

## МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

УДК 625.42:624.074.3

Н. В. СМОЛЯНЮК<sup>1\*</sup>, А. В. БІЛЬЧЕНКО<sup>2</sup>

<sup>1\*</sup> Кафедра мостів, конструкцій і будівельної механіки ім. В. О. Російського, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, вул. Ярослава Мудрого, 25, Харків, Україна, 61002, тел. +38 (050) 747 26 04, ел. пошта nadiksm@yahoo.com, ORCID 0000-0003-4254-8990

<sup>2</sup> Кафедра мостів, конструкцій і будівельної механіки ім. В. О. Російського, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, вул. Ярослава Мудрого, 25, Харків, Україна, 61002, тел. +38 (050) 097-248-07-41, ел. пошта kmksm@ukr.net, ORCID 0000-0001-5077-6235

### ЧИСЕЛЬНИЙ АНАЛІЗ ОДНОСКЛЕПІНЧАСТОЇ СТАНЦІЇ МІЛКОГО ЗАКЛАДЕННЯ ХАРКІВСЬКОГО МЕТРОПОЛІТЕНУ

**Мета.** Розвиток Харківського метрополітену характеризується розробкою нових конструкцій та технологій їх спорудження. Розгалужена система метрополітену в м. Харкові та наявність станцій глибокого і мілкового закладення потребує наукового обґрунтування цих складних підземних об'єктів. Метою наукової статті є чисельний аналіз односклепінчастої станції мілкового закладення, склепіння якої має особливу конструкцію (перфоровані залізобетонні блоки). **Методика.** Для досягнення поставленої мети проаналізовано конструкцію станції із збірним склепінням та «стіною в ґрунті», а також інженерно-геологічні умови її закладення. Створена скінченно-елементна модель односклепінчастої станції мілкового закладення. В моделі відтворено геометричні розміри реальної конструкції Харківського метрополітену, шари ґрунту, в яких вона закладена, умови примикання «стіни в ґрунті», а також перфоровані блоки склепіння. Модель оснований на об'ємних скінченних елементах і більш повно відображає взаємодію станції із оточуючим масивом. Проведено розрахунок скінченно-елементної моделі на сумісну дію власної ваги моделі і рухоме навантаження НК-80 (комбіноване завантаження). **Результати.** Отримано значення напружено-деформованого стану односклепінчастої станції мілкового закладення. Проведений аналіз переміщень та напружень в точках концентрації. Виявлено ситуацію перенапруження станційної конструкції та появу зон тріщиноутворення у випадку дії комбінованого навантаження. **Наукова новизна.** Отримано значення напружено-деформованого стану при комбінації власної ваги та рухомого навантаження НК-80, а також із виокремленням частки останнього. Отримані результати свідчать про потребу у перегляді конструкції станції мілкового закладення, склепіння якої має особливу конструкцію (перфоровані залізобетонні блоки). **Практична значимість.** Вона полягає в отриманні результатів, які вказують вектор розвитку станційних конструкцій Харківського метрополітену.

**Ключові слова:** метрополітен; станція односклепінчастого типу; чисельний аналіз; напружено-деформований стан; метод скінченних елементів

#### Вступ

Харківський метрополітен – це складний комплекс інженерних споруд, що забезпечують швидкісний безпечний рух поїздів, сталі пасажиропотоки та масові перевезення. До впровадження рф в Україну метрополітеном користувалися близько 800 тис. осіб / добу, а з початку експлуатації перевезено понад 7 млрд. пасажирів. Харківський метрополітен відзначається високим рівнем організації праці та культури обслуговування пасажирів.

Технологія спорудження станції метрополітену мілкового закладення Харківського метрополітену односклепінчастого типу відрізняється

комбінованим характером будівництва, який характеризується кріпленням котловану «стінами в ґрунті» з сумісним водозниженням всередині котловану. Основою для лотку слугують мілко-зернисті, жовтувато-сірі чи зеленувато-сірі, кварцові, місцями пилюваті піски. Їхні фізико-механічні характеристики наступні: щільність  $\rho=2,65 \text{ т/м}^3$ ; кут внутрішнього тертя  $\varphi=32\dots35^\circ$ ; коефіцієнт міцності за проф. М. М. Протодьяконовим  $f=0,5$ ; модуль деформації  $E=28\dots30 \text{ МПа}$ .

Ґрунтові води розвідані на відмітці 107,7 м. Рівень ґрунтових вод за прогнозами може значно коливатися в бік підвищення. За хімічним складом ґрунтові води володіють середньою

ступеню сульфатної агресії по відношенню до бетону підвищеної щільності.

Складність інженерно-геологічних умов закладення Харківського метрополітену (мілке закладення) визначається:

- частою зміною літологічної будови, наявністю середньо-стійких та набряклих ґрунтів, що вимагають ретельного кріплення стінок котловану;

- впливом техногенних вод на рівень і хімічний режим ґрунтових вод, що викликають прогнозне підтоплення міської території;

- агресивністю ґрунтових вод по відношенню до бетону марки W4 по водонепроникності;

- неоднорідністю субаеральних ґрунтів за щільністю, наявністю частих карбонатних включень і конкрецій, що вимагають застосування лідерного буріння для паль.

Розрахунок об'єктів зі складною геометрією, до яких відноситься і односклепінчаста станція мілкового закладення із конструкцією «стіна в ґрунті», частіш усього розв'язується

чисельними методами, до яких відноситься і метод скінчених елементів (МСЕ).

### Мета

Метою наукової статті є чисельний аналіз односклепінчастої станції мілкового закладення, склепіння якої має особливу конструкцію (перфоровані залізобетонні блоки). Для цього слід проаналізувати на основі методу скінчених елементів розроблену конструкцію, враховуючи взаємодію із «стіною в ґрунті», а також особливості інженерно-геологічних умов Харківського метрополітену.

### Методика

Модель односклепінчастої станції побудована на основі реальних геометричних розмірів на основі розрахункового професійного комплексу Structure CAD for Windows, version 7.29 R.3 (SCAD) (рис. 1).

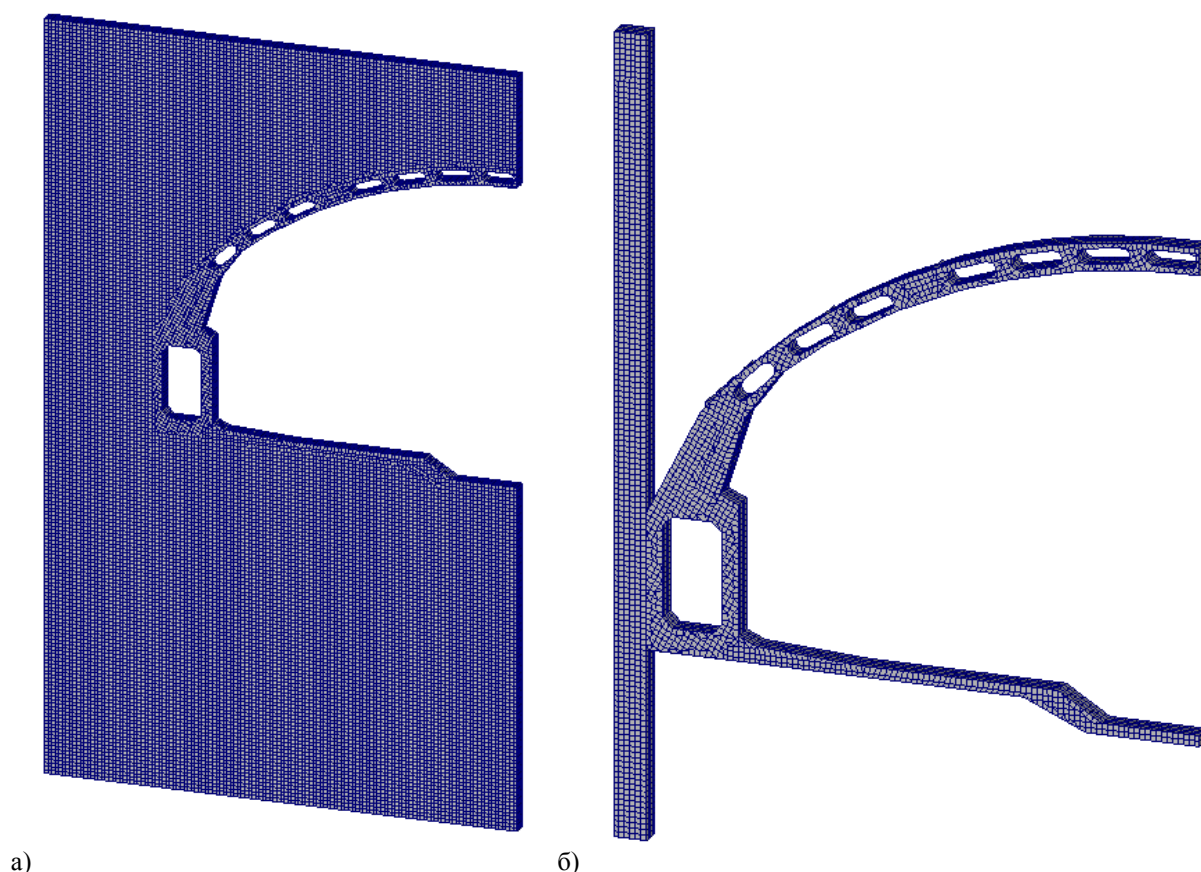


Рис. 1. Скінченно-елементна модель односклепінчастої станції із оточуючим масивом (а) та фрагмент моделі – конструкція станції із «стіною в ґрунті» (б)

## МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

В моделі відтворено половину конструкції односклепінчастої станції із конструкцією «стіл в ґрунті» (див. рис. 1). Модель основана на об'ємних скінченних елементах (111 795 вузлів, 87 980 скінченні елементи) і більш повно відображає взаємодію станції із оточуючим масивом.

До скінченно-елементної моделі присвоєні такі деформаційні характеристики моделі:

Жорсткість 1 (насіпні ґрунти) – модуль пружності  $E=21$  МПа, коефіцієнт Пуассона  $\mu=0,3$ , густина  $\rho=1,93$  т/м<sup>3</sup>;

Жорсткість 2 (суглинок лесоподібний) – модуль пружності  $E=15$  МПа, коефіцієнт Пуассона  $\mu=0,3$ , густина  $\rho=1,89$  т/м<sup>3</sup>;

Жорсткість 3 (пісок водонасичений) – приведений модуль пружності  $E=28$  МПа, приведений коефіцієнт Пуассона  $\mu=0,2$ , густина  $\rho=2,65$  т/м<sup>3</sup>;

Жорсткість 4 (алеґрит зеленувато-сірий) – приведений модуль пружності  $E=20$  МПа, приведений коефіцієнт Пуассона  $\mu=0,3$ , густина  $\rho=2,59$  т/м<sup>3</sup>.

Жорсткість 5 (бетон В30) – модуль пружності  $E=32500$  МПа, коефіцієнт Пуассона  $\mu=0,02$ , густина  $\rho=2,45$  т/м<sup>3</sup>.

Жорсткість 6 (залізобетон на основі бетону В30) – модуль пружності  $E=38500$  МПа, приведений коефіцієнт Пуассона  $\mu=0,2$ , густина  $\rho=2,5$  т/м<sup>3</sup>.

Після надання деформаційних характеристик на модель накладалися граничні умови:

- по нижній границі моделі – заборона по осях X; Y; Z;
- по боках моделі (вздовж боків, які паралельні осі тунелю) – заборона по осях X та Y (по осі симетрії – заборона по осі X);
- по торцях моделі (сторони, які перпендикулярні осі X) – заборона по осі Y.

Після цього виконувався розрахунок на сумісну дію власної ваги моделі і рухоме навантаження НК-80, і його результати піддавалися ґрунтовному аналізу.

### Результати

На рис. 2-4 надані параметри загального напружено-деформованого стану моделі (в перерізі під рухомим навантаженням). Аналіз загальних переміщень свідчить про те, що макси-

мальні переміщення замка станції по вертикальній осі (глобальна ось моделі Z) становлять близько 196,25 мм (з поправкою на осідання моделі, тобто осідання замка знаходиться як різниця переміщення в замку і лотку), а горизонтальні переміщення (глобальна ось моделі X) симетричні і становлять до 4,02 мм, що може вважатися нормальним розподілом переміщень.

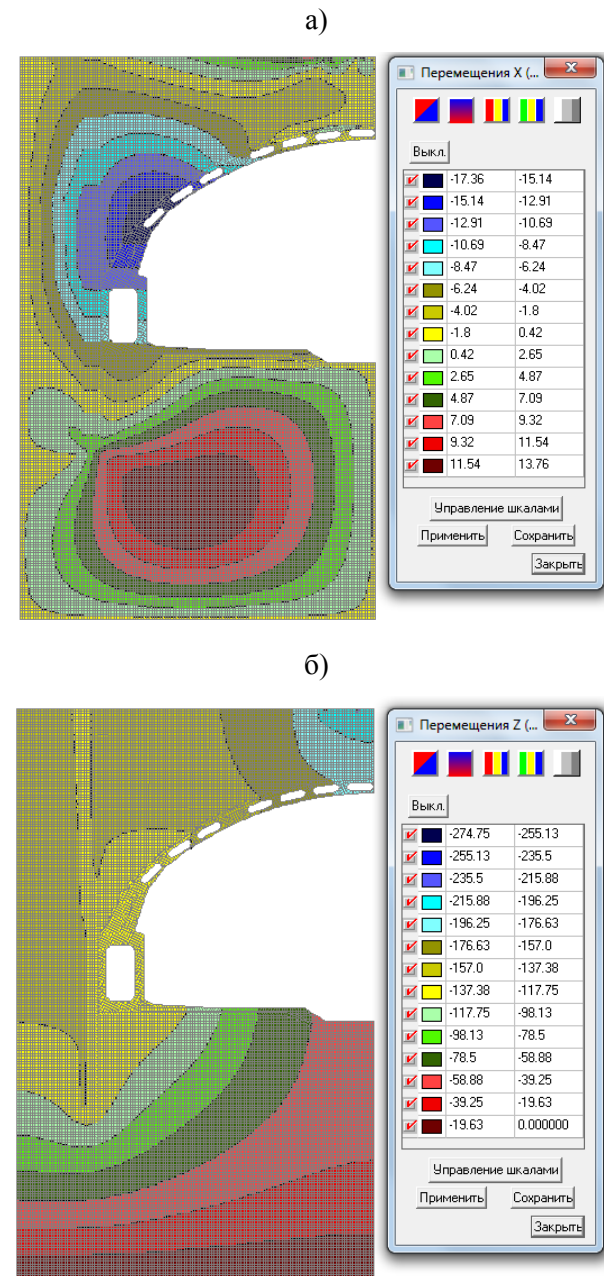


Рис. 2. Ізополя та ізолінії переміщень в моделі від власної ваги та рухомого навантаження НК-80: а) горизонтальних (по осі X); б) вертикальних по осі Z

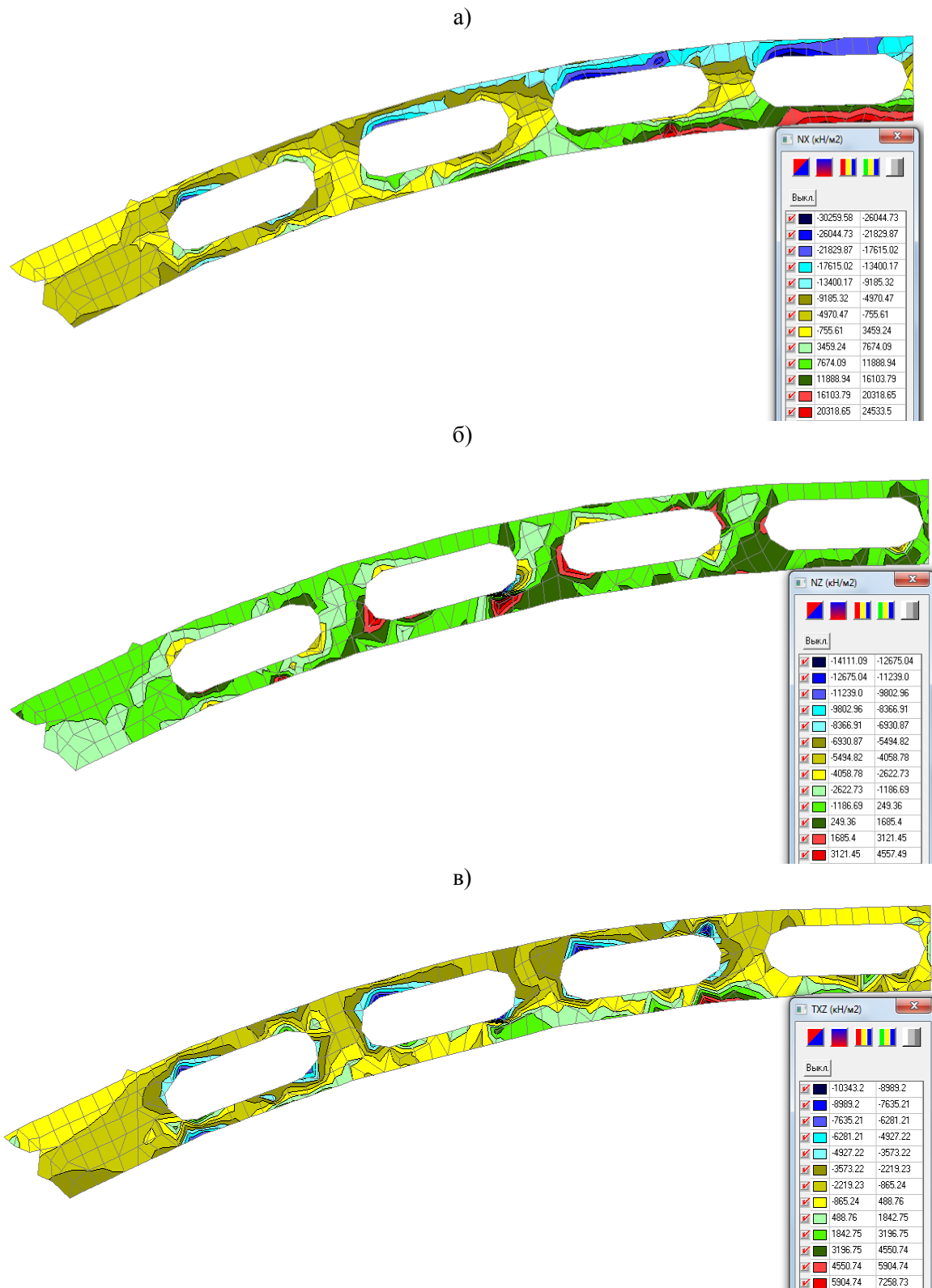


Рис. 3. Ізополя та ізолінії напружень в фрагменті моделі (права частина верхнього склепіння) від власної ваги та рухомого навантаження НК-80:  
а) нормальних по осі X; б) нормальних по осі Z; в) дотичних в площині XZ

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

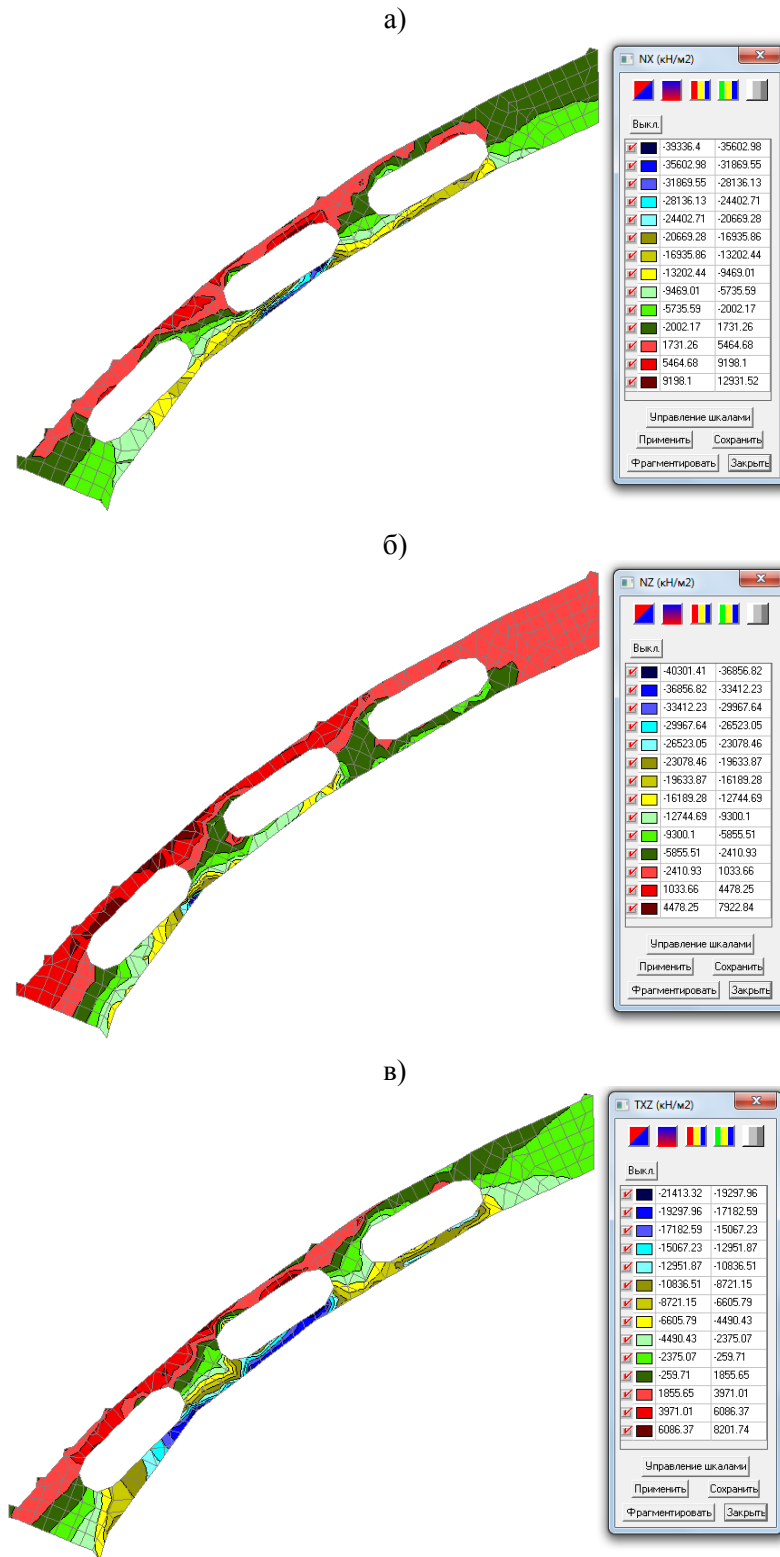


Рис. 4. Ізополя та ізолінії напружень в фрагменті моделі (ліва частина верхнього склепіння) від власної ваги та рухомого навантаження НК-80:  
а) нормальних по осі X; б) нормальних по осі Z; в) дотичних в площині XZ

Частина деформованого стану, яка викликана впливом рухомого навантаження НК-80, значна. Так, переміщення замка станції по вертикальній осі (глобальна ось моделі Z) становлять близько 47,4 мм (близько 24,5 % від загальних навантажень від комбінації «власна вага + рухоме навантаження НК-80»).

При цьому максимальні горизонтальні переміщення (глобальна ось моделі X) становлять 8,94 мм (в сполученні стіни та п'яти склепіння), що відповідає нормативним значенням.

Як видно із аналізу рис. 3-4, перевірку на міцність слід провести в декількох точках (рис. 5).

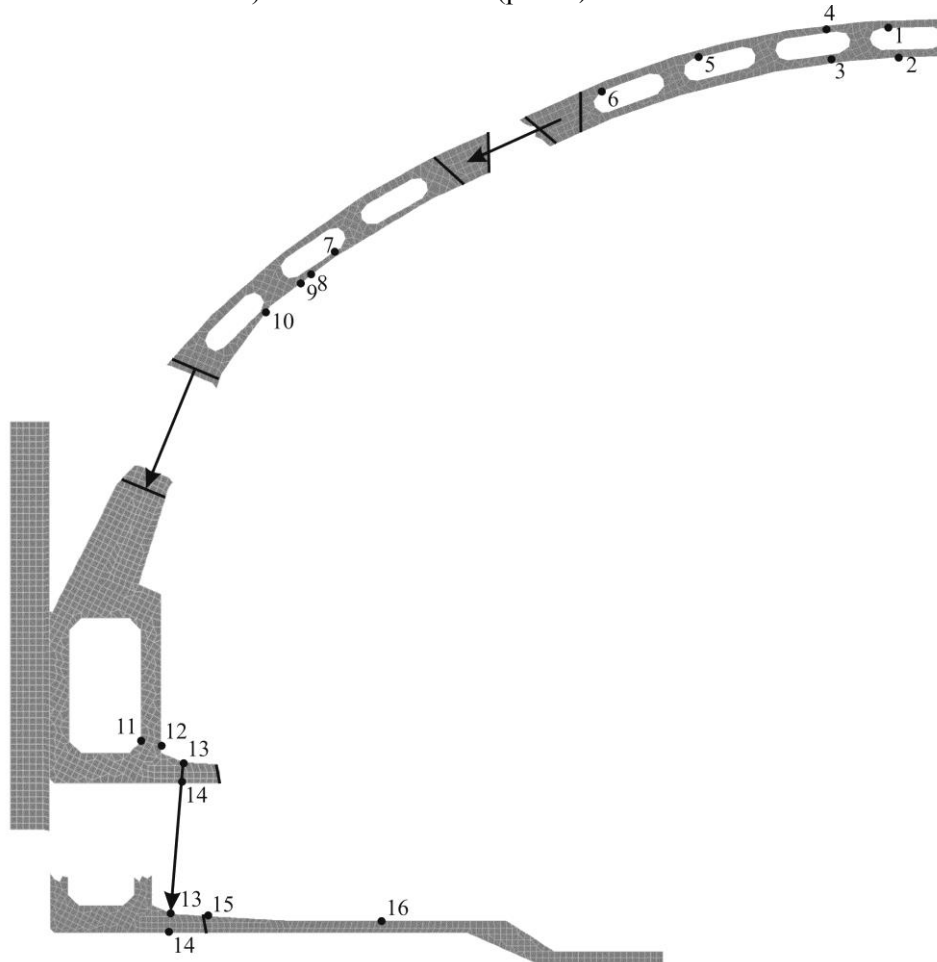


Рис. 5. Схема точок концентрації напружень

Для подальшого розрахунку конструкції на міцність, який буде проводитися лише по бетону, тобто на тріщиностійкість, застосуємо формулу четвертої теорії міцності (енергетична), виразом для якої є:

$$\sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_x \sigma_z + \sigma_z^2 + 3\tau_{xz}^2} \leq [\sigma],$$

де  $\sigma_x$  та  $\sigma_z$  – компоненти нормальних напружень по глобальних осях X та Z;  $\tau_{xz}$  – дотична компонента в площині XZ;  $[\sigma]$  – межа міцності матеріалу, розрахункове значення опору для бетону В30 –  $[\sigma] = 21,0$  МПа.

Розрахунок за еквівалентними напруженнями проведемо у вигляді табл. 1 і 2, які наводяться нижче. Як видно із них, еквівалентні напруження в точках концентрації 7-10 та 12 і 15 від власної ваги дещо перевищують значення розрахункового опору бетону В30 на стиск, оскільки значення запасів міцності коливається в них на рівні 0,6...0,7, а в точці концентрації 13 (місце з'єднання зворотного склепіння та опори) навіть має значення 0,4. Відповідно, слід наголосити про можливість локального тріщиноутворення у вказаних точках.

## МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

Таблиця 1

## Розрахунок еквівалентних напружень за четвертою теорією міцності від власної ваги

Номер точки	Напруження, МПа			Еквівалентне напруження, МПа / Запас міцності
	Нормальне по осі X	Нормальне по осі Z	Дотичне в площині XZ	
Точка 1	-10,01	-0,35	-1,1	10,37/1,6
Точка 2	8,24	0,43	0,99	8,64/2,0
Точка 3	8,24	-0,74	0,57	7,96/2,1
Точка 4	-10,01	0,82	-1,52	9,98/1,7
Точка 5	-8,71	-1,52	-2,77	10,7/1,6
Точка 6	-8,71	-2,31	-3,18	11,47/1,5
Точка 7	-17,58	-9,12	-9,74	28,93/0,6
Точка 8	-17,58	-7,46	-9,74	27,94/0,6
Точка 9	-10,74	-7,46	-10,95	24,72/0,7
Точка 10	-8,46	-17,38	-9,74	28,38/0,6
Точка 11	-5,93	7,60	1,73	7,54/2,3
Точка 12	-9,91	-14,69	11,63	29,42/0,6
Точка 13	-33,78	-6,59	11,63	42,58/0,4
Точка 14	17,94	-2,54	1,73	17,08/1,0
Точка 15	-21,84	-2,54	-2,76	23,7/0,7
Точка 16	9,99	1,52	-1,45	11,12/1,5

Таблиця 2

## Розрахунок еквівалентних напружень за четвертою теорією міцності від власної ваги та рухомого навантаження НК-80

Номер точки	Напруження, МПа			Еквівалентне напруження, МПа / Запас міцності
	Нормальне по осі X	Нормальне по осі Z	Дотичне в площині XZ	
Точка 1	-30,26	-1,19	-3,57	31,49/0,5
Точка 2	28,75	1,69	3,20	30,15/0,6
Точка 3	28,75	-2,62	-0,87	27,58/0,6
Точка 4	-26,05	4,56	-4,93	25,56/0,7
Точка 5	-21,83	-4,06	-8,99	28,71/0,6
Точка 6	-21,83	-5,50	-8,99	29,48/0,6
Точка 7	-35,60	-19,63	-21,41	61,05/0,3
Точка 8	-35,60	-12,74	-19,3	54,78/0,3
Точка 9	-20,67	-12,74	-19,3	44,39/0,4
Точка 10	-13,20	-36,86	-17,18	53,9/0,3
Точка 11	-6,22	15,43	1,07	13,57/1,3
Точка 12	-15,77	-18,62	-9,84	34,34/0,5
Точка 13	-34,87	-5,22	15,62	46,45/0,4
Точка 14	22,44	-2,9	1,07	21,28/0,8
Точка 15	-30,1	-2,9	2,99	32,07/0,5
Точка 16	12,89	2,33	-1,74	14,52/1,2

Аналіз комбінації власної ваги та рухомого навантаження НК-80 свідчить про те, що лише в точках 11 та 16 запас міцності є більшим за одиницю, у всіх інших точках відбувається значне тріщиноутворення, особливо в точках концентрації 7-10 та 13, в яких значення запасу міцності дорівнює 0,3, причому напруження охоплюють значну зону бетону.

### Наукова новизна та практична значимість

На основі проведеного чисельного аналізу отримано значення напружено-деформованого стану при комбінації власної ваги та рухомого навантаження НК-80, а також із виокремленням долі останнього. Отримані результати свідчать про потребу у перегляді конструкції станції мілкого закладення, склепіння якої має особливу конструкцію (перфоровані залізобетонні блоки).

Практична значимість проведеної наукової роботи полягає в отриманні результатів, які вказують вектор розвитку станційних конструкцій Харківського метрополітену.

### Висновки

Проаналізувавши ситуацію перенапруження станційної конструкції та появу зон тріщиноутворення у випадку дії комбінованого навантаження, можна зробити такі висновки і надати такі рекомендації:

1) оскільки в обох випадках завантаження основними зонами тріщиноутворення є концентратори 7-10, тобто місця в отворах збірних блоків верхнього склепіння, як рекомендаційну міру слід втілити нову конструкцію склепіння, а саме суцільну;

2) основними концентраторами напружень в нижній частині конструкції є точки 13 та 15 на ламаній поверхні зворотного склепіння, що пояснюється його геометричними розмірами, зокрема недостатньою товщиною (20 см). Як рекомендаційну міру слід втілити нову конструкцію зворотного склепіння, а саме подвійну монолітну та збірно-монолітну підвищеної товщини, яка застосовується при підвищеному гідростатичному тиску;

3) як рекомендаційну міру можливо втілити заборону появи рухомого навантаження НК-80 над конструкцією станції, оскільки саме воно викликає значне зменшення запасів міцності елементів станційної конструкції.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- Alkhdour, A., Tiutkin, O., Bannikov, D., & Heletiuk, I. (2023). Substantiating the parameters for a non-circular structure of the mine shaft under construction in a heterogeneous rock massif. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1156, 012008. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1156/1/012008>
- Kolymbas, D. (2005). *Tunnelling and tunnel mechanics*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- 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.
- Radkevych, A., Tiutkin, O., Kuprii, V., & Tkach, T. (2023). Regularities of the stress state of the rock massif around the single-vault station under construction by NATM. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1156, 012009. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1156/1/012009>
- Антонов, О. Ю., & Айвазов, Ю. Н. (1968). Предварительно напряженная обжатием в породе односводчатая конструкция станции метрополитена. *Транспортное строительство*, 9, 56-57.
- Більченко, А. В., & Смолянюк, Н. В. (2021). Причини порушення геотехнологій при будівництві тунелів і метрополітенів. *Вісник Харківського національного автомобільно-дорожнього університету*, 93, 74-82.
- Більченко, А. В., & Смолянюк, Н. В. (2022). Причини появи дефектів конструкцій тунелів метрополітенів, їх вплив на експлуатаційний стан та способи усунення. *Вісник Харківського національного автомобільно-дорожнього університету*, 98, 120-127.
- Карпиловский, В. С., Криксунов, Э. З., Перельмутер, А. В., & al. (2000). *SCAD для пользователя*. Киев: ВВП «Компас».
- Кошелев, Ю. А., & Антонов, О. Ю. (1969). Односводчатая станция, сооружаемая закрытым способом. *Транспортное строительство*, 8, 20-22.
- Перельмутер, А. В., & Сливкер, В. И. (2002). *Расчетные модели сооружений и возможность их анализа*. Київ: Сталь.
- Петренко, В. И., Петренко, В. Д., & Тютюкин, А. Л. (2005). *Современные технологии строительства метрополитенов в Украине*. Дніпропетровськ: Наука і освіта.
- Петренко, В. Д., Тютюкін, О. Л., Харатян, М. В., & Петренко, В. І. (2012). Порівняльний аналіз напруженого стану конструкцій станцій односклепінчастого типу мілкого закладення. *Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика*, 3, 127-131.
- Тютюкін, О. Л. (2020). *Теоретичні основи комплексного аналізу тунельних конструкцій*. Дніпро: Журфонд.



N. V. SMOLIANIUK<sup>1\*</sup>, A. V. BILCHENKO<sup>2</sup>

<sup>1\*</sup> Department of bridges, structures and building mechanics named after V. O. Rosiiskiy, Kharkiv National Automobile and Highway University, Yaroslava Mudrogo St., 25, Dnipro, Kharkiv, 61002, tel. +38 (050) 747 26 04, e-mail nadiksm@yahoo.com, ORCID 0000-0003-4254-8990

<sup>2</sup> Department of bridges, structures and building mechanics named after V. O. Rosiiskiy, Kharkiv National Automobile and Highway University, Yaroslava Mudrogo St., 25, Dnipro, Kharkiv, 61002, tel. +38 (050) 097-248-07-41, e-mail kmksm@ukr.net, ORCID 0000-0001-5077-6235

## NUMERICAL ANALYSIS OF A SINGLE-VAULT STATION OF THE SHALLOW CONTOUR INTERVAL OF THE KHARKIV METRO

**Purpose.** The development of the Kharkiv metro is characterized by the development of new structures and technologies for their construction. The extensive metro system in the city of Kharkiv and the presence of deep and shallow underground stations require scientific substantiation of these complex underground objects. The method of the scientific article is the numerical analysis of a single-vaulted shallow contour interval station, the vault of which has a special design (perforated reinforced concrete blocks). **Methodology.** To achieve the goal, the design of the station with a prefabricated vault and "slurry wall" was analyzed, as well as the engineering and geological conditions of its construction. A finite-element model of a single-vault station of a shallow contour interval was created. The model reproduces the geometric dimensions of the real structure of the Kharkiv metro, the layers of soil in which it is laid, the conditions of adjacency of "slurry wall", as well as perforated vault blocks. The model is based on volumetric finite elements and more fully reflects the interaction of the station with the surrounding massif. The calculation of the finite-element model for the joint effect of the self-weight of the model and the moving load of the NK-80 (combined loading) was carried out. **Findings.** The value of the stress-strain state of a single-vault station of the shallow contour interval was obtained. Analysis of displacements and stresses at concentration points was carried out. The situation of overstressing of the station structure and the appearance of cracking zones in the case of combined load action was revealed. **Originality.** The value of the stress-strain state was obtained with a combination of self-weight and moving load of NK-80, as well as with the separation of the portion of the latter. The obtained results indicate the need to revise the design of the shallow contour interval station, the vault of which has a special design (perforated reinforced concrete blocks). **Practical value.** It consists of the obtained results, which show the vector of development of station structures of the Kharkiv metro.

**Keywords:** metro; single vault type station; numerical analysis; stress-strain state; finite element method

### REFERENCES

- Alkhdour, A., Tiutkin, O., Bannikov, D., & Heletiuk, I. (2023). Substantiating the parameters for a non-circular structure of the mine shaft under construction in a heterogeneous rock massif. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1156, 012008. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1156/1/012008> (in English)
- Kolymbas, D. (2005). *Tunnelling and tunnel mechanics*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. (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)
- Radkevych, A., Tiutkin, O., Kuprii, V., & Tkach, T. (2023). Regularities of the stress state of the rock massif around the single-vault station under construction by NATM. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1156, 012009. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1156/1/012009> (in English)
- Antonov, O. Yu., & Ayvazov, Yu. N. (1968). Predvaritelno napryazhennaya obzhatiem v porodu odnosvodchataya konstruktsiya stantsii metropoliteny. *Transportnoe stroitelstvo*, 9, 56-57. (in Russian)
- Bilchenko, A. V., & Smolianiuk, N. V. (2021). Prychyny porushennia heotekhnolohii pry budivnytstvi tuneliv i metropoliteniv. *Visnyk Kharkivskoho natsionalnoho avtomobilno-dorozhnoho universytetu*, 93, 74-82. (in Ukrainian)
- Bilchenko, A. V., & Smolianiuk, N. V. (2022). Prychyny poiavy defektiv konstruktsii tuneliv metropoliteniv, yikh vplyv na ekspluatatsiyni stan ta sposoby usunennia. *Visnyk Kharkivskoho natsionalnoho avtomobilno-dorozhnoho universytetu*, 98, 120-127. (in Ukrainian)
- Karpilovskiy, V. S., Kriksunov, E. Z., Perelmuter, A. V., & al. (2000). *SCAD dlya polzovatelya*. Kiev: VVP

«Компас». (in Russian)

Koshelev, Yu. A., & Antonov, O. Yu. (1969). Odnosvodchataya stantsiya, sooruzhaemaya zakrytym sposobom. *Transportnoe stroitelstvo*, 8, 20-22. (in Russian)

Perelmuter, A. V., & Slivker, V. I. (2002). *Raschetnye modeli sooruzheniy i vozmozhnost ikh analiza*. Kyiv: Stal. (in Russian)

Petrenko, V. I., Petrenko, V. D., & Tyutkin, A. L. (2005). *Sovremennyye tekhnologii stroitelstva metropolitenov v Ukraine*. Dnipropetrovsk: Nauka i osvita. (in Russian)

Petrenko, V. D., Tiutkin, O. L., Kharatian, M. V., & Petrenko, V. I. (2012). Porivnialnyi analiz napruzhenoho stanu konstruktsii stantsii odnosklepinchastnoho typu milkoho zakladennia. *Mosty ta tuneli: teoriia, doslidzhennia, praktyka*, 3, 127-131. (in Ukrainian)

Tiutkin, O. L. (2020). *Teoretychni osnovy kompleksnoho analizu tunelnykh konstruktsii*. Dnipro: Zhurfond. (in Ukrainian)

Надійшла до редколегії 05.02.2024.

Прийнята до друку 02.03.2024.