

## МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

УДК 624.191-048.77:519.765

О. Л. ТЮТЬКІН<sup>1\*</sup>, М. І. УМАНСЬКА<sup>2</sup>

<sup>1\*</sup> Кафедра «Тунелі, основи та фундаменти», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпропетровськ, Україна, 49010, тел. +38 (066) 290 45 18, ел. пошта tutkin@mail.ru, ORCID 0000-0003-4921-4758

<sup>2</sup> Кафедра «Тунелі, основи та фундаменти», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпропетровськ, Україна, 49010, тел. +38 (095) 900 72 66, ел. пошта: um.marry@gmail.com

### ОПТИМІЗАЦІЯ ГЕОМЕТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ОПРАВИ ПЕРЕГІННИХ ТУНЕЛІВ НА ОСНОВІ МОДИФІКОВАНОГО МЕТОДУ МЕТРОДІПРОТРАНСУ

**Мета.** Застосовуючи модифікований метод Метродіпротрансу необхідно корегувати розроблені моделі таким чином, щоб у подальшому їх застосування надавало результати, які відповідають реальній поведінці оправи тунелю при взаємодії із оточуючим масивом. Це дослідження дозволяє виконати наукове обґрунтування зменшеної товщини оправи із отриманням значного економічного ефекту. **Методика.** Для вирішення задачі оптимізації геометричних параметрів оправи перегінних тунелів застосовано метод Метродіпротрансу, який модифіковано у відповідності із основами методу скінчених елементів. На основі отриманих моментів і нормальних сил виконано розрахунок залізобетонних елементів, побудовано графік та встановлено залежність згинальних моментів та нормальних сил від товщини залізобетонного елемента. **Результати.** Виконані розрахунки довели, що умови міцності виконуються для трьох варіантів, тобто зменшення товщини оправи не призводить до зменшення міцності блоку, що пояснюється можливістю розвитку більших деформацій в сторону ґрунту для більш піддатливої оправи. Розвиток більшого пружного відпору відіграє позитивну роль у формуванні силових факторів, при цьому важливим фактором є зменшення кількості стержнів арматури, що значно зменшує витрати. Можливість застосування Варіанту 3 (товщина елемента – 15 см, кількість арматурних стержнів – 12 штук) із коефіцієнтом запасу 1,6 є найбільш оптимальним для визначених вихідних даних представленої роботи. Таким чином, отримані результати дослідження надають змогу отримання залежностей згинальних моментів та нормальних сил від товщини залізобетонного елемента та обґрунтування геометричних параметрів оправи перегінних тунелів Дніпропетровського метрополітену, однак потребується значний комплекс досліджень для випадків інших інженерно-геологічних умов та зміни матеріалу оправи. Повний комплекс досліджень ставить за мету отримання науково обґрунтованих результатів, які дозволять знизити матеріальні витрати при будівництві Дніпропетровського метрополітену і відповідно заощадити значні грошові кошти. **Наукова новизна.** Отримана залежність згинальних моментів та нормальних сил від товщини залізобетонного елемента, яка дозволяє для визначеного ґрунту виконати оптимізацію геометричних параметрів оправи перегінних тунелів. **Практична значимість.** Запропоновані підходи по зменшенню матеріальних витрат при будівництві Дніпропетровського метрополітену.

*Ключові слова:* оправа; перегінний тунель; метод скінчених елементів; згинальний момент; нормальна сила; міцність

#### Вступ

Оптимізація геометричних параметрів оправи перегінних тунелів, а саме її товщини, є найбільш складною в плані методології задача розрахункових технологій, пов'язаних із механікою підземних споруд [1-3]. Складність дослідження цієї задачі полягає в неоднозначності поведінки оправи в породному масиві, але у разі обґрунтування зменшеної товщини оправи

економічний ефект очікується значним. Таким чином визначення залежностей зміни силових характеристик в оправах, які закладено в різних інженерно-геологічних умовах (від слабких пісків та суглинків до тріщинуватих плагіогранітів), є актуальною задачею.

#### Мета

Для вирішення науково-технічної задачі дос-

## МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

лідження взаємодії оправи перегінного тунелю із оточуючим масивом слід застосувати метод скінченних елементів на основі модифікованого методу Метродіпротрансу [4]. Лише такий підхід надає змогу з'ясувати залежності формування силових факторів оправи із різних матеріалів, оскільки аналіз результатів математичного моделювання виявляє достатню або недостатню адекватність застосованих моделей реальному перегінному тунелю. Користуючись результатами порівняльного аналізу можна корегувати розроблені моделі таким чином, щоб у подальшому їх застосування надавало результати, які відповідають реальній поведінці оправи тунелю при взаємодії із оточуючим масивом [5-8].

### Методика

Загальні положення методу Метродіпротрансу зводяться до наступного [4, 7]. Криволінійний контур нейтральної осі оправи із змінною жорсткістю замінюється вписаним багатокутником. Активні навантаження (гірський тиск, власна вага конструкції тощо) прикладаються у вершинах багатокутника у вигляді зосереджених сил. Порооди, які взаємодіють з оправою в межах відпорної зони, замінюються пружними опорами у вершинах вписаного багатокутника. Відмінністю модифікованого методу Метродіпротрансу від методу Метродіпротрансу є те, що рішення систем і описання невідомих напружень і деформацій виконується не вирізанням вузлу, а рішенням конструкції в цілому. Це можливо за допомогою методу скінченних елементів (МСЕ), який не розбиває конструкцію, а знаходить невідомі, враховуючи зв'язок між частинами. Таким чином, знімається проблема, пов'язана з гіпотезою місцевих деформацій, яка автоматично перетворюється в гіпотезу загальних деформацій. Причому розбивка криволінійної осі тунелю в загальному випадку не обмежується, але підбирається так, щоб відповідати умовам вірної дискретизації. Постановка стержнів по всьому контуру. В першому приближенні – знаходження стержнів, які недопустимо розтягнулись і зруйнувались; в другому – знаходження стержнів з мінімальними зусиллями розтягу.

Дослідження оптимальних розмірів оправи перегінного тунелю спирається на результати розрахунків, які, в свою чергу, поділяються на три етапи: визначення навантажень, розрахунок модифікованим методом Метродіпротрансу і

перевірка оправи на міцність. Навантаження (1 етап) [9] знаходяться для найбільш невідного варіанту – для розріджених і слабких зволожених породах, причому нормативна величина вертикального гірського тиску дорівнює повній вазі порід, що залягають над тунелями:

Для розрахунку оправи методом скінченних елементів на основі модифікованого методу Метродіпротрансу (2 етап) [4, 10, 11] потрібно задатися коефіцієнтом пружного відпору. Приймаємо його рівним  $5 \cdot 10^4$  кН/м<sup>3</sup>, що відповідає коефіцієнту міцності за М. М. Протод'яконовим  $f = 0,4 \dots 0,8$  (I-II категорія порід). Таке мале значення коефіцієнту пружного відпору, тобто пасивної взаємодії, достатньо відповідає активному навантаженню в подібних породах, і таку заміну можна вважати адекватною. Власна вага кільця при розрахунку МСЕ буде враховуватися автоматично [10, 12].

Шляхом відкидання стержнів виконано ітераційний пошук тієї моделі, в крайньому еквівалентному стержні нормальна сила є нульовою, тобто віднайдено границю між активним навантаженням («зона відлипання») і пружним відпором. На рис. 1 наведено модель перегінного тунелю, яка відповідає шостій ітерації.

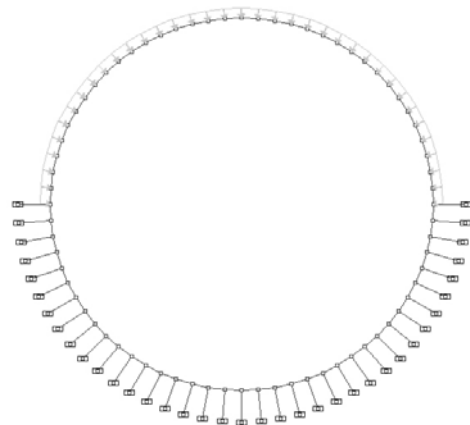


Рис. 1. Розрахункова модель № 6

### Результати

Результатами дослідження є згинальні моменти й нормальні сили, епюри яких наводяться нижче (рис. 2).

Для того, щоб виконати задачу, проведено три розрахунки скінченно-елементної моделі, причому в ній не змінювалися ніякі параметри, окрім товщини оправи  $h$ . В Варіанті 1 товщина складала 25 см, в Варіанті 2 – 20 см, Варіанті 3 – 15 см.

## МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

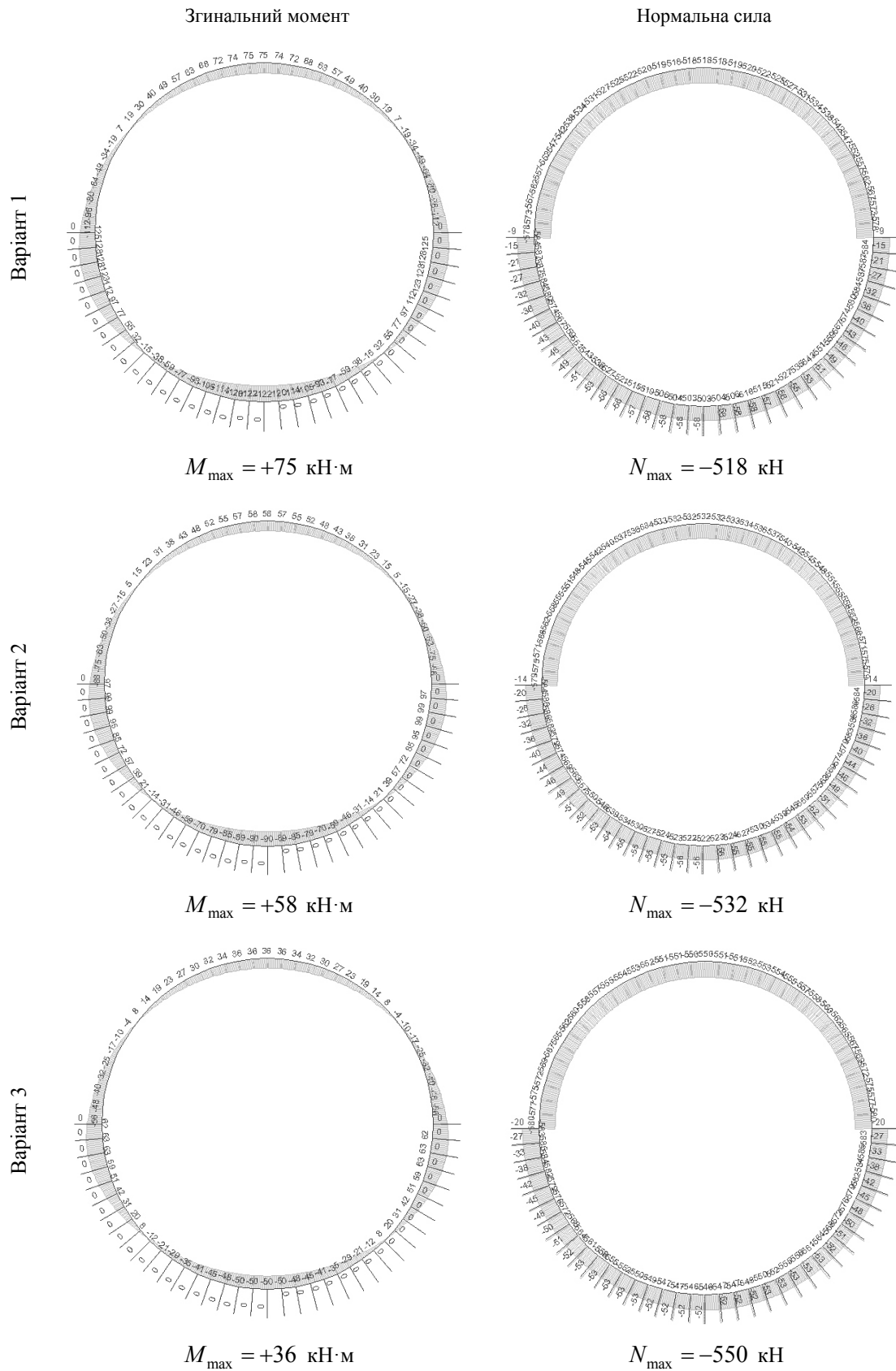


Рис. 2. Епюри згинального моменту і нормальної сили

## МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

Після визначення згинальних моментів і нормальних сил у перерізах оправи з максимальним згинальним моментом проводять перевірку на міцність (3 етап) [6, 7, 13]. У розрахунках кругових оправ найчастіше зустрічається перший випадок позацентрового стиснення, що відповідає великим ексцентриситетам.

Перед проведенням перевірки оправи на міцність виконується її армування, виходячи із правила симетричного армування блока. Мінімальна відстань у світлі між стержнями арма-

тури повинна бути не менша 25 мм. Найбільшу відстань між осями стержнів робочої арматури приймають не більше за 1,5 товщини елемента. Перевірку блоків на міцність проводять за формулою розрахунку перерізів, які працюють у режимі позацентрового стиску). Для автоматизації розрахунку скористаємося програмою, в якій запрограмовані формули з перевірки на міцність елементів оправи із залізобетону (табл. 1 і 2).

Таблиця 1

## Розрахунок на міцність трьох варіантів (геометричні характеристики блоку)

Варіанти	1	2	3
Введіть ширину блока $b$ , м	1,2	1,2	1,2
Введіть висоту блока $h$ , м	0,25	0,2	0,15
Площа поперечного перерізу $A_b$ , м <sup>2</sup>	0,3	0,24	0,18
Кількість стержнів арматури $n$ , штук	18	16	12
Фактична площа арматури $A_s$ , м <sup>2</sup>	0,0046	0,0041	0,0031

Таблиця 2

## Розрахунок на міцність трьох варіантів (Силкові фактори в блоці)

Варіанти	1	2	3
Введіть нормальну силу $N$ , кН	518	532	550
Введіть згинальний момент $M$ , кН*м	75	58	36
Ексцентриситет $e_0$ , м	0,14	0,11	0,07
Розрахунковий опір бетону $R_b$ , кН/м <sup>2</sup>	22000	22000	22000
Розрахунковий опір арматури $R_s$ , кН/м <sup>2</sup>	280000	280000	280000
Ширина стиснутої зони бетону $x$ , м	0,020	0,020	0,021
Повний ексцентриситет $e$ , м	0,24	0,18	0,11
Ліва частина рівняння	124,7	95,8	61,3
Права частина рівняння	232,5	166,5	100,1
Запас міцності $n$	1,9	1,7	1,6
ВИСНОВОК:	Виконується	Виконується	Виконується

## МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

На основі отриманих результатів отримано залежність силових факторів (згинальних моментів і нормальних сил) від зміни товщини оправи, причому апроксимовані лінійним трендом графіки свідчать про високий рівень підбору функції (коефіцієнт  $R^2=0,994$ , тобто близький одиниці) (рис. 3).

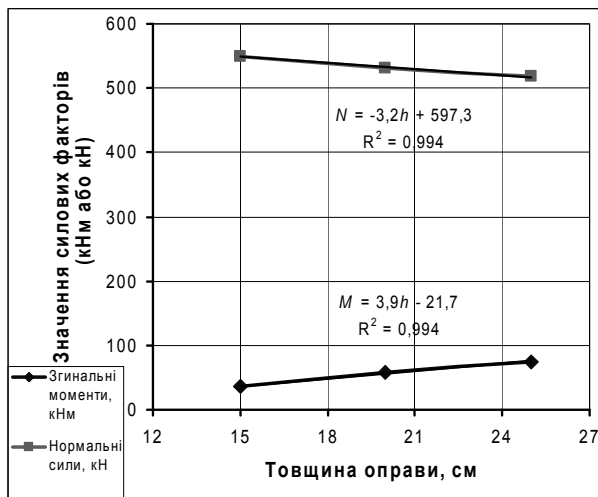


Рис. 3. Графік залежності згинальних моментів та нормальних сил від товщини залізобетонного елемента

### Наукова новизна та практична значимість

В роботі виявлена основна причина можливості оптимізації оправи, тобто її зменшення. Це пояснюється тим, що чим менше товщина оправи, тим менше її жорсткість і відповідно вона може розвивати більші деформації в сторону ґрунту. Це викликає його більший пружний відпір, який відіграє позитивну роль у формуванні силових факторів. Однак, зменшення товщини менше 15 см неможливе, оскільки ця товщина встановлена як найменша товщина для залізобетонного елемента.

### Висновки

Як видно з таблиці умови міцності виконуються для трьох варіантів, тобто зменшення товщини не призводить до зменшення міцності блоку: у Варіанті 1 – 1,9 рази, у Варіанті 2 – 1,7 рази, у Варіанті 3 – 1,6 рази.

При цьому важливим фактором є зменшення кількості стержнів арматури: у Варіанті 1 – 18 штук, у Варіанті 2 – 16 штук, у Варіанті 3 – 12 штук, що значно зменшує витрати на арматуру, яка є найбільш дорогою при створенні

залізобетонних елементів. Можливість застосування Варіанту 3 (товщина елемента – 15 см, кількість арматурних стержнів – 12 штук) із коефіцієнтом запасу 1,6 є найбільш оптимальним для визначених вихідних даних представленої роботи.

Таким чином, отримані результати дослідження надають змогу отримання залежностей згинальних моментів та нормальних сил від товщини залізобетонного елемента та обґрунтування геометричних параметрів оправи перегінних тунелів Дніпропетровського метрополітену, однак потребується значний комплекс досліджень для випадків інших інженерно-геологічних умов та зміни матеріалу оправи. Повний комплекс досліджень ставить за мету отримання науково обґрунтованих результатів, які дозволять знизити матеріальні витрати при будівництві Дніпропетровського метрополітену і відповідно заощадити значні грошові кошти.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Петренко, В. Д. Проблема визначення деформацій оправи перегінних тунелів при суттєвій зміні інженерно-геологічних умов [Текст] / В. Д. Петренко, О. Л. Тютюкін, Є. Ю. Кулаженко // Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика : зб. наук. праць Дніпропетр. нац. ун-ту заліз. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2014. – Вип. 5. – С. 62-69.
2. Sterling R. Underground space design. N-Y, Van Nostrand Reinhold Publ., 1993. 370 p.
3. Moller S. C. Tunnel induced settlements and structural forces in lining. Stuttgart, Sven Christian Moller Publ., 2006. 174 p.
4. Тютюкін, О. Л. Розробка теоретичних основ модифікованого методу розрахунку тунелів колового окреслення [Текст] / О. Л. Тютюкін, В. А. Мірошник // Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика : зб. наук. праць Дніпропетр. нац. ун-ту заліз. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2012. – Вип. 2. – С. 96-100.
5. Tsinidis G., Heron C., Pitilakis K., Madabhushi G. S. Geotechnical, Geological and Earthquake Engineering: Centrifuge modelling of the dynamic behavior of square tunnels in sand. Geotechnical, Geological and Earthquake Engineering, 2015, vol. 35. pp. 509-523. doi: 10.1007/978-3-319-10136-1\_31
6. Айвазов, Ю. М. Проектування метрополітенів [Текст] : у 3 ч. Ч. 1. / Ю. М. Айвазов. – Київ : НТУ, 2006. – 166 с.

## МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

7. Айвазов, Ю. М. Проектування метрополітенів [Текст] : у 3 ч. Ч. 2. / Ю. М. Айвазов. – Київ : НТУУ, 2009. – 216 с.
8. Петренко, В. Д. Обзор аналитических и экспериментальных методов исследования взаимодействия массива и крепи [Текст] / В. Д. Петренко, А. Л. Тюткин, В. И. Петренко // Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика : зб. наук. праць Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2012. – Вип. 1. – С. 75-81.
9. ДБН В.2.3-7-2010. Споруди транспорту. Метрополітени [Текст]. – На заміну ДБН В.2.3-7-2003 ; надано чинності 2011-10-01 – Київ : ДП «Укрархбудінформ», 2011. – 195 с.
10. Перельмутер, А. В. Расчетные модели сооружений и возможность их анализа [Текст] / А. В. Перельмутер, В. И. Сливкер. – Киев : Сталь, 2002. – 600 с.
11. Browell R., Dr. Lin G. The Power of Nonlinear Materials Capabilities. Part 1 of 2 on modeling materials with nonlinear characteristics. ANSYS Solutions Publ., 2000, vol. 2, no 1.
12. David M. P., Zdravkovic L. Finite Element Analysis in Geotechnical Engineering: Theory and Application. Thomas Telford Ltd Publ., 2001. 500 p.
13. Фролов, Ю. С. Метрополитены [Текст] : учеб. для вузов / Ю. С. Фролов, Д. М. Голицынский, А. П. Ледаев. – Москва : Желдориздат, 2001. – 528 с

А. Л. ТЮТКИН<sup>1\*</sup>, М. И. УМАНСКАЯ<sup>2\*</sup>

<sup>1\*</sup> Кафедра «Тоннели, основания и фундаменты», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепропетровск, Украина, 49010, тел. +38 (066) 290 45 18, эл. почта tutkin@mail.ru, ORCID 0000-0003-4921-4758

<sup>2\*</sup> Кафедра «Тоннели, основания и фундаменты», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепропетровск, Украина, 49010, тел. 38 (095) 900 72 66, ел. почта um.marry@gmail.com

## ОПТИМИЗАЦИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ОБДЕЛКИ ПЕРЕГОННЫХ ТОННЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ МОДИФИЦИРОВАННОГО МЕТОДА МЕТРОГИПРОТРАНСА

**Цель.** Применяя модифицированный метод Метрогипротранса необходимо скорректировать разработанные модели таким образом, чтобы в последующем их применение предоставляло результаты, которые отвечают реальному поведению обделки тоннеля при взаимодействии с окружающим массивом. Это исследование позволяет выполнить научное обоснование уменьшенной толщины оправы с получением значительного экономического эффекта. **Методика.** Для решения задачи оптимизации геометрических параметров обделки перегонных тоннелей применен метод Метрогипротранса, который модифицирован в соответствии с основами метода конечных элементов. На основе полученных моментов и нормальных сил выполнен расчет железобетонных элементов, построен график и установлена зависимость изгибающих моментов и нормальных сил от толщины железобетонного элемента. **Результаты.** Выполненные расчеты доказали, что условия прочности выполняются для трех вариантов, то есть уменьшение толщины обделки не приводит к уменьшению прочности блока, что объясняется возможностью развития больших деформаций в сторону грунта для более податливой обделки. Развитие большего упругого отпора играет позитивную роль в формировании силовых факторов, при этом важным фактором является уменьшение количества стержней арматуры, что значительно уменьшает расходы. Возможность применения Варианта 3 (толщина элемента – 15 см, количество арматурных стержней – 12 штук) с коэффициентом запаса 1,6 является наиболее оптимальным для определенных исходных данных представленной работы. Таким образом, полученные результаты исследования предоставляют возможность получения зависимостей изгибающих моментов и нормальных сил от толщины железобетонного элемента и обоснования геометрических параметров обделки перегонных тоннелей Днепропетровского метрополитена, однако нуждается в значительном комплексе исследований для случаев других инженерно-геологических условий и изменения материала обделки. Полный комплекс исследований ставит целью получение научно обоснованных результатов, которые позволят снизить материальные расходы при строительстве Днепропетровского метрополитена и соответственно сэкономить значительные денежные средства. **Научная новизна.** Полученная зависимость изгибающих моментов и нормальных сил от толщины железобетонного элемента, которая позволяет для определенного грунта выполнить оптимизацию геометрических параметров обделки перегонных тоннелей.

**Практическая значимость.** Предложены подходы по уменьшению материальных расходов при строительстве Днепропетровского метрополитена.

*Ключевые слова:* обделка; перегонный тоннель; метод конечных элементов; изгибающий момент; нормальная сила; прочность

O. L. TIUTKIN<sup>1\*</sup>, M. I. UMANSKAYA<sup>3\*</sup>

<sup>1\*</sup> Department «Tunnels bases and foundations of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, 2, Lazaryana Str., Dnipropetrovsk, Ukraine, 49010, tel. +38 (066) 290 45 18, e-mail tutkin@mail.ru, ORCID 0000-0003-4921-4758

<sup>3\*</sup> Department «Tunnels bases and foundations of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, 2, Lazaryana Str., Dnipropetrovsk, Ukraine, 49010, tel. +38 (095) 900 72 66, e-mail um.marry@gmail.com

## OPTIMIZATION OF GEOMETRICAL PARAMETERS OF RUNNING TUNNELS SUPPORT ON THE BASIS OF THE METROGIPROTRANS MODIFIED METHOD

**Purpose.** Applying the Metrogiprotrans modified method it is necessary to correct the developed models so that in subsequent their application gave results which answer of the real conduct of tunnel support at cooperation with a surrounding array. This research allows to execute the scientific ground of the diminished thickness of frame with the receipt of considerable economic effect. **Methodology.** For the decision of optimization task of running tunnels support geometrical parameters of the Metrogiprotrans method which is modified in accordance with bases of finite elements method is applied. On the basis of the got moments and normal forces the calculation of reinforced concrete elements are executed, the graph is built and dependence of bending moments and normal forces from the thickness of reinforced concrete element is set. **Findings.** The executed calculations were proved, that the terms of durability are executed for three variants, that diminishment of support thickness does not result in diminishment of block durability, that is explained by possibility of large deformations development toward soil for more pliable support. Development of greater resilient rebuff acts positive part in forming of power factors, here diminishment of amount of armature bars is an important factor, which considerably decreases expenses. Possibility of application of Variant 3 (thickness of element – 15 centimeter, amount of armature bars – 12 things) with the coefficient of the supply 1,6 is most optimum for certain basic data's of the represented work. Thus, the got results of research give possibility of receipt of bending moments and normal forces dependences from the thickness of reinforced concrete element and ground of running tunnels support geometrical parameters of the Dnepropetrovsk Metro, however needs the considerable complex of researches for the cases of other engineering and geological terms and change of support material. The complete complex of researches puts by a purpose the receipt of the scientifically grounded results which will allow to reduce material charges at building of the Dnepropetrovsk Metro and accordingly economize considerable money facilities. **Originality.** The collected dependence of bending moments and normal forces from the thickness of reinforced concrete element, which allows for certain soil to execute optimization of running tunnels support geometrical parameters. **Practical value.** The approaches on decreasing material expenses at building of the Dnepropetrovsk Metro are offered.

*Keywords:* support; running tunnel; finite elements method; bending moment; normal force; durability

### REFERENCES

1. Petrenko V. D., Tiutkin O. L., Kulazhenko Ye. Yu. Problema vyznachennia deformatsii opravy perehinnykh tuneliv pry suddivii zmini inzhenerno-heolohichnykh umov [The problem of determining deformations settings tunnels with significant changes geotechnical conditions]. *Zbirnyk naukovykh prats Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazaryana "Mosty ta tuneli: teoriya, doslidzhennya, praktyka"* [Proc. of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan "Bridges and tunnels: Theory, Research, Practice"], 2014, issue 5, pp. 62-69.
2. Sterling R. *Underground space design*. N-Y, Van Norstrand Reinhold Publ., 1993. 370 p.
3. Moller S. C. *Tunnel induced settlements and structural forces in lining*. Stuttgart, Sven Christian Moller Publ., 2006. 174 p.
4. Tiutkin O. L., Miroshnyk V. A. Rozrobka teoretychnykh osnov modyfikovanoho metodu rozrakhunku tuneliv kolovoho okreslennia [Development of theoretical bases of the modified calculation method of circular outline

## МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

- tunnels]. *Zbirnyk naukovykh prats Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazaryana "Mosty ta tuneli: teoriya, doslidzhennya, praktyka"* [Proc. of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan "Bridges and tunnels: Theory, Research, Practice"], 2012, issue 5, pp. 96-100.
5. Tsiniadis G., Heron C., Ptilakis K., Madabhushi G. S. Geotechnical, Geological and Earthquake Engineering: Centrifuge modelling of the dynamic behavior of square tunnels in sand. *Geotechnical, Geological and Earthquake Engineering*, 2015, vol. 35. pp. 509-523. doi: 10.1007/978-3-319-10136-1\_31.
  6. Aivazov Yu. M. *Proektuvannia metropoliteniv* [Planning of the Metro]. Part. 1. Kyiv, National Transport University Publ., 2006. 166 p.
  7. Aivazov Yu. M. *Proektuvannia metropoliteniv* [Planning of the Metro]. Part. 2. Kyiv, National Transport University Publ., 2006. 216 p.
  8. Petrenko V. D., Tyutkin A. L., Petrenko V. I. Obzor analiticheskikh i eksperimentalnykh metodov issledovaniya vzaimodeystviya massiva i krepi [Review of analytical and experimental methods of research of co-operation of massif and support]. *Zbirnyk naukovykh prats Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazaryana "Mosty ta tuneli: teoriya, doslidzhennya, praktyka"* [Proc. of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan "Bridges and tunnels: Theory, Research, Practice"], 2012, issue 1, pp. 75-81.
  9. *DBN B.2.3-7-2010. Sporudy transportu. Metropoliteny* [State Standard V.2.3-7-2010. Transport constructions. Undergrounds]. Kyiv, DP Ukrarkhbudinform Publ., 2011. 195 p.
  10. Perelmuter A. V., Slivker V. I. *Raschetnye modeli sooruzheniy i vozmozhnost ikh analiza* [Calculation models of constructions and possibility of their analysis]. Kyiv, Stal Publ., 2002. 600 p.
  11. Browell R., Dr. Lin G. *The Power of Nonlinear Materials Capabilities*. Part 1 of 2 on modeling materials with nonlinear characteristics. ANSYS Solutions Publ., 2000, vol. 2, no 1.
  12. David M. P., Zdravkovic L. *Finite Element Analysis in Geotechnical Engineering: Theory and Application*. Thomas Telford Ltd Publ., 2001. 500 p.
  13. Frolov Yu. S., Golitsynskiy D. M., Ledyayev A. P. *Metropoliteny* [Metro]. Moscow, Zheldorizdat Publ., 2001. 528 p.

Стаття рекомендована до публікації д.т.н., проф. В. Д. Петренко (Україна), д.т.н., проф. Й. Й. Лучко (Україна).

Надійшла до редколегії 20.09.2015.

Прийнята до друку 28.09.2015.