

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

УДК 624.191-025.49:528

О. Л. ТЮТЬКІН^{1*}, В. А. МІРОШНИК², І. В. ГЕЛЕТЮК³

^{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 «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

³ Представництво LİMAK, просп. Гагаріна, 7, Дніпро, Україна, 49000, тел. +38 (050) 322 48 43, ел. пошта igeletjuk@limak.com.tr

КОМПЛЕКСНИЙ АНАЛІЗ КОНСТРУКЦІЇ СТОВБУРУ ДНІПРОВСЬКОГО МЕТРОПОЛІТЕНУ

Мета. Будівництво Дніпровського метрополітену, що на сьогодні характеризується високою ефективністю та широким впровадженням нових технологій, довело особливу потребу в пов'язаності передпроектних, проектних та будівельних робіт. Метою наукової статті є виявлення в ході комплексного аналізу конструкції шахтного стовбуру його напружено-деформованого стану, який отримано в ході чисельного аналізу та геодезичного моніторингу. **Методика.** В ході комплексного аналізу стовбуру № 16-біс Дніпровського метрополітену проведено прогностичні розрахунки напружено-деформованого стану. Для цього побудовано скінченно-елементну модель, в якій максимально повно відображено геометричні особливості стовбуру, навантаження на нього та граничні умови. Частиною комплексного аналізу є геодезичний моніторинг, який проводиться під час будівництва стовбуру та в процесі його експлуатації. Роботи включали вимірювання деформацій як в оправі стовбурів, так і на дільницях гірничих виробок, а також на поверхні біля будинків по трасі в зоні впливу виробок, що проходяться. **Результати.** В ході чисельного аналізу конструкції стовбуру № 16-біс Дніпровського метрополітену визначено переміщення та силові фактори (нормальні сили та згинальні моменти). На основі цих результатів підбрано армування елементів оправі стовбуру (буросічна паля, об'язувальна балка, залізобетонний пояс). Значення деформованого стану, отримане із прогностичного аналізу, свідчить про незначні переміщення конструкції, що запроєктована. В ході геодезичного моніторингу зафіксовані горизонтальні та вертикальні деформації оправі стовбура № 16-біс, що були обумовлені впливом міського транспорту та важконавантажених автомобілів. Але значення цих деформацій досягали 1...2 мм, що для їх впливу на будівлі та споруди є в межах норми. **Наукова новизна.** Проведене порівняння деформованого стану, отриманого в ході чисельного аналізу та геодезичного моніторингу, яке довело високу точність прогностичного розрахунку. **Практична значимість.** Результати комплексного аналізу шахтного стовбуру Дніпровського метрополітену надали змогу перевірити конструктивні рішення і забезпечити високу міцність та стійкість оправі із буросічних паль.

Ключові слова: шахтний стовбур; метрополітен; напружено-деформований стан; чисельний аналіз; геодезичний моніторинг

Вступ

Після доволі довгої перерви, спорудження Дніпровського метрополітену перейшло у фазу, яка характеризується не лише високим ступенем активності, а й масованим впровадженням нових технологій, що дозволяють проводити роботи всього циклу швидко, зручно та ефективно. Турецька компанія LİMAK («Представництво Лімак Іншаат Санаі ве Тіджарет Анонім Шіркети») привнесла в проєкт Дніпровського метрополітену власну концепцію, що базується

на значному європейському досвіді. Деякі стратегічні рішення спорудження окремих підземних об'єктів ще потребують аналізу та імплементації в український досвід, однак, можна свідчити, що вони значно його збагатять або навіть внесуть в нього такі зміни, що певною мірою змінять бачення підземного будівництва.

Будівництво першої черги метрополітену в м. Дніпро у другому пусковому комплексі здійснюється вздовж проспекту Яворницького від станції «Вокзальна» до станції «Історичний музей». Експлуатаційна довжина пускової дільни-

ці складає по правому перегінному тунелю 4,231 км (будівельна довжина – 4,331 км), по лівому – 3,99 км (будівельна довжина – 4,035 км). Загальна експлуатаційна довжина тунелю дорівнює 8,221 км і складається з ділянок, різних по рівню будівельної готовності. Ділянки включають в себе стовбури, перегінні та похилі тунелі, станції «Театральна», «Центральна» та «Історичний музей» з обертально-відстійними тупиками і пунктом технічного обслуговування.

Оправа перегінних тунелів споруджується з монолітного залізобетону і має п'ятицентрове коробове окреслення. Спосіб спорудження – NATM (новоавстрійський метод спорудження тунелів). Глибина закладення перегінних тунелів – 40...70 м. Для будівництва та обслуговування другої пускової ділянки додатково споруджуються чотири стовбури (№ 1, № 13 (не побудований), № 15-біс, № 16-біс), які мають в плані еліпсоїдну форму та глибину закладення 53...75 м.

Будівництво об'єктів із значним поперечним перерізом, якими є ці стовбури, потребує особливої пов'язаності передпроектних, проектних та будівельних робіт. Кожен етап створення конструкції шахтного стовбура повинен відповідати за забезпечення високої міцності та стійкості оправи. Конструктивне рішення стовбуру у верхній частині масиву, складеного слабкими гірськими породами, є досить новим, оскільки оправа виконується із буросічних паль. Таке рішення для українського досвіду підземного будівництва вже було певною мірою опробоване при будівництві Київського метрополітену (Петренко, В. І., Петренко, В. Д., & Тютюкін, 2005; Петренко, В. І., & Петренко, В. Д., 2014; Тютюкін, & Мірошник, 2020), але в повному обсязі впроваджене лише зараз, в м. Дніпро.

Така конструкція потребує комплексного аналізу (Tutkin, Petrenko, Petrosian, Miroshnyuk, & Alkhdour, 2018), який складається із прогностичного розрахунку (чисельний аналіз методом скінченних елементів) та технічного (геодезичного) моніторингу. Як відомо, технічний моніторинг – це комплекс робіт, який заснований на натурних спостереженнях за поведінкою конструкцій, що зводяться, а також їх основи, масиву, геологічного середовища в мульдї зсунення, конструкцій будівель і споруд, що відповідають за безпеку будівництва, реконструкції та нача-

льного етапу експлуатації будинків (ДСТУ-Н Б В.1.2-17:2016, 2016).

Виконання деформаційних досліджень базується на встановленні реперів – геодезичних або маркшейдерських знаків, що жорстко укріплюються на породному оголенні або на оправі тунелю та змінюють своє планово-висотне положення внаслідок різних видів деформацій (ДБН В.1.3-2:2010, 2010). Всі дослідження проводяться на основі геодезично-маркшейдерських спостережень, тобто вимірювань геометричних параметрів об'єкта або його частин в процесі будівництва та експлуатації.

Об'єктом моніторингу є конструкції цих стовбурів, а метою є контроль та оцінка поведінки оправи під час спорудження та кріплення вертикальних виробок, визначення впливу на оправи навколостовбурних виробок і перегінних тунелів, а також забезпечення нормального функціонування обладнання, механізмів та будівельної техніки на будівельному майданчику за рахунок своєчасного виявлення критичних деформацій кріплення стовбурів.

Мета

Метою наукової статті є виявлення в ході комплексного аналізу конструкції шахтного стовбура його напружено-деформованого стану (НДС), який отримано в ході чисельного аналізу та геодезичного моніторингу. В комплексний аналіз входять чисельний, що надає прогностичні результати НДС, та геодезичний моніторинг, в ході якого проводиться контроль запланованих під час проектування деформацій як оправи стовбура, так і будівель і споруд, що знаходяться в зоні його впливу.

Методика

Чисельний аналіз. Для отримання даних, що дозволяють прогнозувати стан шахтного стовбура, проведено чисельний аналіз його конструкції за допомогою методу скінченних елементів в комплексі SCAD (Карпиловский, Криксунов, Перельмутер, А. В., & al., 2000; Перельмутер, & Сливкер, 2002). Такі розрахунки виконані для усіх чотирьох стовбурів Дніпровського метрополітену, але в рамках даної статті наведено результати лише для вже побудованого стовбура № 16-біс, глибина якого від гирла до вибою складає 52,5 м. Поперечний переріз стовбура та його розміри (по осям – 10 на

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

12 м), на відміну від класичних колового окреслення діаметром до 6,0 м надають змоги відкриття широкого фронту робіт та оперативного вивантаження породи, зруйнованої буровибуховим способом (рис. 1).

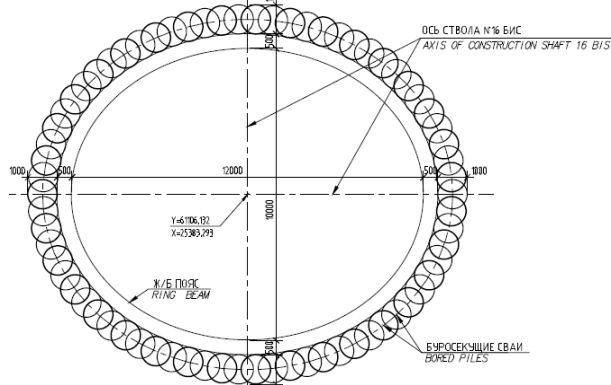


Рис. 1. Поперечний переріз стовбура № 16-біс

Прийнята висота скінченного елемента дорівнює 0,45 м, після чого скоригована висота верхніх елементів в сторону зменшення (для досягнення глибини) і створена пластинчаста модель стовбура № 16-біс шляхом екструзії стрижневого прототипу (рис. 2).

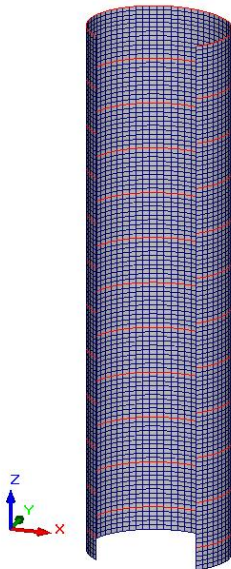


Рис. 2. Фрагмент пластинчастої моделі стовбура № 16-біс (червоним кольором показані встановлені об'язувальна балка і залізобетонні пояси)

У його конструкції передбачена постановка одинадцяти залізобетонних поясів поперечним перерізом $0,5 \times 0,5$ м на наступних відстанях від гирла: 5,22 м (пояс № 1 від рівня низу об'язувальної балки поперечним перерізом

$1,0 \times 1,2$ м), 4,5 м (пояса №№ 2-11 до середньої лінії пояса). У моделі залізобетонні пояси із визначеним поперечним перерізом були змодельовані у вигляді стрижневих еліптичних кілець з проектними параметрами.

Після створення моделі їй присвоювалися граничні умови і деформаційні характеристики. Оскільки система із буросічних паль спирається на малодеформуєму основу (плагіограніт), то досить надати моделі граничну умову, що забороняє переміщення по вертикальній осі (вісь Z комплексу SCAD) (Тют'кін, 2020). Деформаційні характеристики, які присвоювалися пластинам, що моделюють бетонні буросічні палі, стержням, що моделюють об'язувальну балку і залізобетонні пояси поперечним перерізом прийняті наступні: бетон класу В30 з модулем пружності $E_b = 32,5 \cdot 10^3$ МПа і розрахунковим опором на стиск $R_b = 15,5$ МПа.

Після завдання деформаційних характеристик, до моделі стовбура № 16-біс було докладено чотири навантаження: 1) власна вага системи із буросічних паль; 2) навантаження від навколишнього ґрунту; 3) гідростатичне навантаження; 4) тимчасове навантаження від крана CESAN Crane & Components. Маса крана – 47 т, корисне навантаження – 30 т, загальна маса – 77 т. Тиск передається на 4 візки: $77/4 = 19,25$ т. Візок має два колеса: $19,25/2 = 9,625$ т, навантаження передається на площу підкранової балки $0,5 \cdot 1,0 = 0,5$ м². Гідростатичне навантаження розраховувалося як твір висоти води на її щільність (ДБН В.2.3-7:2018 (2018)). Водоносний горизонт біля стовбура № 16-біс знайдений на глибині 46,5 м, отже, потужність підземних вод дорівнює 6,0 м. Відповідно, горизонтальна складова гідростатичного тиску дорівнює $q_w = 6 \cdot 10 = 66$ кН/м².

Проведено розрахунок на поєднання навантажень, які характерні для даної розрахункової ситуації. Використане таке поєднання з коефіцієнтами надійності за граничним навантаженням (табл. 5.1, 6.1, ДБН В.1.2-2: 2006 (2006)): 1,1 (власна вага) + 1,1 (навантаження від навколишнього ґрунту) + 1,1 (гідростатичне навантаження) + 1,05 (тимчасове навантаження). Після завдання поєднання навантажень, проводиться розрахунок скінченно-елементної моделі системи із буросічних паль мультифронтальним методом.

Геодезичний моніторинг. Роботи з моніторингу поверхні під час будівництва вертикальних виробок Дніпровського метрополітену проводяться на основі коригованого проекту «Будівництво першої черги метрополітену в м. Дніпрі» і програми робіт, що розроблена компанією LІMAK.

Сутність моніторингу обумовлена проведенням геодезичних робіт на ділянках метрополітену в м. Дніпрі, що споруджується. Ці роботи включали вимірювання деформацій як в оправі стовбурів, так і на ділянках гірничих виробок, а також на поверхні біля будинків по трасі в зоні впливу виробок, що проходяться.

В склад моніторингу входять: 1) інженерно-технічне обстеження конструкцій стовбурів; 2) проведення геодезично-маркшейдерських вимірювань деформацій конструкцій стовбурів та визначення впливу нерівномірних деформацій на тимчасові будівельні конструкції і механізми; 3) питання впливу прохідницьких робіт на будівлі та споруди, а також деформування поверхні (ДБН В.1.2-5:2007 (2007)).

Роботи проводилися за допомогою електронних тахеометрів Leica TS 09 та TS 16 і нівелірів Leica LS 10 та Leica Sprinte. При цьому на всіх поверхнях розміщувалися осадочні деформаційні марки, за допомогою яких знаходили середнє значення деформацій у часі за формулою:

$$Z_{сер} = \frac{\sum(Z_1 \dots Z_n)}{n} \quad (1)$$

де $Z_1 \dots Z_n$ – деформації в марках.

Після визначення за формулою (1), знаходили середньо квадратичні відхилення показників в марках:

$$m_z = \sqrt{\frac{\sum(\delta_i^2 - \delta_n^2)}{n-1}}, \quad (2)$$

де $\delta_n = Z_{сер} - Z_n$. У всіх розрахунках помилка, що очікується, не повинна перевищувати $3m_z$.

Геодезично-маркшейдерський моніторинг стовбурів проводиться шляхом регулярних вимірювань їх деформацій, моніторинг технічного стану – шляхом періодичних обстежень з урахуванням результатів геодезично-

маркшейдерського моніторингу. Початок моніторингу співпадає із початком будівництва стовбурів та продовжується під час їх спорудження із продовженням робіт по проходці та зведенню білястовбурних виробок і перегінних тунелів в межах зони впливу на конструкції стовбура.

Геодезичні вимірювання поділені на дві групи: 1) визначення горизонтальних зміщень; 2) вимірювання осідання конструкції стовбура. В процесі моніторингу визначаються абсолютне, максимальне та середнє осідання, швидкість їх розвитку; відносне нерівномірне осідання; горизонтальні переміщення (зсуви); деформації окремих будівельних конструкцій (під час розвитку нерівномірних деформацій).

Пункти спеціальної інженерно-геодезичної сітки (настінні та ґрунтові репери) розміщуються з урахуванням зручності доступу, вимірювань та мінімізації витрат часу, матеріалів і дотриманням вимог моніторингу. Положення деформаційних марок в стовбурі № 16-біс наведено на рис. 3.

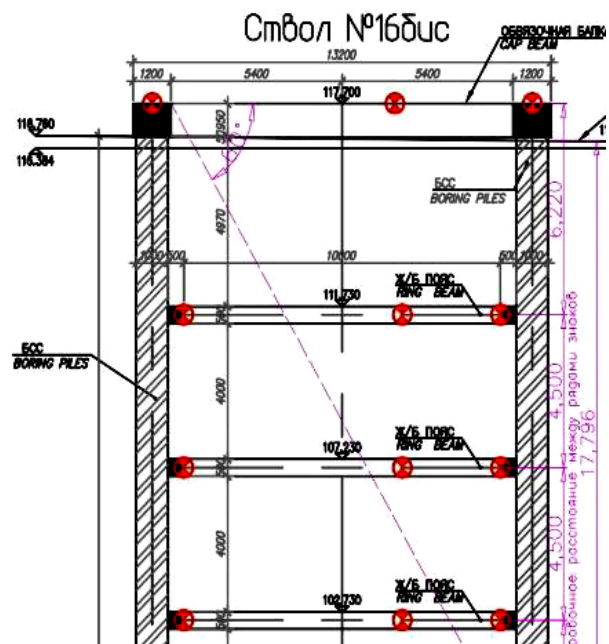


Рис. 3. Схема розміщення деформаційних марок на верхній частині стовбура № 16-біс

Планово-висотна основа повинна спиратися на опорні пункти і репери, які закладені за межами зони впливу підземних прохідницьких робіт. Місцезположення знаків, глибина їх закладення призначаються в залежності від мето-

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

дів вимірювань та з урахуванням інженерно-геологічних умов. Опорні пункти (планові) та репери (висотні) закладаються «кущами» по три знаки і можуть бути суміщені. «Кущі» опорних пунктів закладаються через 400...500 м.

Результати

Чисельний аналіз. Результати розрахунку (переміщення по двом компонентам та силові фактори для двох осей) для оболонки з буросічних паль діаметром 1,0 м наведені на рис. 4.

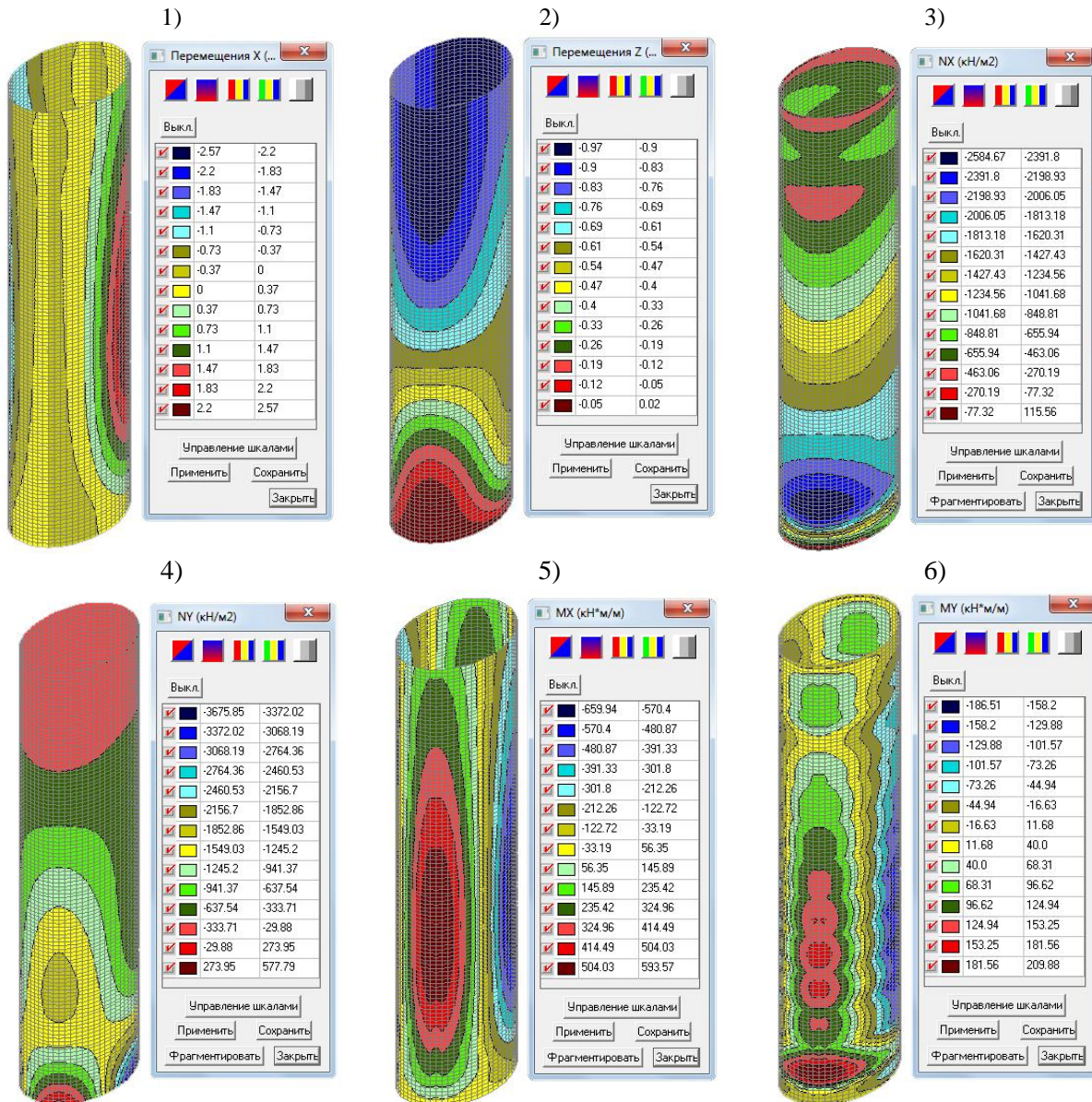


Рис. 4. Переміщення та силові фактори в оболонці з буросічних паль діаметром 1,0 м:

- 1) горизонтальні переміщення (вісь X), мм; 2) вертикальні переміщення (вісь Z), мм;
- 3) нормальні сили (вісь X), кН/м; 4) нормальні сили (вісь Y), кН/м;
- 5) згинальні моменти (вісь X), кН·м/м; 6) згинальні моменти (вісь Y), кН·м/м

Після аналізу результатів визначені максимальні значення силових факторів в оболонці з буросічних паль: 1) нормальні сили (вісь X) – -2584,7 кН/м (в області 11 залізобетонного пояса); 2) нормальні сили (вісь Y) – -3675,9 кН/м

(обріз системи з буросічних паль); 3) згинальні моменти (вісь X), кН·м/м: негативні – -659,9 кН·м/м; позитивні – 593,6 кН·м/м (в області 7-9 залізобетонних поясів); 4) згинальні моменти (вісь Y), кН·м/м: негативні – -186,5 кН·м/м (в

області 6-8 залізобетонних поясів); позитивні – 209,9 кН·м/м (в області 11 залізобетонного пояса). Результати розрахунку для обв'язувальної

балки поперечним перерізом 1,0×1,2 м наведені на рис. 5.

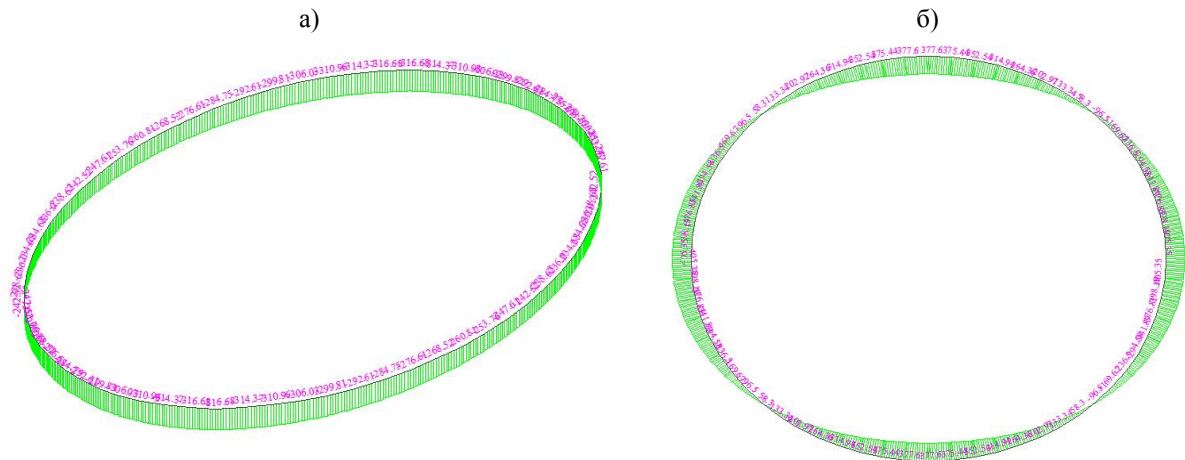


Рис. 5. Епюри розподілу нормальних сил (а) і згинальних моментів (б) в обв'язувальній балці

Максимальні силові фактори в обв'язувальній балці наступні: нормальна сила – -316,7 кН, згинальний момент – 377,6 кН·м. Після розрахунку силових факторів для буросічної палі діаметром 1,0 м отримана загальна площа арматурних стержнів 98,2 см² і прийняті 20 штук стержнів Ø25 арматури класу А500С; для обв'язувальної балки поперечним перерізом 1,2×1,0 (h) отримана загальна площа арматурних стержнів 88,4 см² і прийняті 18 штук стержнів арматури Ø25 класу А500С; для залізобетонного пояса № 7 отримана загальна площа арматурних стержнів 24,63 см² і прийняті 16 штук стержнів арматури Ø14 класу А500С.

Геодезичний моніторинг. Деформації, що були зафіксовані на оправі стовбуру № 1, були незначними або практично відсутніми, оскільки оправа стовбуру та її конструкція із обв'язувальними балками мала значні геометричні розміри і прогнозовано не мала можливості розвитку значних деформацій. Разом з тим були зафіксовані горизонтальні та вертикальні деформації оправы стовбура № 16-біс, що були обумовлені впливом міського транспорту та важконавантажних автомобілів. Але значення цих деформацій досягали 1...2 мм, що для їх впливу на будівлі та споруди є в межах норми. Порівняння даних геодезичного моніторингу свідчить про співпадіння із горизонтальними деформаціями, отриманими в ході чисельного аналізу (див. рис. 4, деформації складають 1...2 мм, із максимальним значенням 2,57 мм в області 7-9 залізобетонних поясів).

Наукова новизна та практична значимість

Проведене порівняння деформованого стану, отриманого в ході чисельного аналізу та геодезичного моніторингу, яке довело високу точність прогностичного розрахунку. Результати комплексного аналізу шахтного стовбуру Дніпровського метрополітену надали змогу перевірити конструктивні рішення і забезпечити високу міцність та стійкість оправы із буросічних паль.

Висновки

Підземне будівництво в Україні, особливо в області спорудження об'єктів метрополітенів, відчуває значний вплив іноземного досвіду, який донині ще складно засвоюється будівельною індустрією. Однак новітні технології, які вже апробовані в Європі та набули широкого поширення, застосовуються саме тому, що їх основи отримали наукове обґрунтування. Дніпровський метрополітен сьогодні є лабораторією нових рішень, які, як на прикладі матеріалів даної наукової статті про комплексний аналіз шахтних стовбурів, є виваженими, ефективними та прогресивними.

Отримання репрезентативної інформації про НДС конструкцій підземних споруд на передпроектній та проектній стадіях (прогнози розрахунку) в комплексі із контролем (технічний моніторинг під час будівництва та експлуатації) є запорукою нормальної їх роботи довгий час.

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- Tiutkin, O., Petrenko, V., Petrosian, N., Mirosnyk, V., & Alkhdour, A. (2018). Controlling stress state of a hoisting shaft frame in the context of specific freezing process, *Mining of Mineral Deposits*, 12 (4), 28-36.
- ДБН В.1.2-2:2006 (2006). Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Навантаження і впливи. Норми проектування. Київ: Мінбуд України.
- ДБН В.1.3-2:2010 (2010). Геодезичні роботи у будівництві. Київ: Мінрегіонбуд України.
- ДБН В.1.2-5:2007 (2007). Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Науково-технічний супровід будівельних об'єктів. Київ: Мінбуд України.
- ДБН В.2.3-7:2018 (2018). Метрополітени. Основні положення. Київ: Мінрегіонбуд України.
- ДСТУ-Н Б В.1.2-17:2016 (2016). Настанова щодо науково-технічного моніторингу будівель і споруд. Київ: Мінрегіонбуд України.
- Карпиловский, В. С., Криксунов, Э. З., Перельмутер, А. В., & al. (2000). *SCAD для пользователя*. Киев: ВВП «Компас».
- Перельмутер, А. В., & Сливкер, В. И. (2002). *Расчетные модели сооружений и возможность их анализа*. Киев: Сталь.
- Петренко, В. И., & Петренко, В. Д. (2014). Обоснование параметров химического закрепления грунтов при строительстве Киевского метрополитена. *Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика*, 4, 60-66.
- Петренко, В. И., Петренко, В. Д., & Тютюкин, А. Л. (2005). *Современные технологии строительства метрополитенов в Украине*. Дніпропетровськ: Наука і освіта.
- Тютюкін О. Л. (2020). *Теоретичні основи комплексного аналізу тунельних конструкцій*. Дніпро: Журфонд.
- Тютюкін, О. Л., & Мірошник, В. А. (2020). Порівняльний аналіз спеціальних способів під час проходки вертикальних виробок. *Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика*, 17, 81-90.

O. L. TIUTKIN^{1*}, V. A. MIROSHNYK², I. V. HELETIUK³

^{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 alexeytiutkin@gmail.com, ORCID 0000-0003-4921-4758

² 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

³ LIMAK Office, Naharin Ave., 7, Dnipro, Ukraine, 49000, tel. +38 (050) 322 48 43, e-mail igeletjuk@limak.com.tr

COMPREHENSIVE ANALYSIS OF THE SHAFT STRUCTURE OF THE DNIPRO METRO

Purpose. The construction of the Dnipro Metro, which today is characterized by high efficiency and widespread introduction of new technologies, has proved the need for predesign, design and construction work. The purpose of the scientific article is to identify during the complex analysis of the structure of the mine shaft its stress-strain state, which was obtained during the numerical analysis and geodetic monitoring. **Methodology.** During the complex analysis of the shaft № 16-bis of the Dnipro Metro, prognostic calculations of the stress-strain state were performed. To do this, a finite-element model is built, in which fully reflects the geometric features of the shaft, the load on it and boundary conditions. Part of the comprehensive analysis is geodetic monitoring, which is carried out during the construction of the shaft and during its operation. The works included the measurement of deformations both in the lining of the shafts and in the sections of the mine workings, as well as on the surface near the houses along the route in the area of influence of the working workings. **Findings.** During the numerical analysis of the structure of the shaft № 16-bis of the Dnipro Metro, displacement and force factors (normal forces and bending moments) were determined. Based on these results, the reinforcement of the elements of the shaft lining (bored pile, cap beam, reinforced concrete ring beam) was selected. The value of the deformed state obtained from the prognostic analysis indicates on the insignificant displacements of the designed structure. During the geodetic monitoring, horizontal and vertical deformations of the № 16-bis shaft lining were recorded, which were caused by the influence of public transport and heavy vehicles. But the values of these deformations reached 1 ... 2 mm, which for their effect on buildings and structures is within normal limits. **Originality.** A comparison of the deformed state obtained during numerical analysis and geodetic monitoring, which proved the high accuracy of the prognostic calculation. **Practical**

© О. Л. Тютюкін, В. А. Мірошник, І. В. Гелетюк, 2021

value. The results of a comprehensive analysis of the mine shaft of the Dnipro Metro made it possible to carry out a test the design solution and ensure high strength and stability of the lining made of bored piles.

Keywords: mine shaft; metro; stress-strain state; numerical analysis; geodetic monitoring

REFERENCES

- Tiutkin, O., Petrenko, V., Petrosian, N., Miroshnyk, V., & Alkhdour, A. (2018). Controlling stress state of a hoisting shaft frame in the context of specific freezing process, *Mining of Mineral Deposits*, 12 (4), 28-36. (in English)
- DBN V.1.2-2:2006 (2006). *Systema zabezpechennia nadiinosti ta bezpeky budivelnnykh ob'ektiv. Navantazhennia i vplyvy. Normy proektuvannia*. Kyiv: Minbud Ukrainy. (in Ukrainian)
- DBN V.1.3-2:2010 (2010). *Heodezychni roboty u budivnytstvi*. Kyiv: Minrehionbud Ukrainy. (in Ukrainian)
- DBN V.1.2-5:2007 (2007). *Systema zabezpechennia nadiinosti ta bezpeky budivelnnykh ob'ektiv. Naukovo-tekhnichnyi suprovid budivelnnykh ob'ektiv*. Kyiv: Minbud Ukrainy. (in Ukrainian)
- DBN V.2.3-7:2018 (2018). *Metropoliteny. Osnovni polozhennia*. Kyiv: Minrehionbud Ukrainy. (in Ukrainian)
- DSTU-N B V.1.2-17:2016 (2016). *Nastanova shchodo naukovo-tekhnichnoho monitorynhu budivel i sporud*. Kyiv: Minrehionbud Ukrainy. (in Ukrainian)
- Karpilovskiy, V. S., Kriksunov, E. Z., Perelmutter, A. V., & al. (2000). *SCAD dlya polzovatelya*. Kiev: VVP «Kompas». (in Russian)
- Perelmutter, A. V., & Slivker, V. I. (2002). *Raschetnye modeli sooruzheniy i vozmozhnost ikh analiza*. Kiev: Stal. (in Russian)
- Petrenko, V. Y., & Petrenko, V. D. (2014). Obosnovanye parametrov khymycheskoho zakreplenya hruntov pry stroytelstve Kyevskoho metropolityena. *Mosty ta tuneli: teoriia, doslidzhennia, praktyka*, 4, 60-66. (in Ukrainian)
- Petrenko, V. I., Petrenko, V. D., & Tyutkin, A. L. (2005). *Sovremennyye tekhnologii stroitelstva metropolitenov v Ukraine*. Dnipropetrovsk: Nauka i osvita. (in Russian)
- Tiutkin O. L. (2020). *Teoretychni osnovy kompleksnoho analizu tunelnykh konstruksii*. Dnipro: Zhurfond. (in Ukrainian)
- Tiutkin, O. L., & Miroshnyk, V. A. (2020). Porivnialnyi analiz spetsialnykh sposobiv pid chas prokhodky verikalnykh vyrobok. *Mosty ta tuneli: teoriia, doslidzhennia, praktyka*, 17, 81-90. (in Ukrainian)

Надійшла до редколегії 15.03.2021.

Прийнята до друку 05.04.2021.