

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

УДК 625.12:539.3-048.32

О. Л. ТЮТЬКІН^{1*}, В. А. МІРОШНИК², С. І. БЕЛІКОВА³

^{1*} Кафедра «Транспортна інфраструктура», Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (066) 290 45 18, ел. пошта o.l.tiutkin@ust.edu.ua, ORCID 0000-0003-4921-4758

² Кафедра «Транспортна інфраструктура», Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (097) 828 64 87, ел. пошта v.a.miroshnyk@ust.edu.ua, ORCID 0000-0002-8115-0128

³ Кафедра «Транспортна інфраструктура», Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (050) 756 31 21, ел. пошта 7563121@gmail.com, ORCID 0000-0003-0707-7791

ОБҐРУНТУВАННЯ ЗАКОНОМІРНОСТЕЙ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА ПІСЛЯ ВПРОВАДЖЕННЯ ЄВРОПЕЙСЬКОЇ КОЛІЇ

Мета. Впровадження євроколії (1435 мм) на існуючому земляному полотні, що збудовано на території України, є фактором, який призводить до зміни напружено-деформованого стану. Метою статті є обґрунтування закономірностей напружено-деформованого стану земляного полотна на основі результатів чисельного аналізу скінченно-елементних моделей. **Методика.** Для проведення чисельного аналізу на основі методу скінченних елементів розроблена модель земляного полотна висотою 6 м під суміщену колію. В розробленій моделі відтворено всі реальні геометричні характеристики земляного полотна, верхньої будови колії, а також шпала для суміщеної колії. Розроблена модель дозволяє варіювати прикладення поїзного навантаження із постановкою пари сил на рейках, що мають українське значення ширини колії (1520 мм), а також європейської колії. В моделі також змодельоване підсилення земляного полотна для чотирьох варіантів (без палі, з палею довжиною 2,0, 4,0 і 6,0 м). **Результати.** Результати чисельного аналізу надали змогу отримати значення горизонтальних та вертикальних напружень, а також отримати закономірності напруженого стану земляного полотна до впровадження європейської колії. Якісний аналіз положення потягу свідчить про те, що зменшення колії та її асиметричне знаходження на шпалі збільшує вертикальні деформації. Найбільшу проблему складає саме асиметричність розподілу вертикальних переміщень. З'ясовано, що зростання довжини вертикального елемента підсилення надає зменшення переміщень в 1,1...1,2 рази. Виявлено, що закономірності зміни переміщень земляного полотна при варіації довжини вертикального елемента підсилення є лінійними для горизонтальної компоненти та поліноміальними другого ступеня для вертикальної. **Наукова новизна.** Вперше на основі закономірностей напружено-деформованого стану земляного полотна отримано картину формування напружень та розповсюдження деформацій до і після влаштування європейської колії. **Практична значимість.** На основі результатів чисельного аналізу з'ясовано, що збільшення довжини вертикального елемента підсилення на 2,0 м надає зменшення переміщень на 10...20 %. Ці дані надають змогу для створення методики первинного підбору параметрів елемента підсилення.

Ключові слова: земляне полотно; підсилення; напружено-деформований стан; вертикальний елемент; європейська колія; закономірності зміни параметрів

Вступ

В Україні після початку повномасштабного вторгнення РФ гостро постала проблема поєднання залізниці нашої держави з залізницями держав Європейського союзу. Саме різниця між значеннями ширини колії (1520 мм в Україні та 1435 мм в більшості країн Європейського Союзу) стримує реалізацію ідеї розвитку європейської залізниці в нашій країні (Kurhan, M., Kurhan, D., & Hmelevska, 2024). Зрозуміло, що одночасне перевлаштування тисяч кіломет-

рів української колії було неможливе і в мирний час, однак проблема інтегрованості, тобто поєднання двох різних транспортних систем, досі є актуальною. Слід відмітити, що надалі її актуальність буде зростати.

Інтегрованість більш усього торкається чотирьох систем: 1) рухомий склад; 2) енергозабезпечення; 3) автоматика та телекомунікації; 4) залізнична колія (Fischer, Kurhan, D., Kurhan, M., & Hmelevska, 2024). Не викликає сумнівів, що саме четверта система є найбільш значущою, оскільки якщо не поєднані залізни-

чні колії та земляне полотно, то три інші системи не мають основи, на якій вони базуються.

Оскільки концепцію розгалуження європейської залізниці в нашій країні неможливо реалізувати повною мірою, з'являються конкретні рішення, що є перехідними. Так, основним з них є перевлаштування української колії під суміщену 1520/1435 мм, для якого запроєктовані та виготовлені спеціальні шпали ПІС-1 (Курган, М. Б., Курган, Д. М., Бражник, & Ковальський, 2019).

Однак, існує проблема, яка характерна для української залізниці зараз, і буде загострюватися під час перевлаштування під суміщену колію. Це проблема деформування земляного полотна під дією поїзного навантаження, яка виражається в наднормативних переміщеннях основного майданчику і, відповідно, рейкошпальної решітки. Вирішення проблеми є тимчасовим і полягає у проведенні ремонту колії із підбиванням баласту.

На даний термін існує декілька напрямів підсилення земляного полотна. Наразі основним напрямом є армування геосинтетичними матеріалами або введенням шарів, що мало деформуються. Цей класичний напрям підсилення в останній час піддається критиці, яку можна вважати успішною, якщо піднімається питання зменшення саме вертикальної компоненти деформування земляного полотна, оскільки горизонтальні елементи підсилення є ефективними саме для зменшення горизонтальних переміщень (Pshinko, Petrenko, Tiutkin, et al., 2019).

Альтернативним варіантом підсилення земляного полотна є різновид армування шляхом занурення вертикальних елементів (паль або мікропаль) (Петренко, Тютюкін, Крисан, В. І., & Крисан, В. В., 2019; Tiutkin, Radkevych, Dubinchyk, & Kharchenko, 2024). Ідея підсилення палями або мікропалями отримала широку розробку в багатьох галузях будівництва. Її реалізація для земляного полотна проводиться на основі бурозмішувальної технології або jet-grouting (Петренко, Андрєєв, & Харченко, 2021; Tiutkin, Neduzha, & Kalivoda, 2021). Важливим питанням є схеми розміщення вертикальних елементів та визначення їхніх параметрів.

Мета

Метою наукової статті є обґрунтування закономірностей напружено-деформованого ста-

ну земляного полотна після впровадження європейської колії. В статті для цього проведений чисельний аналіз земляного полотна із зміною ширини колії, результати якого дозволили віднайти закономірності формування напружень та розповсюдження деформацій до і після влаштування евроколії, а також сценарій розвитку напружено-деформованого стану у випадку застосування суміщеної колії.

Методика

Для визначення напружено-деформованого стану підсиленого земляного полотна під суміщену колію застосований метод скінченних елементів, реалізований в комплексі SCAD (Крисан, В. І., Крисан, В. В., Петренко, & Тютюкін, 2023; Alkhdour, Tiutkin, Dubinchyk, & Miroshnyk, 2024; Tiutkin, Radkevych, Dubinchyk, & Kharchenko, 2024).

Для математичного моделювання приймається просторова (3D) постановка, як така, що дозволяє найбільш повно відобразити систему, що досліджується. Об'ємні моделі створені на основі плоского прототипу, що побудований на основі автоматичної триангуляції. Цей крок є коректним, оскільки об'єкт, що досліджується, має складне окреслення. Окрім розмірів та форми рейки, всі інші розміри та форми елементів верхньої будови колії та земляного полотна збережені для максимально повного відтворення об'єкта дослідження.

Перед тим, як виконати триангуляцію, в схему було завантажено вузли, через які проходить контур, що обмежує область триангуляції. Для завантаження схеми вузлів та контурів моделі застосовано імпортування з програми AutoCAD for Windows, в якій по точкам побудований поперечний переріз земляного полотна висотою 6 м. Його конструкція відповідає розробленій для конструкції земляного полотна із шпалою під суміщену колію.

На рис. 1 наведена модель земляного полотна, яка створена у комплексі SCAD за допомогою автоматичної триангуляції (крок триангуляції – 0,1 м). Розміри СЕ коливаються у межах 0,1×0,1×0,1 до 0,15×0,1×0,1 м, тобто дискретизація схеми достатньо детальна. В моделі було прийнято поїзне навантаження, тиск на вісь прийнято рівним нормативному тиску від поїзду $P=230,5$ кН на вісь, тобто 115,25 кН на одну рейку (рис. 2).

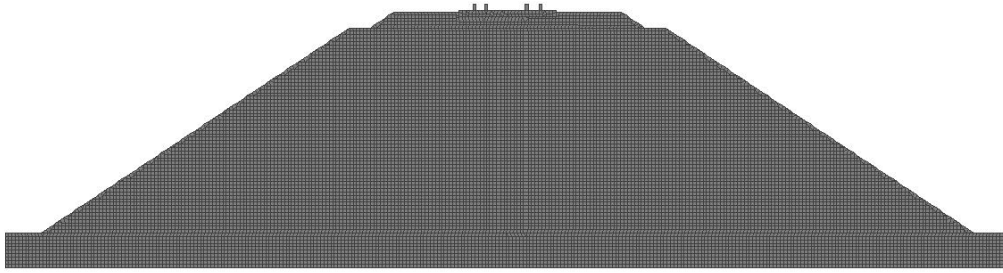


Рис. 1. Скінченно-елементна модель земляного полотна висотою 6 м під суміщену колію

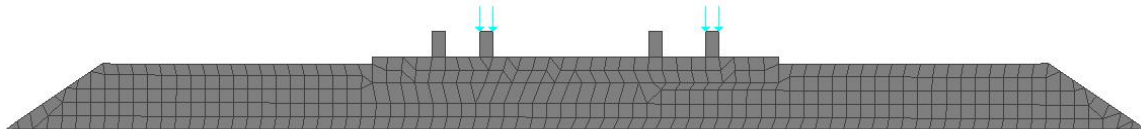


Рис. 2. Розташування поїзного навантаження на рейках 1520 мм

У схемі застосовані як тетраедричні СЕ (у моделюванні укусу), так і паралелепіпеди (у моделюванні земляного полотна та основи). Загальна кількість вузлів схеми – 43731 шт. (біля 131 тисячі ступенів волі, задача вважається великорозмірною), кількість скінченних елементів – 28684 шт. Розміри моделі: довжина – 14,65 м, висота – 7,5 м (з яких висота земляного полотна – 6 м, основа – 1 м, баластний шар щебеню – 0,5 м).

На схему накладені граничні умови: понизу моделі – заборона переміщення по всім трьом осям, по боках основи – заборона по горизонтальним осям, по поперечних сторонах моделі – заборона по поздовжній осі. Верх та відкоси моделі вільні від граничних умов.

Деформаційною характеристикою (модуль пружності E) скінченно-елементної моделі є наступні: 1) рейка (сталь) $E=2,1 \cdot 10^8$ кПа; 2) шпала (залізобетон) $E=4,0 \cdot 10^7$ кПа; 3) баласт (щебінь) $E=10 \cdot 10^4$ кПа; 4) земляне полотно (слабкий суглинок) $E=25 \cdot 10^3$ кПа; 5) паля (грунтоцемент, що армований сталевим каркасом) $E=140 \cdot 10^5$ кПа.

Постановка палі діаметром 0,2 м саме в положення між рейками базується на результатах статті (Tiutkin, Neduzha, & Kalivoda, 2021), а також на технологічній можливості бурового агрегату, що може проводити буріння без зняття рейко-шпальної решітки (Briçon, & Simon, 2017). Діаметр палі, що досліджувався в рамках цієї наукової задачі, вважається зменшеним, оскільки частіш усього діапазон діаметрів коливається в межах 0,3...1,2 м.

Під час чисельного аналізу SCAD застосовувався мультифронтальний метод розкладення матриці жорсткості із автоматичною оптимізацією ширини стрічки, як найбільш прогресивний метод роботи із матрицями, який застосовано у комплексі SCAD. Результатами розрахунку являються загальні переміщення та напруження моделі по осям X та Z , причому результати показують характерну картину їх розподілення у земляному полотні.

Результати

Отримані результати чисельного аналізу надали змогу отримати значення вертикальних (рис. 3 і 4) переміщень для чотирьох варіантів (без палі, з палею довжиною 2,0, 4,0 і 6,0 м). Результати для вертикальних елементів довжиною 2,0 і 4,0 м для економії місця не наведені, але дані про переміщення цього варіанту проаналізовані. Для презентації результатів деформованого стану застосований особливий фільтр відображення розрахункового комплексу SCAD. З його допомогою відображені вертикальні переміщення для всіх варіантів підсилення, причому для кожного з них обрано постійний крок компоненти деформування (5,0 мм для вертикальних переміщень).

Навіть якісний аналіз отриманих результатів доводить, що введення в ґрунтове середовище вертикальних елементів, що мають підвищені деформаційні властивості (модуль пружності або деформації матеріалу палі або мікропалі), є ефективним методом зниження деформованого стану (рис. 3 і 4).

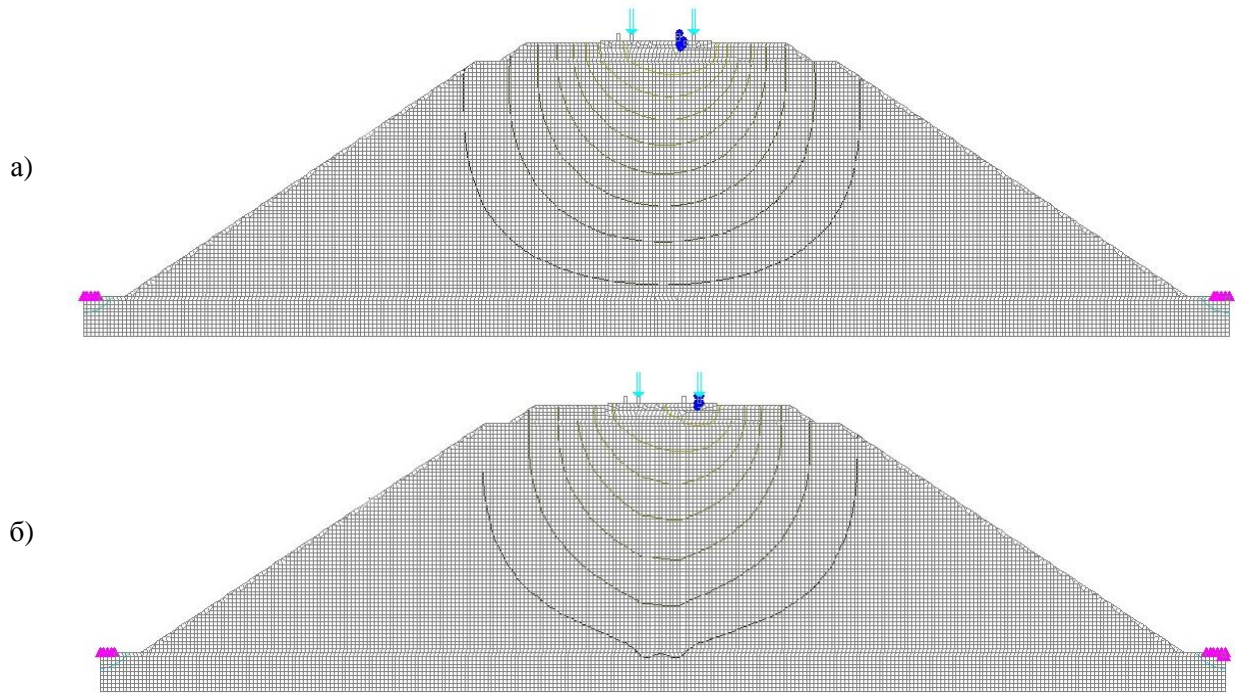


Рис. 3. Деформований стан земляного полотна (потяг на рейках 1520 мм) (вертикальні переміщення, мм; крок ізоліній фіксований і складає 5,0 мм) із підсиленням палею довжиною: а) 0 м (непідсилене); б) 6 м

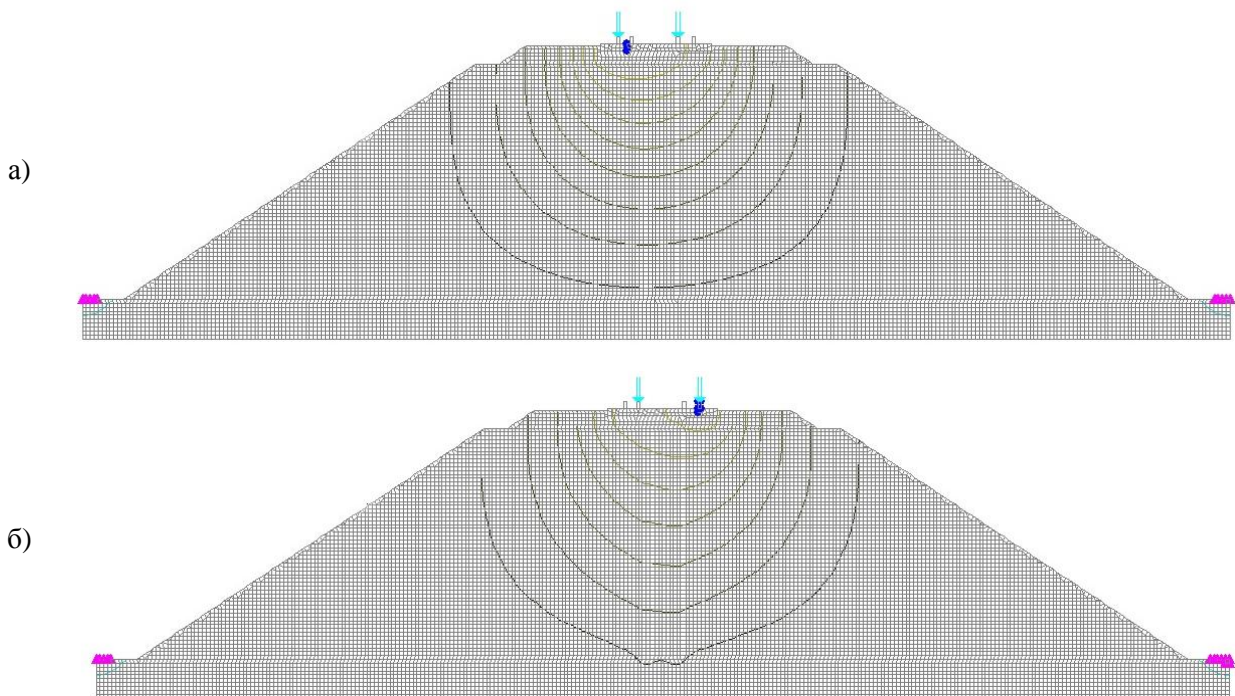


Рис. 4. Деформований стан земляного полотна (потяг на рейках 1435 мм) (вертикальні переміщення, мм; крок ізоліній фіксований і складає 5,0 мм) із підсиленням палею довжиною: а) 0 м (непідсилене); б) 6 м

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

Не викликає сумнівів, що введення палі змінює характер ізоляції. Вони, на відміну від непідсиленого земляного полотна (рис. 3, а і 4, а) втрачають плавність та гладкість. Наявність елемента, чий модуль пружності в 5,6 разів більше модуля пружності суглинку, формує нову картину деформування.

Якісний аналіз положення потягу (на рейках 1520 мм – рис. 3, на рейках 1435 мм – рис. 4) свідчить про те, що зменшення колії та її асиметричне знаходження на шпалі збільшує вертикальні деформації, але незначно. Найбільшу проблему складає саме асиметричність розподілу вертикальних переміщень (рис. 3, б і 4, б).

Максимальний якісний ефект спостерігається у випадку вертикальних переміщень (рис. 4). Вертикальний елемент підсилення (грунтоце-

ментна мікропала) навіть довжиною 2 м значно впливає на розподіл ізоляції, а для довжини 6 м є кардинальними.

Важливим висновком є те, що збільшення довжини вертикального елемента підсилення надає зменшення переміщень в 1,1...1,2 рази. Це може бути основою для первинного рішення щодо вибору довжини вертикального елемента підсилення, виходячи з економічних умов та запланованого рівня зменшення переміщень.

Отримані результати чисельного аналізу надали змогу отримати значення горизонтальних (рис. 5) та вертикальних (рис. 6) напружень, а також отримати закономірності напруженого стану земляного полотна до впровадження європейської колії.

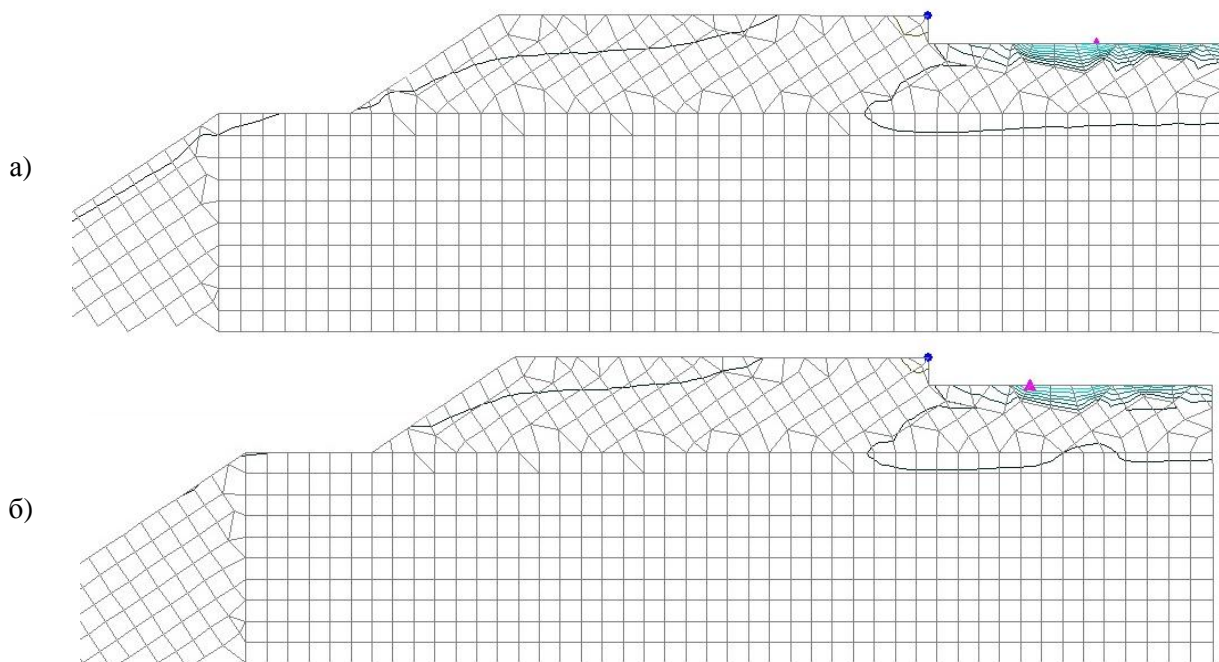


Рис. 5. Деформований стан земляного полотна (горизонтальні напруження, кПа; крок ізоляції фіксований і складає 1000,0 кПа) із підсиленням палею довжиною: а) 0 м (непідсилене); б) 6 м

Результати отримані для чотирьох варіантів (без палі, з палею довжиною 2,0, 4,0 і 6,0 м); для вертикального елемента довжиною 2,0 і 4,0 м для економії місця не наведені, але дані про напруження цього варіанту проаналізовані. Для презентації результатів напруженого стану застосований особливий фільтр відображення розрахункового комплексу SCAD. З його допомогою відображені горизонтальні та вертикальні переміщення для всіх варіантів підсилен-

ня, причому для кожного з них обрано постійний крок компоненти деформування (1000,0 кПа для горизонтальних переміщень і 100,0 кПа для вертикальних напружень). Така презентація, окрім кількісного аналізу, дозволяє і якісний, оскільки ізоляції на рис. 5 і 6 мають однакове значення. Для зручності в кожній з картин напруженого стану показано дві характерні точки: 1) максимального значення (коло); 2) мінімального значення (трикутник).

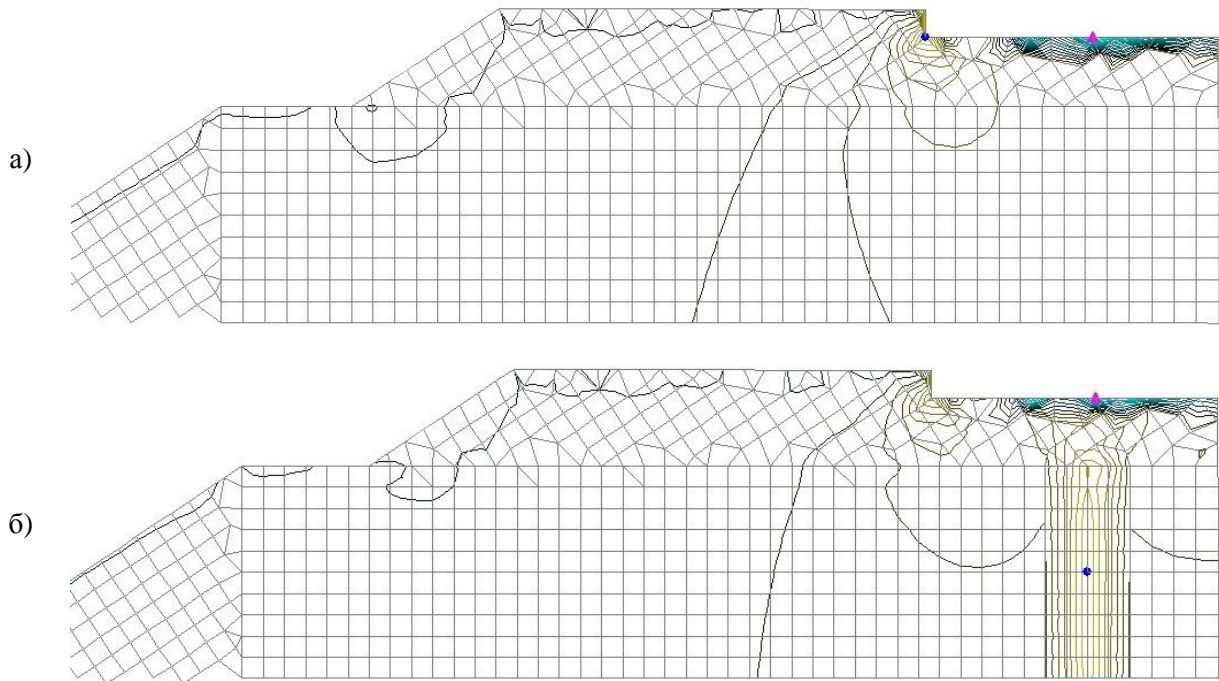


Рис. 6. Деформований стан земляного полотна (вертикальні напруження, мм; крок ізоляції фіксований і складає 100,0 кПа) із підсиленням палею довжиною: а) 0 м (непідсилена); б) 6 м

Навіть якісний аналіз отриманих результатів доводить, що введення в ґрунтове середовище вертикальних елементів, що мають підвищені деформаційні властивості (модуль пружності або деформації матеріалу палі або мікропалі), є ефективним методом зниження напруженого стану (рис. 6).

Не викликає сумнівів, що введення палі змінює характер ізоляції. Вони, на відміну від непідсиленого земляного полотна (рис. 5, а і 5.6, а) втрачають плавність та гладкість. Наявність елемента, чий модуль пружності в 5,6 разів більше модуля пружності суглинку, формує нову картину деформування. Так, ядро максимальних горизонтальних переміщень зменшується, а характерна ізоляція стискається (рис. 5, б), щоб замкнутися всередині земляного полотна. Це пояснюється тим, що вертикальний елемент перешкоджає також і горизонтальним деформаціям (рис. 5, б).

Максимальний якісний ефект спостерігається у випадку вертикальних напружень (рис. 6). Вертикальний елемент навіть довжиною 2 м значно впливає на розподіл ізоляції (рис. 6). Ці зміни можна простежити на прикладі характер-

ної ізоляції, яка є сталюю та знаходиться всередині вертикального елемента підсилення.

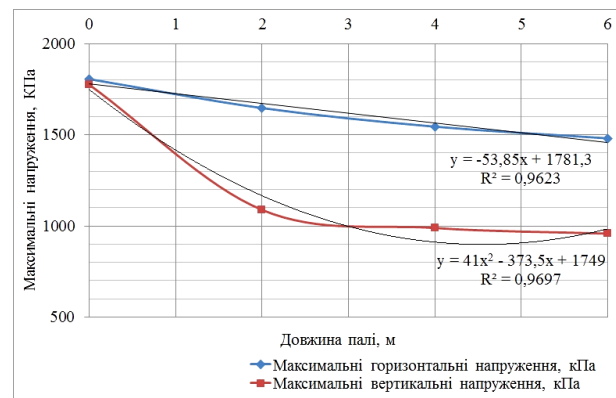


Рис. 7. Закономірності зміни вертикальних та горизонтальних напружень земляного полотна при варіації довжини вертикального елемента підсилення

Кількісний аналіз максимальних напружень дозволив побудувати їхні закономірності та їх апроксимувати (рис. 7) лінійними функціями для горизонтальної компоненти та поліноміальними другого ступеня для вертикальної (коефіцієнт кореляції $R^2=0,96\dots0,97$).

Наукова новизна та практична значимість

Наукову новизну роботи складає те, що вперше на основі закономірностей напружено-деформованого стану земляного полотна отримано картину формування напружень та розповсюдження деформацій до і після влаштування європейської колії.

Практична значимість полягає в тому, що на основі результатів чисельного аналізу з'ясовано, що збільшення довжини вертикального елемента підсилення на 2,0 м надає зменшення переміщень на 10...20%. Ці дані надають змогу для створення методики первинного підбору довжини вертикального елемента.

Подяка

Дослідження, результати яких викладені в цій статті, проводились за підтримки гранту Національного фонду досліджень України під час реалізації проекту «Наукове обґрунтування впровадження європейської колії на території України в повоєнний період» (реєстраційний номер проекту 2022.01/0021), який було отримано в рамках конкурсу «Наука для відбудови України у воєнний та повоєнний періоди».

Висновки

В статті викладено результати комплексу досліджень впливу суміщеної колії на земляне полотно українських залізниць. Вирішена науково-технічна задача є піонерною, оскільки розглянута проблема інтеперабельності української залізниці з європейською в наданому аспекті ще не була визначена.

Отримано закономірності формування напружено-деформованого стану земляного полотна до і після впровадження європейської колії, які надають змоги прийняття практичних рішень підсилення існуючих об'єктів для налагодження їхньої чіткої експлуатації.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

Alkhodour, A., Tiutkin, O., Dubinchyk, O., & Mirosnyk, V. (2024). Regularities of the strain state of the embankment when varying the vertical element length of strengthening. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1348, 012016. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1348/1/012016>

Briançon, L., & Simon, B. (2017). Pile-supported embankment over soft soil for a high-speed line. *Geosynthetics International*, 24(3), 293-305.

Fischer, S., Kurhan, D., Kurhan, M., & Hmelevska, N. (2024). Analysis of stress-strain state changes in railway tracks during transition to European gauge. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1348, 012029. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1348/1/012029>

Pshinko, O., Petrenko, V., Tiutkin, A., et al. (2019). Comparative analysis of calculation results of supporting structure of soil-cement piles. *TRANSPORT MEANS 2019. Sustainability: Research and Solutions*, II, 820-828.

Tiutkin, O. L., Neduzha, L., & Kalivoda, J. (2021). Finite-element Analysis of Strengthening the Subgrade on the Basis of Boring and Mixing Technology. *Transport Problems*, 16(2), 1-10. DOI: <https://doi.org/10.21307/tp-2021-034>

Tiutkin, O., Radkevych, A., Dubinchyk, O., & Kharchenko, V. (2024). Parametric analysis of a strain state of a soil base strengthened with vertical elements. *Mining of Mineral Deposits*, 18(2), 104-112. DOI: <https://doi.org/10.33271/mining18.02.104>

Kurhan, M., Kurhan, D., & Hmelevska, N. (2024). Innovative Approaches to Railway Track Alignment Optimization, in Curved Sections. *Acta Polytechnica Hungarica*, 21(1), 207-220. DOI: <https://doi.org/10.12700/APH.21.1.2024.1.13>

Крисан, В. І., Крисан, В. В., Петренко, В. Д., & Тют'кін, О. Л. (2023). Аналіз результатів випробування підсилення земляного полотна армованими ґрунтоцементними палями. *Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика*, 23, 45-53. DOI: <https://doi.org/10.15802/bttrp2023/281128>

Курган, М. Б., Курган, Д. М., Бражник, М. Ю., & Ковальський, Д. Л. (2019). Особливості напружено-деформованого стану суміщеної залізничної колії. *Наука та прогрес транспорту*, 1(79), 51-63. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2019/158471>

Петренко, В. Д., Андреев, В. С., & Харченко, В. В. (2021). Порівняльний аналіз технологій влаштування мікропаль під час підсилення слабких ґрунтових основ. *Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика*, 19, 69-77. DOI: <https://doi.org/10.15802/bttrp2021/233978>

Петренко, В. Д., Тют'кін, О. Л., Крисан, В. І., & Крисан, В. В. (2019). Відновлення міцносних та деформативних характеристик земляного полотна та його основи армуванням ґрунтоцементними елементами. *Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика*, 16, 65-74. DOI: <https://doi.org/10.15802/bttrp2019/189681>

O. L. TIUTKIN^{1*}, V. A. MIROSHNYK², S. I. BIELIKOVA³

^{1*} Department «Transport Infrastructure», Ukrainian State University of Science and Technologies, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (066) 290 45 18, e-mail o.l.tiutkin@ust.edu.ua, ORCID 0000-0003-4921-4758

² Department «Transport infrastructure», Ukrainian State University of Science and Technologies, Lazaryan Str., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (097) 828 64 87, e-mail v.a.miroshnyk@ust.edu.ua, ORCID 0000-0002-8115-0128

³ Department «Transport Infrastructure», Ukrainian State University of Science and Technologies, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (050) 756 31 21, e-mail 7563121@gmail.com, ORCID 0000-0003-0707-7791

SUBSTANTIATION OF THE REGULARITIES OF THE SUBGRADE STRESS-STRAIN STATE AFTER THE IMPLEMENTATION OF THE EUROPEAN TRACK

Purpose. The implementation of the European track (1435 mm) on the existing subgrade, built on the territory of Ukraine, is a factor that leads to a change in the stress-strain state. The purpose of the article is to substantiate the regularities of the stress-strain state of the subgrade based on the results of numerical analysis of finite-element models. **Methodology.** For numerical analysis based on the finite element method, a 6 m high subgrade model for the combined track was developed. The developed model reproduces all the real geometric characteristics of the subgrade, the upper structure of the track, as well as the sleeper for the combined track. The developed model allows to vary the application of the train load with the setting of a couple of forces on the rails, which have the Ukrainian value of the track gauge (1520 mm), as well as the European one. The model also simulates the reinforcement of the subgrade for four options (without pile, with pile length of 2.0, 4.0 and 6.0 m). **Findings.** The results of the numerical analysis made it possible to obtain the values of horizontal and vertical stresses, as well as to obtain the regularities of the stress-strain state of the subgrade before the introduction of the European track. Qualitative analysis of the train position shows that the reduction of the track gauge and its asymmetric location on the sleeper increases vertical deformations. The biggest problem is precisely the asymmetric distribution of vertical displacements. It was found that the increase in the length of the vertical reinforcement element provides a reduction in displacements by 1.1 ... 1.2 times. It was found that the patterns of changes in the displacements of the subgrade, when the length of the vertical reinforcement element is varied, are linear for the horizontal component and polynomial of the second degree for the vertical component. **Originality.** For the first time, based on the regularities of the stress-strain state of the subgrade, a picture of the stresses formation and the distribution of deformations before and after the implementation of the European track was obtained. **Practical value.** Based on the results of the numerical analysis, it was found that increasing the length of the vertical reinforcement element by 2.0 m provides a reduction in displacements by 10 ... 20 %. This data makes it possible to create a methodology for the initial selection of the reinforcement element parameters.

Keywords: subgrade; strengthening; stress-strain state; vertical element; European track; regularities of parameters change

REFERENCES

- Alkhdour, A., Tiutkin, O., Dubinchyk, O., & Miroshnyk, V. (2024). Regularities of the strain state of the embankment when varying the vertical element length of strengthening. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1348, 012016. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1348/1/012016> (in English)
- Briançon, L., & Simon, B. (2017). Pile-supported embankment over soft soil for a high-speed line. *Geosynthetics International*, 24(3), 293-305. (in English)
- Fischer, S., Kurhan, D., Kurhan, M., & Hmelevska, N. (2024). Analysis of stress-strain state changes in railway tracks during transition to European gauge. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1348, 012029. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1348/1/012029> (in English)
- Pshinko, O., Petrenko, V., Tiutkin, A., et al. (2019). Comparative analysis of calculation results of supporting structure of soil-cement piles. *TRANSPORT MEANS 2019. Sustainability: Research and Solutions*, II, 820-828. (in English)

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

Tiutkin, O. L., Neduzha, L., & Kalivoda, J. (2021). Finite-element Analysis of Strengthening the Subgrade on the Basis of Boring and Mixing Technology. *Transport Problems*, 16(2), 1-10. DOI: <https://doi.org/10.21307/tp-2021-034> (in English)

Tiutkin, O., Radkevych, A., Dubinchyk, O., & Kharchenko, V. (2024). Parametric analysis of a strain state of a soil base strengthened with vertical elements. *Mining of Mineral Deposits*, 18(2), 104-112. DOI: <https://doi.org/10.33271/mining18.02.104> (in English)

Kurhan, M., Kurhan, D., & Hmelevska, N. (2024). Innovative Approaches to Railway Track Alignment Optimization, in Curved Sections. *Acta Polytechnica Hungarica*, 21(1), 207-220. DOI: <https://doi.org/10.12700/APH.21.1.2024.1.13> (in English)

Krysan, V. I., Krysan, V. V., Petrenko, V. D., & Tiutkin, O. L. (2023). Analiz rezultativ vyprobuvannya pidsylennia zemlianooho polotna armovanyimi gruntotsementnymi paliamy. *Mosty ta tuneli: teoriia, doslidzhennia, praktyka*, 23, 45-53. DOI: <https://doi.org/10.15802/bttrp2023/281128> (in Ukrainian)

Kurhan, M. B., Kurhan, D. M., Brazhnyk, M. Yu., & Kovalskyi, D. L. (2019). Osoblyvosti napruzhenodeformovanoho stanu sumishchenoi zaliznychnoi kolii. *Nauka ta prohres transportu*, 1(79), 51-63. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2019/158471> (in Ukrainian)

Petrenko, V. D., Andrieiev, V. S., & Kharchenko, V. V. (2021). Porivnialnyi analiz tekhnolohii vlashtuvannia mikropal pid chas pidsylennia slabkykh gruntovykh osnov. *Mosty ta tuneli: teoriia, doslidzhennia, praktyka*, 19, 69-77. DOI: <https://doi.org/10.15802/bttrp2021/233978> (in Ukrainian)

Petrenko, V. D., Tiutkin, O. L., Krysan, V. I., & Krysan, V. V. (2019). Vidnovlennia mitsnosnykh ta deformatyvnykh kharakterystyk zemlianooho polotna ta yoho osnovy armuvanniam gruntotsementnymi elementamy. *Mosty ta tuneli: teoriia, doslidzhennia, praktyka*, 16, 65-74. DOI: <https://doi.org/10.15802/bttrp2019/189681> (in Ukrainian)

Надійшла до редколегії 16.09.2024.

Прийнята до друку 07.10.2024.