian)
- Sheyn Aung Tun (2012). Raschet modeli vertikalnykh podzemnykh vyrabotok. *Mir transporta*, 2(40), 88-91. (in Russian)

Надійшла до редколегії 15.09.2021.

Прийнята до друку 05.11.2021.