

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

УДК 624.2/8:625

Д. О. БАННИКОВ¹, В. П. КУПРІЙ^{2*}, Д. Ю. ВОТЧЕНКО³

¹ 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

^{2*} Кафедра «Транспортна інфраструктура», 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

³ ННЦ «Мости і тунелі», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 30, ел. пошта votchenkodi@gmail.com

ЗАКОНОМІРНОСТІ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ОПРАВ ПІД ЧАС БУДІВНИЦТВА ПІЛОННОЇ СТАНЦІЇ МЕТРОПОЛІТЕНУ

Мета. Виконати числовий аналіз станційної конструкції. Врахувати в процесі математичного моделювання процес спорудження станційних тунелів трисклепінчастої станції. Отримати закономірності напружено-деформованого стану оправ, на який впливають будівельні процеси розробки ґрунту та зведення оправи. **Методика.** Для досягнення поставленої мети проведено серію чисельних розрахунків моделей пілонної станції метрополітену глибокого закладення. Розроблено три скінченно-елементні моделі, які відображують етапність спорудження трисклепінчастої пілонної станції. Чисельний аналіз проводився на базі методу скінчених елементів, реалізованого в розрахунковому комплексі Lira for Windows. Моделювання напружено-деформованого стану оправ станційних тунелів та ґрунтового масиву проводилося за допомогою прямокутних, універсальних чотирикутних та трикутних скінчених елементів, які враховують особливі властивості ґрунтового масиву. Оправи станційних тунелів змодельовані за допомогою стержневих скінчених елементів. **Результати.** Отримані ізополі напружено-деформованого стану в скінченно-елементних моделях, що відображують етапи будівництва. Проаналізовані вертикальні переміщення та горизонтальні напруження, які є характерними для трисклепінчастої станції пілонного типу. Аналіз горизонтальних напружень довів, що на етапі розкриття середнього тунелю досить невідгідною є схема роботи пілонів. Також проведено аналіз згинальних моментів й нормальних сил та відмічено несиметричність їх розподілу. **Наукова новизна.** На основі отриманих закономірностей розподілу напружено-деформованого стану та силових факторів доведено, що чисельний аналіз конструкції станції в процесі будівництва необхідний для вживання заходів запобігання або зменшення деформацій оправ, що перебувають у невідгідних умовах. **Практична значимість.** В ході досліджень отримано закономірності зміни напружень, переміщень, згинальних моментів та нормальних сил в моделях пілонної станції, які відображають послідовність її спорудження.

Ключові слова: метрополітен; станція пілонного типу; оправа; напружено-деформований стан; комплекс Lira for Windows

Вступ

В науково-технічній літературі та у навчальних посібниках достатньо широко представлені методи статичного розрахунку оправ перегінних тунелів метрополітенів і в меншому ступені наведені методи розрахунку конструкцій станцій метрополітену глибокого закладення (Фролов, Голицынський, & Ледяев, 2001; Петренко, В. И., Петренко, В. Д., & Тютькин, 2005; Фролов, & Мордвинков, 2006).

Відсутність досить повно розроблених методів розрахунку конструкцій станцій глибокого закладення пояснюється більшою кількістю факторів, що впливають на їхню статичну роботу, і складністю розрахункового апарата, за допомогою якого отримується числове вираження напружено-деформованого стану. Частіш усього в існуючих методах розрахунку розглядається етап, коли оправа станції вже побудована набрала розрахункової міцності і сприймає діючі навантаження.

Найголовнішими факторами, що визначають особливості статичної роботи станційних тунелів, є тип конструкції станційних споруд, їхні обриси й геометричні розміри елементів, матеріал оправ станційних тунелів, глибина закладення станції від земної поверхні, інженерно-геологічні умови розташування станцій, величина й характер діючого на станційні тунелі гірського тиску, а також методи будівництва та порядок виконання робіт зі спорудження.

Врахування усіх цих факторів призводить до необхідності розробки досить складних і трудомістких методів розрахунку станційних тунельних конструкцій, які б належним чином показали дійсну картину статичної роботи конструкції станції (Амусин, 1967; Петренко, В. Д., Тютюкин, Петренко, В. И., & Кавун, 2008; Тютюкин, 2020). Методи, які застосовуються при розрахунку конструкцій станцій глибокого закладення, звичайно ґрунтуються на принципах розрахунку оправ одиночних тунелів і головним чином кругового окреслення оправ. Зокрема, метод розрахунку кругових оправ повністю придатний при проектуванні тільки глухих ділянок станцій пілонного типу.

Беручи до уваги характеристики ґрунтів, розрахунок станційних тунельних оправ проводиться у пружному середовищі. Такі методи розрахунків підрозділяються на дві наступні групи: а) методи будівельної механіки, у яких реакції породи враховуються на основі гіпотези Фусса – Винклера; б) методи, що розглядають навколишні тунелі породи як тіло, що лінійно деформується і до якого можна застосувати закони теорії пружності. Сутність цих методів викладається досить повно в науково-технічній літературі (Гарбер, 1996; Фролов, Голицынский, & Ледяев, 2001; Петренко, В. Д., Тютюкин, & Петренко, В. И., 2012).

Гірський тиск у вигляді його вертикальної і горизонтальної складових, що діє на конструкцію станцій глибокого закладення, залежить від значної низки факторів, відзначених вище, причому в значній мірі – від несучої здатності породної покрівлі над станційним тунелями.

Аналіз напружено-деформованого стану оправ станційних тунелів в зоні їх взаємного впливу в залежності від місцеположення станції в плані й профілі, інженерно-геологічними характеристиками товщі порід, прорізуваної станційними тунелями, особливостями конс-

трукції станції й методами організації й виконання робіт по її спорудженню.

Мета

Провести аналіз напружено-деформованого стану оправ станційних тунелів в зоні їх взаємного впливу при будівництві з урахуванням послідовності зведення конструкцій трисклепінчастої станції метрополітену. Визначити місця максимальних зусиль і деформацій в оправі, які виникають не після завершення всіх робіт зі зведення конструкцій, а в якийсь проміжний етап, характерний для цілком конкретних умов спорудження трисклепінчастої станції пілонного типу.

Методика

Застосування методу скінченних елементів (МСЕ) дозволяє значно наблизити розрахункову схему до реальної конструкції станції, дає можливість урахувати найбільш важливі властивості ґрунтового масиву, а також реальну форму станційних тунелів (Chang, Kwon, Moon, & Lee, 2005; Тютюкин, 2020). Використання МСЕ найбільше ефективно в тих випадках, для яких не є точних аналітичних рішень: для розрахунку конструкцій складної форми; розрахунку оправ, розташованих у неоднорідному або шаруватому ґрунтовому масиві; врахуванню етапів спорудження станції.

Моделювання напружено-деформованого стану оправ станційних тунелів та ґрунтового масиву в професійному комплексі Lira for Windows (Стрелец-Стрелецкий, Журавлев, & Водопьянов, 2019) проводилося за допомогою прямокутних, універсальних чотирикутних та трикутних скінченних елементів (№ 281, 284, 282), які враховують особливі властивості ґрунтового масиву.

У роботі розглядалися трисклепінчаста станція пілонного типу глибокого закладення, розташована на глибині 40 метрів у скельних ґрунтах. Внутрішній діаметр станційних тунелів складає 8,5 м. Масив має розмір 58,5×55,5 м. Робота постійних оправ станційних тунелів моделюється за допомогою стержневих скінченних елементів. Оскільки склепіння виробок має коловий обрис, то змоделювати ґрунтовий масив за допомогою тільки прямокутних скінченних елементів неможливо (рис. 1).

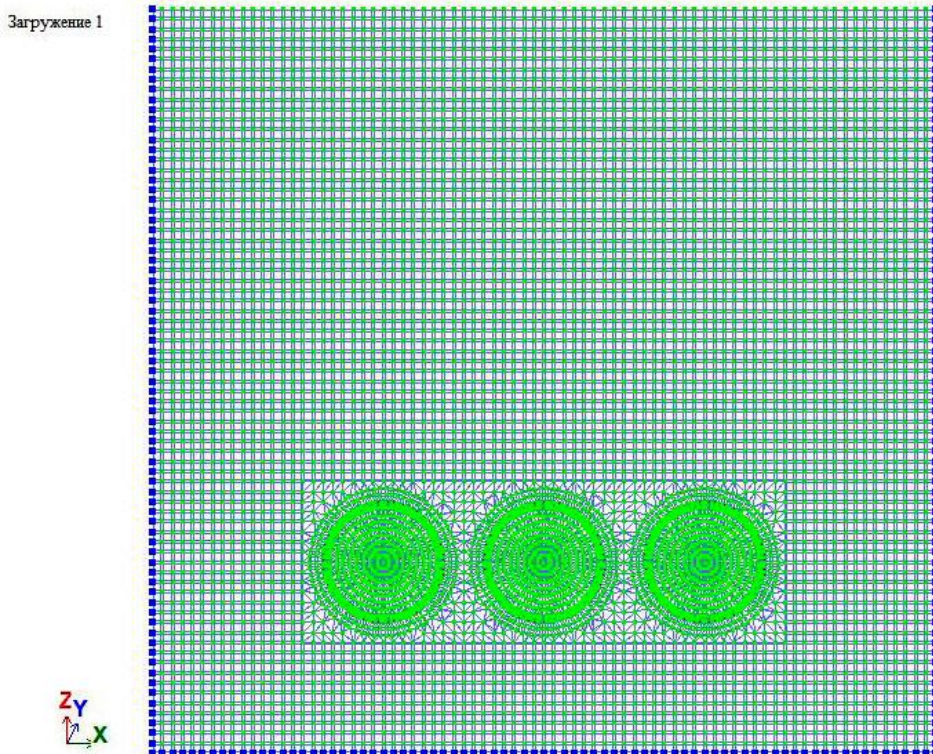


Рис. 1. Скінченно-елементна модель ґрунтового масиву

На рис. 2 наведені етапи будівництва станційних тунелів, для яких визначався напружено-деформований стан оправ станційних тунелів в зоні їх взаємного впливу: I етап – проходка лівого станційного тунелю; II етап – проход-

ка правого станційного тунелю паралельно лівому, але з відставанням; III етап – проходка центрального станційного тунелю при проходці бокових станційних тунелів.

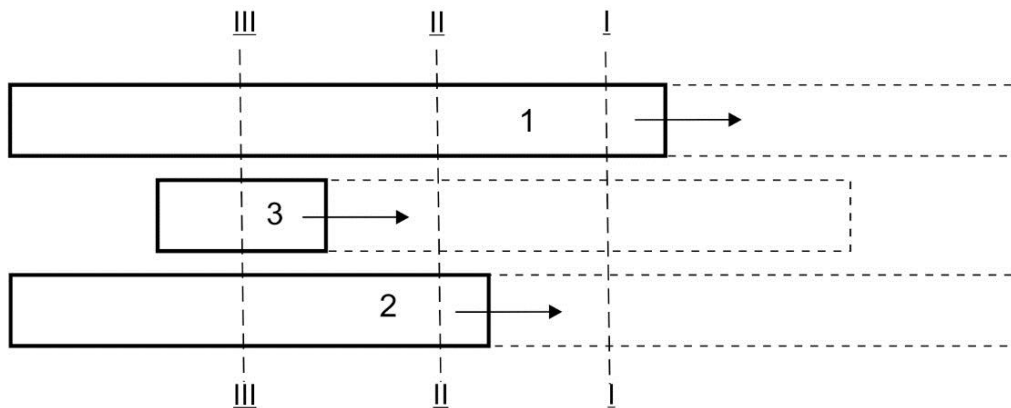


Рис. 2. Три етапи будівництва станційних тунелів пілонної станції

Результати

Первинними результатами чисельного аналізу скінченно-елементних моделей, в яких відображено етапність спорудження трисклепін-

частої станції пілонного типу є ізополя вертикальних переміщень (рис. 3) і горизонтальних напружень (рис. 4) контуру виробок бокових станційних тунелів. Їх розподіл в моделях явно характеризує вплив проведення робіт із розробки ґрунту та зведення оправи.

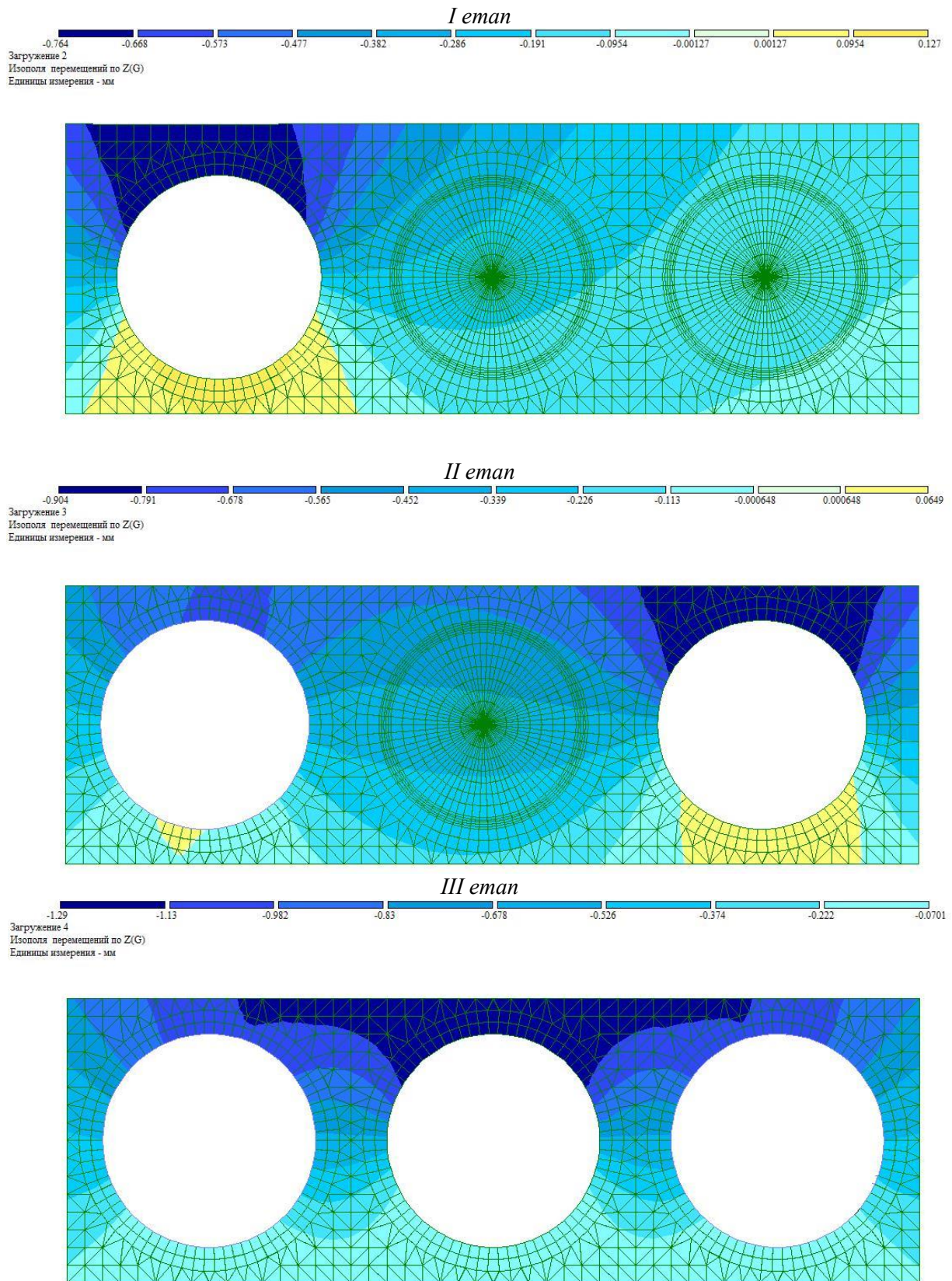


Рис. 3. Ізополя вертикальних переміщень контуру виробок станційних тунелів

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

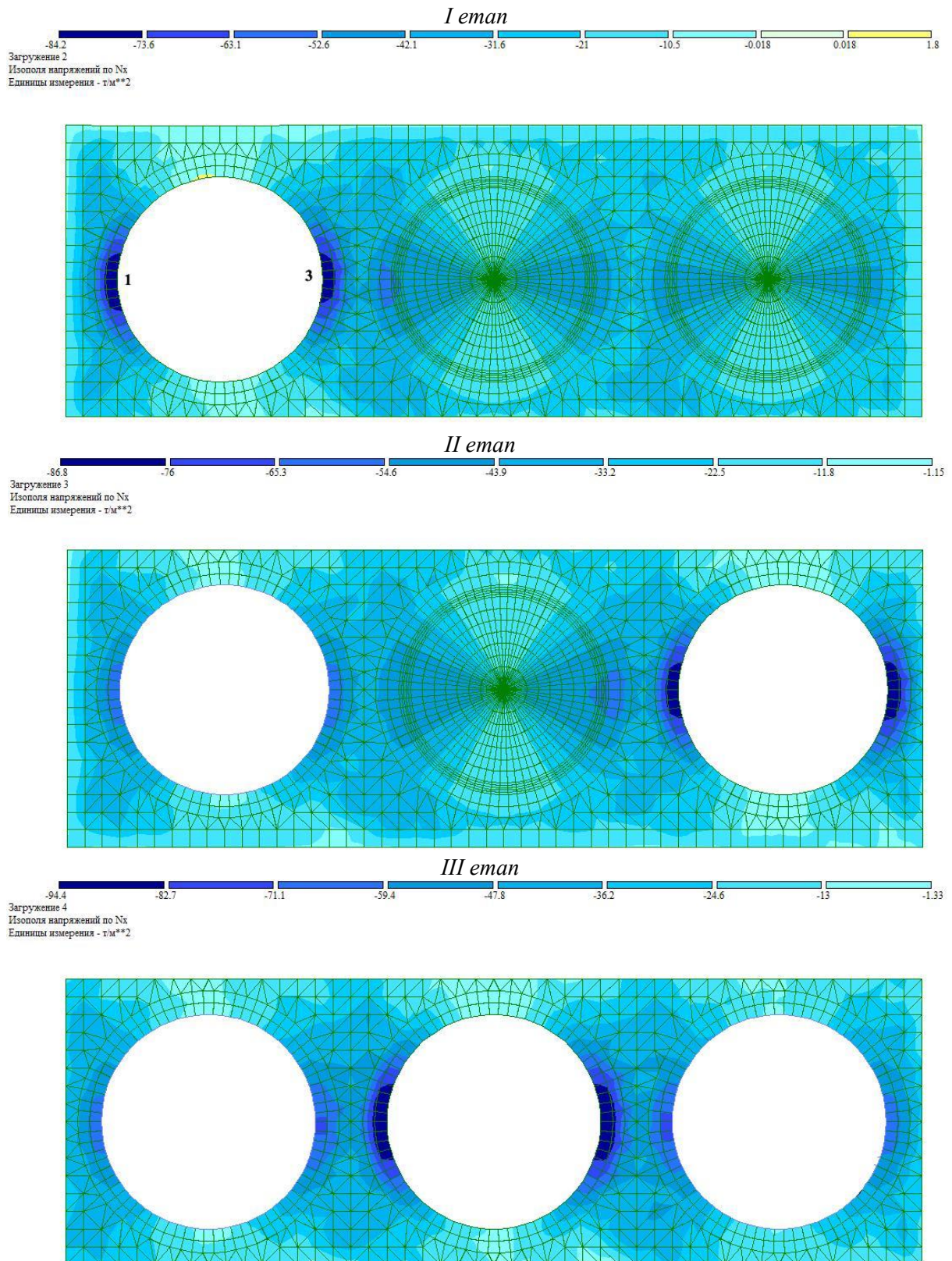
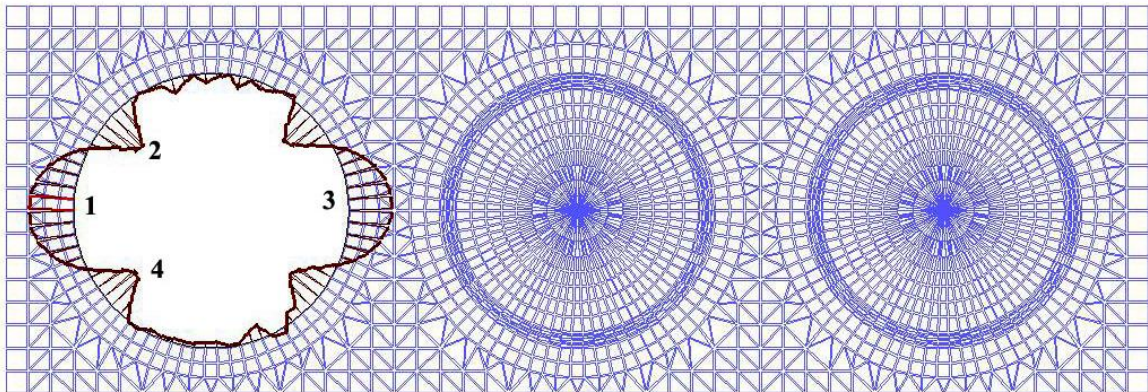


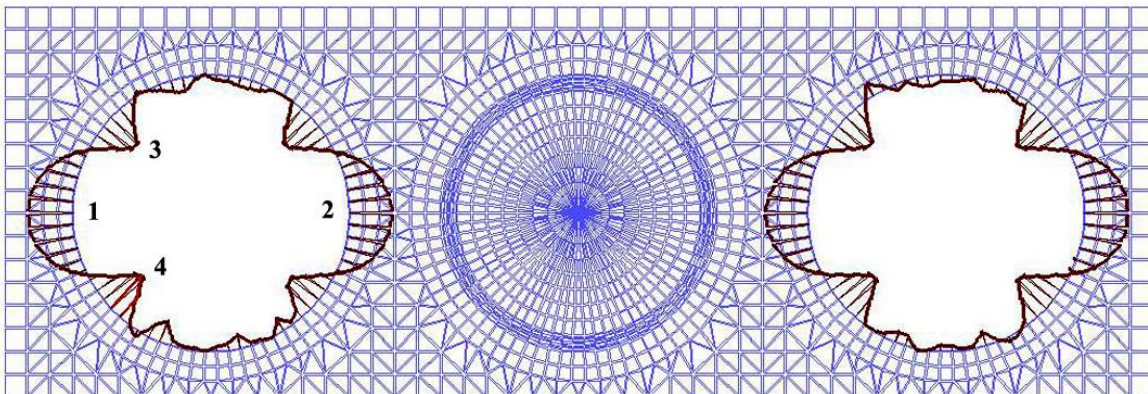
Рис. 4. Ізополю горизонтальних напружень на контурі виробок станційних тунелів

На рис. 5 показані епюри згинальних моментів в оправі станційних тунелів в ході спорудження станції, на яких чітко відмічається їх несиметричність.

I етап



II етап



III етап

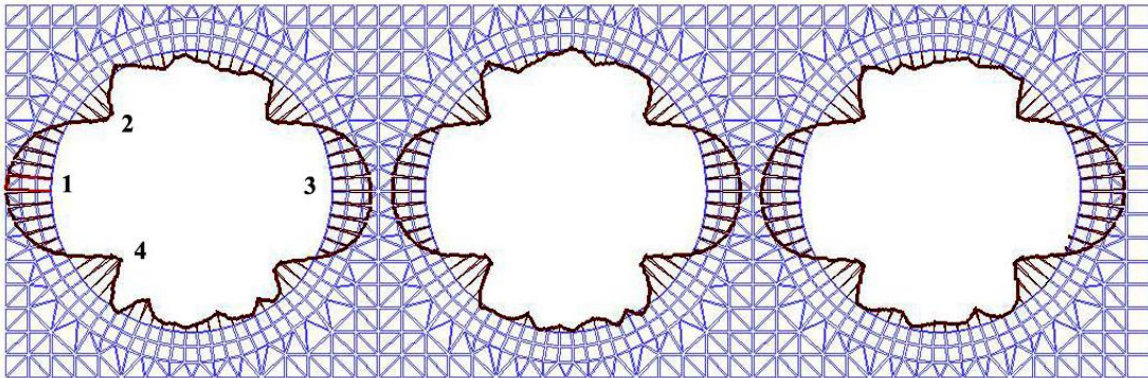


Рис. 5. Епюри згинальних моментів в оправі станційних тунелів

Аналіз вертикальних переміщень (рис. 3), свідчить, що їх значення (0,76...1,29 мм) знаходяться в нормативних межах для всіх етапів спорудження. Значення стискаючих напружень (842 кПа) виникають на горизонтальному діаметрі виробки в точках 1 і 3 на I етапі спорудження (рис. 4), потім, на II етапі вони збільшуються (868 кПа), але перевищують значення

напруження у лівому тунелі незначно. Максимальні значення напружень (944 кПа) виникають на горизонтальному діаметрі виробки центрального станційного тунелю (рис. 4, III етап), і в порівнянні з напруженням у бокових тунелях його значення значно збільшилось.

На III етапі будівництва досить невідгукливою представляється схема роботи пілонів під час

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

розкриття виробки середнього станційного тунелю. У цьому випадку зі сторони бічних тунелів фактично знімається відпір породи, і в цій частині оправи бокових станційних тунелів опираються деформаціям у бік виробки середнього тунелю тільки за рахунок своєї міцності, тому що опір ціликів, що залишилися, значно зменшується, а при розробці проходів зовсім відсутній.

Аналіз згинальних моментів (рис. 5) свідчить, що на I етапі їх максимальні значення (19,2 кН·м) виникають на горизонтальному діаметрі станційної оправи у точці 1. Несиметри-

чність моментів виникла із-за впливу граничних умов в моделі ґрунтового масиву. На II етапі максимальні значення (21,1 кН·м) виникають нижче горизонтального діаметру станційної оправи, змінюючи знак, але і у точках 1,3 на горизонтальному діаметру значення моментів збільшується. На III етапі максимальні значення (33,1 кН·м) виникають на горизонтальному діаметру станційної оправи (точки 1, 3), значно збільшуючись.

Графіки залежності величини нормальних зусиль в характерних точках оправи від етапів будівництва станції показані на рис. 6.

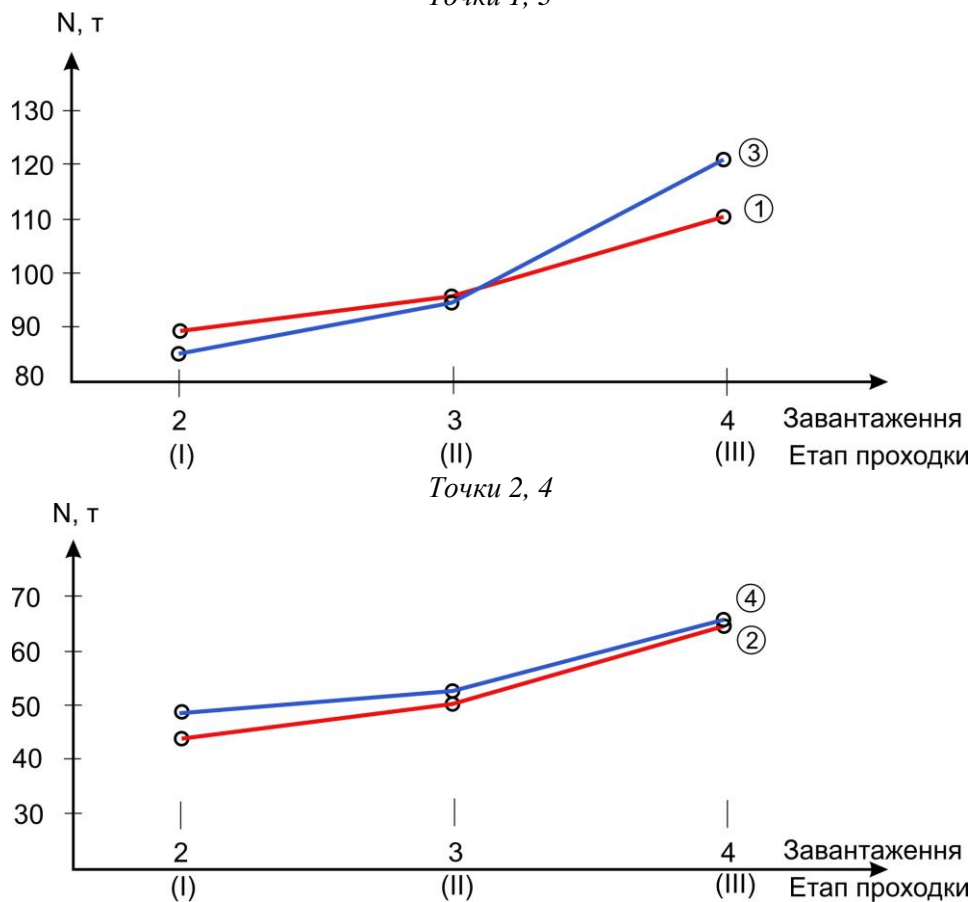


Рис. 6. Графіки залежності величини зусиль в від етапів будівництва станції

Несиметрична розробка ґрунту та зведення оправи в станційних тунелях призводять до несиметричного розподілу основних силових факторів в ній.

Наукова новизна та практична значимість

На основі отриманих закономірностей розподілу напружено-деформованого стану та си-

лових факторів доведено, що чисельний аналіз конструкції станції в процесі будівництва необхідний для вживання заходів запобігання або зменшення деформацій оправ, що перебувають у невідповідних умовах. До таких мір відноситься постановка тимчасового кріплення і розкриття виробок короткими по довжині станції заходками так, щоб завдяки спільній роботі тимчасово перевантажених кілець оправи полегшувала-

ся сусідніми кільцями, що працюють у нормальних умовах.

В ході досліджень отримано закономірності зміни напружень, переміщень, згинальних моментів та нормальних сил в моделях пілонної станції, які відображають послідовність її спорудження.

Висновки

Аналіз напружено-деформованого стану оправ станційних тунелів в зоні їх взаємного впливу при будівництві з огляду на послідовність зведення конструкцій трисклепінчастої станції метрополітену пілонного типу показав, що знаходження місць найгіршого співвідношення зусиль і деформацій в окремих елементах оправ може виникнути не після завершення всіх робіт зі спорудження конструкції станції, а в проміжних етапах робіт.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

Chang, S. B., Kwon, S., Moon, S. J., & Lee, S. D. (2005). A design case study of the very wide 3-arch tunnel under the railroad station building. *Underground Space Use: Analysis of the Past and Lessons for the Future*, 135-139.

Амусин, Б. З. (1967). Статический расчет конструкции станции метрополитена закрытого типа по стадиям ее сооружения методом начальных параметров. *Труды ВНИИИ*, 67, 415-422.

Гарбер, В. А. (1996). *Научные основы проектирования тоннельных конструкций с учетом технологии их сооружения* (Т. 1). Москва: АО ЦНИИС.

Петренко, В. Д., Тютькин, А. Л., Петренко, В. И., & Кавун, Д. А. (2008). Закономерности формирования напряженно-деформированного состояния конструкции колонной станции метрополитена в процессе ее сооружения. *Геотехнічна механіка*, 78, 87-99.

Петренко, В. Д., Тютькин, А. Л., & Петренко, В. И. (2012). Обзор аналитических и экспериментальных методов исследования взаимодействия массива и крепи. *Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика*, 1, 75-81

Петренко, В. И., Петренко, В. Д., & Тютькин, А. Л. (2005). *Современные технологии строительства метрополитенов в Украине*. Дніпропетровськ: Наука і освіта.

Стрелец-Стрелецкий, Е. Б., Журавлев, А. В., & Водопьянов, Р. Ю. (2019). *ЛИРА-САПР. Книга 1. Основы*. Киев: LIRALAND.

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

Фролов, Ю. С., Голицынский, Д. М., & Ледаев, А. П. (2001). *Метрополитены. Учебник для вузов*. Москва: Желдориздат.

Фролов, Ю. С., & Мордвинков, Ю. А. (2006). Система «крепь – грунтовый массив». Численный анализ напряженно-деформированного состояния с учетом технологии проходки тоннелей. *Метро и тоннели*, 5, 32-35.

D. O. BANNIKOV¹, V. P. KUPRII^{2*}, D. YU. VOTCHENKO³

¹ 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

^{2*} Department «Transport infrastructure» of Dnipro National University of Railway Transport named after academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (099) 616 77 46, e-mail kypriy@i.ua, ORCID 0000-0002-6517-2554

³ ESC «Bridges and Tunnels» of Dnipro National University of Railway Transport named after academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 30, e-mail votchenkodi@gmail.com

REGULARITIES OF THE LINING STRESS-STRAIN STATE DURING OF THE PYLON METRO STATION CONSTRUCTION

Purpose. Perform numerical analysis of the station structure. Take into account in the process of mathematical modeling the process of construction of station tunnels of a three-vaulted station. Obtain the regularities of the stress-strain state of the linings, which is influenced by the processes of soil excavation and lining construction. **Methodology.** To achieve this goal, a series of numerical calculations of models of the deep contour interval metro pylon station was performed. Three finite-element models have been developed, which reflect the stages of construction of a three-vaulted pylon station. Numerical analysis was performed on the basis of the finite element meth-

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

od, implemented in the calculation complex Lira for Windows. Modeling of the stress-strain state of the station tunnel linings and the soil massif was performed using rectangular, universal quadrangular and triangular finite elements, which take into account the special properties of the soil massif. Station tunnel linings are modeled by means of rod finite elements. **Findings.** Isofields of the stress-strain state in finite-element models reflecting the stages of construction are obtained. The vertical displacements and horizontal stresses that are characteristic of a three-vaulted pylon station are analyzed. The analysis of horizontal stresses proved that at the stage of opening of the middle tunnel the scheme of pylon operation is rather disadvantageous. The analysis of bending moments and normal forces was also carried out and the asymmetry of their distribution was noted. **Originality.** Based on the obtained patterns of distribution of stress-strain state and force factors, it is proved that numerical analysis of the station structure during construction is necessary to take measures to prevent or reduce deformation of frames that are in unfavorable conditions. **Practical value.** In the course of research, the regularities of changes in stresses, displacements, bending moments and normal forces in the models of the pylon station, which reflect the sequence of its construction, were obtained.

Keywords: metro; pylon station; lining; stress-strain state; Lira for Windows

REFERENCES

- Chang, S. B., Kwon, S., Moon, S. J., & Lee, S. D. (2005). A design case study of the very wide 3-arch tunnel under the railroad station building. *Underground Space Use: Analysis of the Past and Lessons for the Future*, 135-139. (in English)
- Amusin, B. Z. (1967). Statische raschet konstruksii stantsii metropolitena zakrytogo tipa po stadiyam ee sooruzheniya metodom nachalnykh parametrov. *Trudy VNIMI*, 67, 415-422. (in Russian)
- Garber, V. A. (1996). *Nauchnye osnovy proektirovaniya tonnelnykh konstruksiy s uchetom tekhnologii ikh sooruzheniya* (T. 1). Moskva: AO TsNIIS. (in Russian)
- Petrenko, V. D., Tyutkin, A. L., Petrenko, V. I., & Kavun, D. A. (2008). Zakonomernosti formirovaniya napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya konstruksii kolonnoy stantsii metropolitena v protsesse ee sooruzheniya. *Heotekhnichna mekhanika*, 78, 87-99. (in Russian)
- Petrenko, V. D., Tyutkin, A. L., & Petrenko, V. I. (2012). Obzor analiticheskikh i eksperimentalnykh metodov issledovaniya vzaimodeystviya massiva i krepki. *Mosty ta tuneli: teoriia, doslidzhennia, praktyka*, 1, 75-81. (in Russian)
- Petrenko, V. I., Petrenko, V. D., & Tyutkin, A. L. (2005). Sovremennye tekhnologii stroitelstva metropolitenov v Ukraine. *Dnipropetrovsk: Nauka i osvita*. (in Russian)
- Strelets-Streletskiy, Ye. B., Zhuravlev, A. V., & Vodopyanov, R. Yu. (2019). *LIRA-SAPR. Kniga I. Osnovy*. Kiev: LIRALAND. (in Russian)
- Tiutkin, O. L. (2020). *Teoretychni osnovy kompleksnoho analizu tunelnykh konstruksii*. Dnipro: Zhurfond. (in Ukrainian)
- Frolov, Yu. S., Golitsynskiy, D. M., & Ledyayev, A. P. (2001). *Metropoliteny. Uchebnik dlya vuzov*. Moskva: Zheldorizdat. (in Russian)
- Frolov, Yu. S., & Mordvinkov, Yu. A. (2006). Sistema «krep – gruntovyy massiv». Chislennyy analiz napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya s uchetom tekhnologii prokhodki tonneley. *Metro i tonneli*, 5, 32-35. (in Russian)

Надійшла до редколегії 17.03.2021.

Прийнята до друку 30.03.2021.