

## МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

УДК 624.191.044

В. Д. ПЕТРЕНКО<sup>1\*</sup>, О. Л. ТЮТЬКІН<sup>2\*</sup>, Є. Ю. КУЛАЖЕНКО<sup>3\*</sup>

<sup>1\*</sup> Каф. «Тунелі, основи та фундаменти», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпропетровськ, Україна, 49010, тел. +38 (050) 708 50 69, ел. пошта retrenko1937@mail.ru

<sup>2\*</sup> Каф. «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

<sup>3\*</sup> Каф. «Тунелі, основи та фундаменти», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпропетровськ, Україна, 49010, тел. +38 (098) 768 49 21, ел. пошта jaksson777@rambler.ru

### ПРОБЛЕМА ВИЗНАЧЕННЯ ДЕФОРМАЦІЙ ОПРАВИ ПЕРЕГІННИХ ТУНЕЛІВ ПРИ СУТТЄВІЙ ЗМІНІ ІНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГІЧНИХ УМОВ

**Мета.** На ділянці суттєвої зміни інженерно-геологічних умов можуть виникати значні деформації конструкції перегінних та станційних тунелів. Необхідно виявити причину розвитку деформацій, розробити шляхи її мінімізації та на основі моделювання і розрахунків та з'ясувати можливість зміни осі тунелю відносно до інженерно-геологічних умов. **Методика.** Для вирішення проблеми аналізу деформованого стану системи «конструкція-масив» проведено числове моделювання методом скінчених елементів (МСЕ), на основі отриманих результатів побудовані графіки та встановлені залежності деформування оправ тунелів при суттєвій зміні інженерно-геологічних умов. **Результати.** Наявність слабких водонасичених ґрунтів в лотковій частині тунелів при суттєвій зміні інженерно-геологічних умов викликає підвищення деформацій конструкції тунелів, а також загальні віброосідання в ґрунтовій основі. Крім того зміна фізико-механічних характеристик ґрунтів в межах оправ тунелів значно впливає на рівень деформованого стану самих оправ. Покращення деформованого стану оправ тунелів на ділянках зміни характеристик ґрунтів навколишнього масиву (особливо підстеляючих оправу) може бути досягнуто шляхом хімічного закріплення слабких ґрунтів або загальною зміною осі тунелю в плані та профілі для того, щоб максимально використати міцність та стійкість шару ґрунту з більшими деформаційними характеристиками. Вибір рішення з двох наведених варіантів підвищення експлуатаційних характеристик оправ перегінного тунелю з одночасним подовженням його довговічності та зменшенням міжремонтних термінів слід обґрунтовувати із залученням економічних розрахунків. **Наукова новизна.** Виявлена основна причина значних деформацій на ділянці переходу від глин до пісків, що пояснюється явищем віброосідання водонасиченої основи під тунелем. **Практична значимість.** Запропоновані підходи по зменшенню деформацій при будівництві перегінних тунелів Київського метрополітену при суттєвій зміні інженерно-геологічних умов.

*Ключові слова:* осідання водонасиченої основи; метод скінчених елементів; деформований стан; зміна інженерно-геологічних умов; аналіз деформацій

#### Вступ

Розпочато підготовку до проектування і будівництва перегінних та станційних тунелів Подільсько-Вигурівської лінії Київського метрополітену. На даному напрямку інженерно-геологічні умови відрізняються дуже високим рівнем складності, особливо в перехідних зонах від твердих або тугопластичних спондилових глин до водонасичених пісків. Визначення деформованого стану оправ в цих зонах є актуа-

льною задачею, яка полягає у розрахунку деформацій при суттєвій зміні інженерно-геологічних умов і потребує свого вирішення.

#### Мета

Перегінні тунелі в спондилових глинах знаходяться в достатньо стійкому стані і деформації не перевищують гранично допустимі для даних ґрунтів [6, 10]. Однак в перехідній зоні від спондилових глин до водонасичених пісків

## МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

виникають суттєві навантаження, які призводять до значних деформацій [2, 4]. Тому метою даного дослідження є вирішення задачі будівництва перегінних тунелів зі збірною оправою в складних інженерно-геологічних умовах, які досить часто зустрічаються в м. Києві.

## Методика

В основу методики розрахунку покладено метод скінчених елементів на основі розрахункового комплексу Structure CAD (SCAD) [7, 9, 11]. Тип скінченого елемента, який застосовано у розрахунку, визначається його формою, функціями, які визначають залежність між переміщеннями в вузлах скінченого елемента і вузлів системи, фізичним законом, який визначає залежність між внутрішніми зусиллями і внутрішніми переміщеннями, і набором параметрів (жорсткостей), які входять в опис цього закону та інше [11-12].

Для дослідження деформованого стану перегінного тунелю, створено просторову модель із об'ємних елементів (рис. 1).

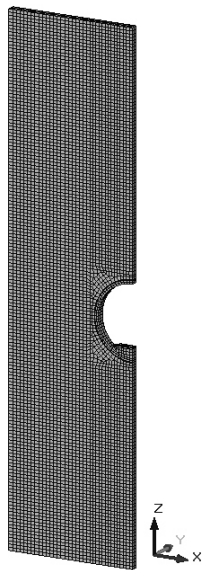


Рис. 1. Скінчено-елементна модель (СЕ-модель) перегінного тунелю із взаємодією оточуючого масиву

Модель побудована із ізопараметричних скінчених елементів типу призма (34 та 36 тип елемента у комплексі SCAD) із узгодженими вузлами [11]. В моделі застосовувалися елементи таких розмірів в площині XZ:  $0,24 \times 0,24$  м (більше 95 % від об'єму СЕ схеми – весь ґрунтовий масив та оправа);  $0,1 \times 0,25$  м (2,5 % від

схеми – моделювання шару нагнітання за оправою). Вона найбільше відображає наступні особливості реальної конструкції [1, 5, 11].

По осі Y (по довжині тунелю) розмір елементів складав 0,3 м, що обґрунтовується меншим впливом розміру СЕ в цьому напрямку, хоча для моделювання розрахункової області таких розмірів можна було б застосовувати і елементи більш значних розмірів, що пропонується в роботах [1, 5, 11], в яких надана рекомендація визначати розмір елемента як  $1/20$  від характерного розміру розрахункової області.

СЕ-модель, яка застосовувалася у всіх дослідженнях має наступні розміри: по осі X – 10,0 м, по осі Y – 0,6 м; по осі Z – 40,0 м. Тобто нормальним розміром СЕ можливо було б прийняти  $2 \times 2 \times 2$  м, але це не дозволило більш точно відтворити специфічні особливості системи «оправа–тунель», наприклад, випадок первинного нагнітання. Загальне число вузлів СЕ-моделі – 18 246, загальне число СЕ – 11 736 штук. Кількість СЕ свідчить про те, що задача, що вирішувалася, є задачею середньої розмірності (до 20 тисяч скінчених елементів).

Модель була створена таким чином, щоб відтворити всі геометричні розміри перегінного тунелю: діаметр внутрішній – 5,6 м, діаметр зовнішній – 6,04 м (залізобетонні блоки В30).

На схему накладені граничні умови: верх моделі – без закріплень; сторони, паралельні осі тунелю (площина YZ) – заборона переміщень по осям X та Y; сторони перпендикулярні осі тунелю (площина XZ) – заборона переміщень по осі Y (це найбільш точно відповідає умові плоскої деформації); низ моделі – заборона переміщень по осям X, Y та Z. Ці граничні умови найбільш точно дозволяють відтворити реальну картину деформування моделі [7, 9].

Моделям були надані деформаційні властивості, які отримані із реальних досліджень матеріалів, стратиграфічна колонка відображає частину масиву, яка оточує досліджуваний тунель. Жорсткість цементно-піщаного розчину, який подається за оправу при первинному нагнітанні або тампонажі, була такою: усереднена товщина 0,1 м, модуль пружності –  $E = 20000$  МПа, коефіцієнт Пуассона  $\mu = 0,2$ , густина  $\rho = 2,2$  т/м<sup>3</sup>. Деформаційні властивості залізобетону отримані як приведені характеристики, і для залізобетону на основі бетону В30 складала: модуль пружності  $E = 35000$  МПа

## МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

(при відсотку армування – 1...3 %), коефіцієнт Пуассона  $\mu = 0,2$ , густина  $\rho = 2,5 \text{ т/м}^3$ .

Розрахунок всіх моделей виконувався на два навантаження: 1) дію метропоїзду; 2) власну вагу оточуючого масиву та конструкції. Урахування дії метропоїзду відтворено в нормативних документах, наприклад, в ДБН В.2.3-7-2010. Метрополітени, п. 9.44. [3]. Але розрахунки впливу рухомого складу залишаються дещо перевірочними, так як однозначно відомо, що вага потягу складає не більш ніж 5...10 % від дії гірського тиску [7, 8].

## Результати

Виконані дослідження деформованого стану оправи в зоні переходу від глини (ІГЕ 73; позначення інженерно-геологічного розрізу ситуації м. Києва) до піску (ІГЕ 78а; позначення інженерно-геологічного розрізу ситуації м. Києва). Для цього виконується серія розрахунків:

1) Варіант 1 – реальний випадок, при якому тунель перетинає два шари ґрунту (ІГЕ 73 та ІГЕ 78а, рис. 2, а);

2) Варіант 2 – можливий випадок, при якому тунель залягає лише в одному шарі ґрунту (ІГЕ 73, рис. 2, б);

3) Варіант 3 – можливий випадок, при якому тунель залягає лише в одному шарі ґрунту (ІГЕ 78а, рис. 2, в).

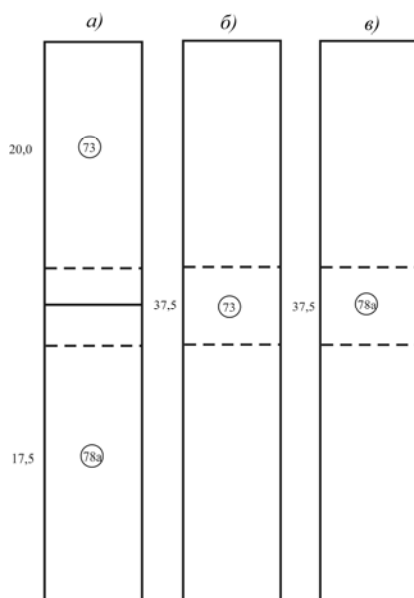


Рис. 2. Стратиграфічні колонки із розміщенням тунелю (пунктиром позначено положення замка і лотка):

а – варіант 1; б – варіант 2; в – варіант 3

Варіант 2 та 3, які є гіпотетичними, надають змогу подальшого порівняння деформованого стану оправи і масиву, оскільки вони є однорідними. Розрахунок деформованого стану цих двох випадків дозволяє порівняти значення деформацій із Варіантом 1 та зробити висновок щодо впливу шаруватості на розвиток осадок. В основу розрахунку покладено метод скінчених елементів на основі розрахункового комплексу Structure CAD (SCAD).

Після створення SE-моделей, проводився їх розрахунок, результати якого наведені на рис. 3 і 4.

Аналіз завантаження моделі саме дією метропоїзду дозволяє відділити її від дії власної ваги масиву та конструкції, яка за принципом суперпозиції може бути додана до неї. Випадок дії метропоїзду демонструє стан конструкції, яка взаємодіє із оточуючим масивом, коли всі процеси формування гірського тиску закінчилися. Результати розрахунку показали, що вплив метропоїзду на горизонтальні переміщення оправи майже не відчувається, оскільки значення деформацій у всіх трьох варіантах є однаковим (максимальне – 0,4 мм на горизонтальному діаметрі оправи). Горизонтальні деформації в моделі, тобто в оправі, що взаємодіє з масивом якісно практично ідентичні, а кількісно змінюються незначно (0,4...0,5 мм).

Таку ж незначну зміну в моделі можна засвідчити і для викликаних дією масиву горизонтальних деформацій, які якісно співпадають в моделі та в фрагменті моделі (оправі).

Аналіз рис. 3 і 4 свідчить про те, що вплив метропоїзду на вертикальні переміщення оправи є відчутним, оскільки значення деформацій у всіх трьох варіантах знаходиться в межах 10 мм (варіант 1 – -9,5 мм, варіант 2 – -7,2 мм, варіант 3 – -9,7 мм). В цій компоненті різниця між варіантами вже значна і складає 1,32 рази між варіантом 1 та 2 та 1,35 рази між варіантами 2 та 3, тобто можна свідчити, що закладення масиву варіанту 2 (закладення в глині) є найбільш оптимальним, причому різниця між варіантами 1 та 2 є незначною. Таким чином, часткове закладення тунелю в глині, коли пісок є підстиляючим шаром, практично не впливає позитивно на деформований стан, що пояснюється більшою деформаційною здатністю піску. Вертикальні деформації від дії масиву якісно практично співпадають в моделі та в фрагменті моделі (оправі), але кількісно вони підтверджують те, що було відмічено у випадку дії метропоїзду.

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

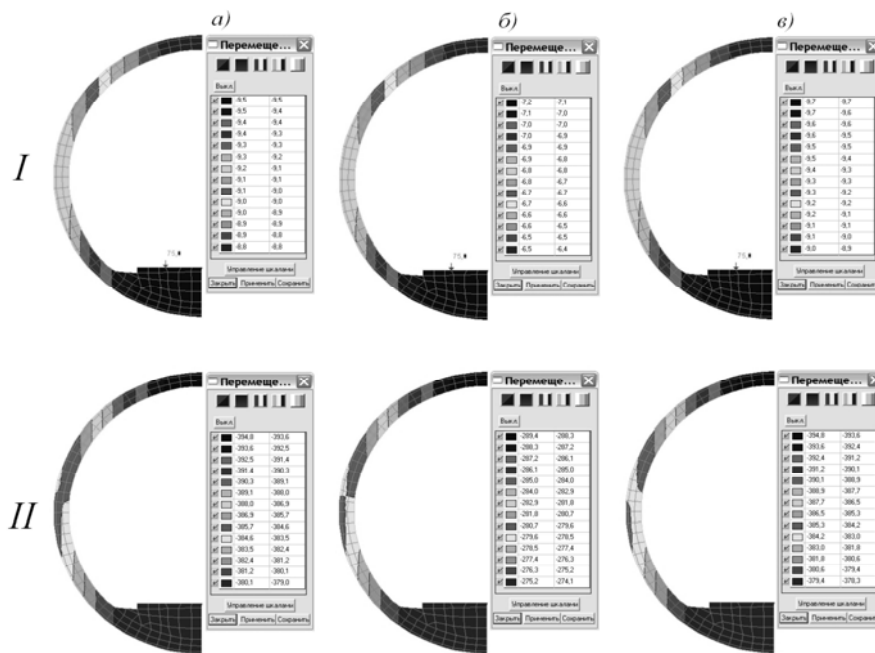


Рис. 3. Ізолінії та ізополя вертикальних переміщень оправи тунелю від дії метропоїзду (I) та власної ваги моделі (II):  
а – варіант 1; б – варіант 2; в – варіант 3

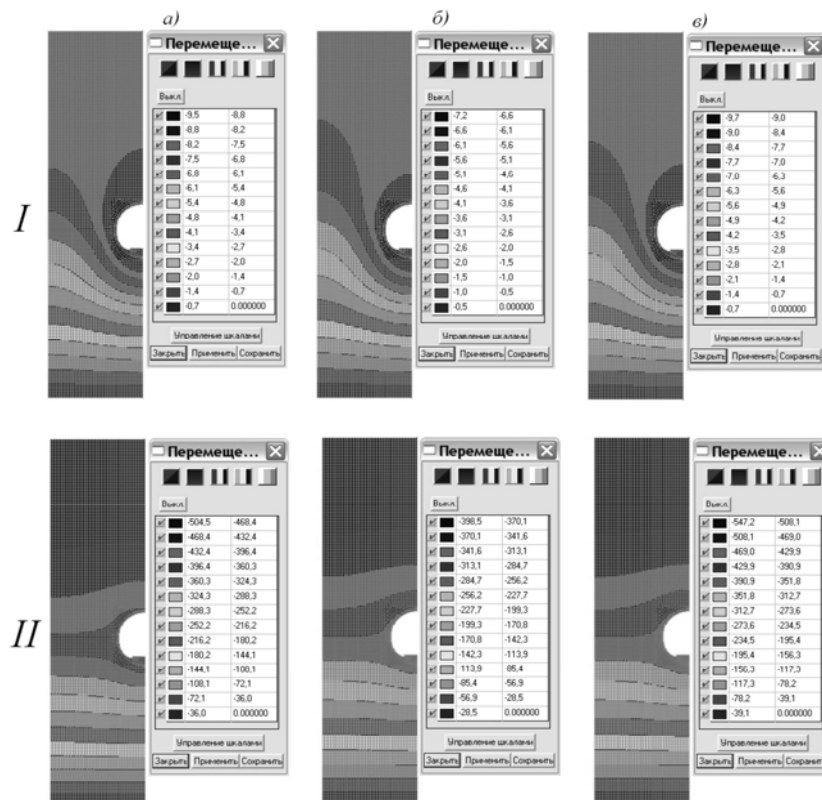


Рис. 4. Ізолінії та ізополя вертикальних переміщень масиву навколо тунелю від дії метропоїзду (I) та власної ваги моделі (II):  
а – варіант 1; б – варіант 2; в – варіант 3

## МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

Але слід відмітити відповідну зміну у кількісних максимальних значеннях вертикальних деформацій (верх моделі): варіант 1 – -394,8 мм, варіант 2 – -289,3 мм, варіант 3 – -394,8 мм.

Для того, щоб знайти абсолютні деформації точок оправи, наприклад, в замку, слід відняти значення деформації в ньому від значення в лотку. Таким чином, максимальні значення вертикальних деформацій в замку складають: варіант 1 –  $-394,8 - (-379) = -15,4$  мм, Варіант 2 –  $-289,3 - (-274,1) = -15,2$  мм, Варіант 3 –  $-394,8 - (-378,3) = -16,5$  мм. Це також свідчить про більшу деформаційну здатність масиву у варіанті 1 та 3, хоча варіант 1 у цьому випадку дії навантаження ближче до варіанту 2.

Одним із важливих факторів, який впливає на розвиток деформацій, є зміна деформаційних властивостей, особливо модуля деформації ґрунту, наприклад, під впливом ґрунтових вод, тим більше, що шар піску (ПЕ 78а) позначений наявністю підземних вод, приурочених до буцацько-канівського водоносного горизонту, який мають схильність до підйому.

Проведено розрахунок реального випадку закладення тунелю (Варіант 1), але із зміною модуля деформації піску. Вже було розраховано модель із модулем деформації  $E = 20$  МПа,

тому проведено ще шість розрахунки Варіанту 1 – із  $E = 17,5$  МПа (Підваріант 1), 2 –  $E = 15$  МПа (Підваріант 2), 3 –  $E = 12,5$  МПа (Підваріант 3), 4 –  $E = 10$  МПа (Підваріант 4), 5 –  $E = 7,5$  МПа (Підваріант 5), 6 –  $E = 5$  МПа (Підваріант 6), результати розрахунків яких наведено у порівнянні із Варіантом 1. Аналогічно попередньому розрахунку визначено максимальні вертикальні деформації в замку оправи. Окрім того варто зазначити, що якісна картина розподілення ізополів переміщень не змінилася, змінилися лише кількісні значення.

Аналізуючи абсолютні вертикальні деформації оправи варто зазначити, що зменшення модулю пружності піску (моделювання замочування) суттєво впливає на вертикальні деформації оправи. Також слід відмітити, що даний розрахунок проводився в статичній постановці, хоча в реальних умовах динамічна дія від руху метропоїзду викликає віброосідання замоченого піску під оправою тунелю.

Крім того залежність між модулем пружності піску і деформація має цілком закономірний характер, який можна відстежити за допомогою побудови графіка (рис. 5).

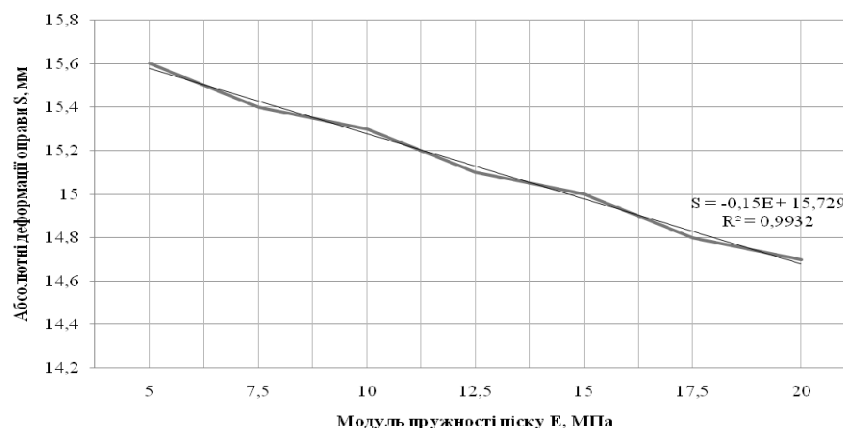


Рис. 5. Графік залежності вертикальних деформацій оправи від модулю пружності піску

В якості апроксимуючої функції була вибрана лінійна залежність, яка відображається рівнянням  $y = -0,15x + 15,729$ , величина достовірності апроксимації становить  $R^2 = 0,9932$ , що вказує на дуже високе співпадіння із апроксимуючою лінійною функцією.

Максимальні вертикальні деформації оправи становлять 15,6 мм при найменшому заданому модулю пружності піску – 5 МПа.

В реальних умовах додаткова динамічна дія від руху метропоїзду призведе до ще більшого зростання деформацій, які призведуть до встановлення обмеження швидкості метропоїзду на даній ділянці перегінного тунелю. Покращення деформованого стану оправи тунелів на ділянках зміни характеристик ґрунтів навколишнього масиву (особливо підстеляючих оправу) може бути досягнуто шляхом хімічного закріплення слабких ґрунтів або загальною зміною

## МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

осі тунелю в плані та профілі для того, щоб максимально використати міцність та стійкість шару ґрунту з більшими деформаційними характеристиками.

**Наукова новизна та практична значимість**

В роботі виявлена основна причина значних деформацій на ділянці переходу від спондилових глин до водонасичених пісків, що пояснюється явищем віброосідання водонасиченої основи під тунелем і визначає наукову новизну проведених досліджень. Запропоновані підходи по зменшенню деформацій при будівництві перегінних тунелів на ділянці переходу від спондилових глин до водонасичених пісків Київського метрополітену і це є практичною значимістю роботи.

**Висновки**

На основі проведеного дослідження перегінних тунелів Подільсько-Вигурівської лінії Київського метрополітену зроблені такі висновки:

1. Наявність слабких водонасичених ґрунтів в лотковій частині тунелів на ділянці переходу від спондилових глин до водонасичених пісків викликає суттєве підвищення деформацій як конструкції тунелів, а також загальні віброосідання в ґрунтовій основі.

2. Виконане наукове дослідження доводить, що зміна фізико-механічних характеристик ґрунтів в межах оправи тунелів суттєво впливає на рівень деформованого стану самих оправ.

3. Результати математичного моделювання свідчать, що найбільш оптимальним закладенням перегінних тунелів є ІГЕ 73 (глина спондилова), оскільки деформований стан при такому заляганні відрізнявся найменшими значеннями перемішень.

4. Замочування піщаного шару у разі підняття рівня підземних вод призведе до збільшення осідання оправи в наслідок зменшення модуля пружності піску. Залежність між деформаціями оправи і зменшенням модулю пружності піску має лінійний характер.

5. Покращення деформованого стану оправи тунелів на ділянках зміни характеристик ґрунтів навколишнього масиву (особливо підстиляючих оправу) може бути досягнуто шляхом хімічного закріплення слабких ґрунтів або загальною зміною осі тунелю в плані та профілі для

того, щоб максимально використати міцність та стійкість шару ґрунту з більшими деформаційними характеристиками.

**СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ**

1. Баженов, В. А. Полуаналитический метод конечных элементов в механике деформируемых тел [Текст] / В. А. Баженов, А. И. Гуслиар, А. С. Сахаров. – Киев : НИИ строительной механики, 1993. – 376 с.
2. Вознесенский, Е. А. Поведение грунтов при динамических нагрузках [Текст] / Е. А. Вознесенский. – Москва : Изд-во МГУ, 1997. – 286 с.
3. ДБН В.2.3-7-2010. Споруди транспорту. Метрополітени [Текст]. – Київ : ДП «Укрархбудінформ», 2011. – 195 с.
4. Кудрявцев, И. А. Влияние вибрации на основания сооружений [Текст] / И. А. Кудрявцев. – Гомель : БелГУТ, 1999. – 274 с.
5. Перельмутер, А. В. Расчетные модели сооружений и возможность их анализа [Текст] / А. В. Перельмутер, В. И. Сливкер. – Киев : Сталь, 2002. – 600 с.
6. Петренко, В. И. Современные технологии строительства метрополитенов в Украине [Текст] / В. И. Петренко, В. Д. Петренко, А. Л. Тютюкин. – Днепропетровск : Наука і освіта, 2005. – 252 с.
7. Петренко, В. Д. Комплексний аналіз колонної станції із варіацією глибини закладення [Текст] / В. Д. Петренко, О. Л. Тютюкін, В. І. Петренко // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. – Дніпропетровськ : Вид-во ДНУЗТу, 2011. – Вип. 39. – С. 138-143.
8. Петренко, В. Д. Обзор аналитических и экспериментальных методов исследования взаимодействия массива и крепи [Текст] / В. Д. Петренко, А. Л. Тютюкин, В. И. Петренко // Зб. наук. праць Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна «Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика». – Дніпропетровськ : Вид-во ДНУЗТу, 2012. – Вип. 1. – С. 75-81.
9. Тютюкін, О. Л. Розробка теоретичних основ модифікованого методу розрахунку тунелів колового окреслення [Текст] / О. Л. Тютюкін, В. А. Мірошник // Зб. наук. праць Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна «Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика». – Дніпропетровськ : Вид-во ДНУЗТу, 2012. – Вип. 2. – С. 96-100.
10. Фролов, Ю. С. Метрополитены. Учебник для вузов [Текст] / Ю. С. Фролов, Д. М. Голицын-

## МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

- кий, А. П. Ледяев. – Москва : Желдориздат, 2001. – 528 с.
11. SCAD для пользователя [Текст] / В. С. Карпиловский, Э. З. Криксунов, А. В. Перельмутер и др. – Киев : ВВП «Компас», 2000. – 332 с.
  12. Ali Ghorbani Buckling of the steel liners of underground road structures: the sensitivity analysis of geometrical parameters / Ali Ghorbani, Hadi Hanzadehshooili, Antanas Šapalas, Ali Lakirouhani – The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering, Vilnius: Technika, 2013, Vol. VIII, No 4, p. 250-254.
  13. Gang Zheng. Numerical analyses of influence of overlying pit excavation on existing tunnels / Gang Zheng, Shao-wei Wei – Journal of Central South University, Tianjin: Central South University, 2008, Vol. 15, Issue 2 Supplement, p. 69-75.
  14. Hamid Chakeri. Analysis of interaction between tunnels in soft ground by 3D numerical modeling / Hamid Chakeri, Rohola Hasanpour, Mehmet Ali Hindistan, Bahtiyar Ünver – Bulletin of Engineering Geology and the Environment, Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 2011, Vol. 70, Issue 3, p. 439-448.

В. Д. ПЕТРЕНКО<sup>1\*</sup>, А. Л. ТЮТЬКИН<sup>2\*</sup>, Е. Ю. КУЛАЖЕНКО<sup>3\*</sup>

<sup>1\*</sup> Каф. «Тоннели, основания и фундаменты», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепропетровск, Украина, 49010, тел. +38 (050) 708 50 69, эл. почта petrenko1937@mail.ru

<sup>2\*</sup> Каф. «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

<sup>3\*</sup> Каф. «Тоннели, основания и фундаменты», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепропетровск, Украина, 49010, тел. +38 (098) 768 49 21, эл. почта jaksson777@rambler.ru

## ПРОБЛЕМА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДЕФОРМАЦИЙ ОБДЕЛКИ ПЕРЕГОННЫХ ТОННЕЛЕЙ ПРИ СУЩЕСТВЕННОМ ИЗМЕНЕНИИ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ

**Цель.** На участке существенного изменения инженерно-геологических условий могут возникать значительные деформации конструкции перегонных и станционных тоннелей. Необходимо выявить причину развития деформаций, разработать пути ее минимизации и на основе моделирования и расчетов и выяснить возможность изменения оси тоннелю относительно к инженерно-геологическим условиям. **Методика.** Для решения проблемы анализа деформированного состояния системы «конструкция-массив» проведено численное моделирование методом конечных элементов (МКЭ), на основе полученных результатов построены графики и установлены зависимости деформации обделок тоннелей при существенном изменении инженерно-геологических условий. **Результаты.** Наличие слабых водонасыщенных грунтов в лотковой части тоннелей при существенном изменении инженерно-геологических условий вызывает повышение деформаций конструкции тоннелей, а также общие виброосадки в грунтовом основании. Кроме того, изменение физико-механических характеристик грунтов в пределах обделки тоннелей значительно влияет на уровень деформированного состояния самих обделок. Улучшение деформированного состояния обделки тоннелей на участках изменения характеристик грунтов окружающий массив (особенно подстилающих обделку) может быть достигнут путем химического закрепления слабых грунтов или общим изменением оси тоннеля в плане и профиле для того, чтобы максимально использовать прочность и устойчивость слоя грунта с большими деформационными характеристиками. Выбор решения из двух приведенных вариантов повышения эксплуатационных характеристик обделки перегонного тоннелю с одновременным повышением его долговечности и уменьшением межремонтных сроков следует обосновывать с привлечением экономических расчетов. **Научная новизна.** Выявлена основная причина значительных деформаций на участке перехода от глин к пескам, что объясняется явлением виброосадок водонасыщенного основания под тоннелем. **Практическая значимость.** Предложены подходы по уменьшению деформаций при строительстве перегонных тоннелей Киевского метрополитена при существенном изменении инженерно-геологических условий.

**Ключевые слова:** оседание водонасыщенного основания; метод конечных элементов; деформированное состояние; изменение инженерно-геологических условий; анализ деформаций

V. D. PETRENKO<sup>1\*</sup>, O. L. TYUTKIN<sup>2\*</sup>, YE. YU. KULAZHENKO<sup>3\*</sup>

<sup>1\*</sup> Department «Tunnels bases and foundations of Dnepropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, 2 Lazaryana Str., Dnepropetrovsk, Ukraine, 49010, tel. +38 (050) 708 50 69, e-mail petrenko1937@mail.ru

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

<sup>3\*</sup> Department «Tunnels bases and foundations of Dnepropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, 2 Lazaryana Str., Dnepropetrovsk, Ukraine, 49010, tel. +38 (098) 768 49 21, e-mail jaksson777@rambler.ru

## ANALYSIS OF DEFORMED STATE STRUCTURES KIEV SUBWAY TUNNELS ON AN AREA OF TRANSITION FROM SPONDYLOV'S CLAY TO BUCHATSKIY SANDS

**Purpose.** The considerable deformations of construction of running and station tunnels on the area of substantial change of engineering and geological terms may be arise. It is necessary to expose the reason of development of deformations, to develop the ways of its minimization and on the basis of design and calculations and to find out possibility of change of axis to the tunnel relatively to the engineering-geological terms. **Methodology.** For the decision of the deformed state analysis problem of the system «construction-array» the numeral analysis by using the finite element method (FEM) is conducted. On the basis of the got results the graphs are built and dependences of tunnels support deformation at the substantial change of engineering and geological terms are established. **Findings.** The presence of the weak watersaturated soils in tray part of tunnels at the substantial change of engineering-geological terms causes the increase of deformations of tunnels construction, and also vibrodeformations in the ground bases. In addition, the change of physical and mechanical characteristics of soils within the limits of support of tunnels considerably influences on the level of the supports deformed state. The improvement of the deformed state of tunnels support on the areas of change of soils characteristics surrounding array (especially lay of support) can be attained by the chemical fixing of weak soils or common change of tunnel axis in a plan and profile in order to maximally use durability and stability of soil layer with biggest deformation characteristics. The choice of decision from two resulted variants of increase of operating characteristics of running tunnel support of his durability and decreasing of between repair terms follows to ground with bringing in of economic calculations. **Originality.** The principal reason of considerable deformations on the area of transition from clays to sands is exposed, that is explained by the phenomenon of the watersaturated base vibrodeformations under a tunnel. **Practical value.** Offered approaches on diminishment of deformations at building of running tunnels of Kiev underground passage at the substantial change of engineering and geological terms.

*Keywords:* settling of the watersaturated base; finite element method; strain state; change of engineering and geological terms, analysis of strains

*Стаття рекомендована до публікації д.т.н., проф. М. М. Біляєвим (Україна), д.т.н., проф. Й. Й. Лучко (Україна).*

Надійшла до редколегії 26.06.2014

Прийнята до друку 02.07.2014