

## МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

УДК 624.154:624.046.2

О. І. ДУБІНЧИК<sup>1\*</sup>, Л. О. НЕДУЖА<sup>2</sup>

<sup>1\*</sup> Кафедра «Транспортна інфраструктура», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 53, ел. пошта olga\_dubinichik@i.ua, ORCID 0000-0003-4059-2357

<sup>2</sup> Кафедра теоретичної та будівельної механіки, Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 11, ел. пошта lnorhen@i.ua, ORCID 0000-0002-7038-3006

### ОБҐРУНТУВАННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ПАЛЬОВОГО ФУНДАМЕНТУ З ВИКОРИСТАННЯМ ПРОГРАМНИХ КОМПЛЕКСІВ

**Мета.** Мостові опори, що мають високий ростверк, потребують більшої уваги при розрахунку їх міцності по причині складних умов роботи паль. Метою наукової статті є обґрунтування напружено-деформованого стану пальового фундаменту мостової конструкції з використанням програмних обчислювальних комплексів SCAD і ЛІРА-САПР. **Методика.** Проведено аналіз програмних засобів, що застосовуються для автоматизації проектування фундаментів. Виявлено основні параметри програмних комплексів SCAD та ЛІРА-САПР. З їх допомогою побудовано скінченно-елементні моделі пальового фундаменту мостової опори з високим ростверком. В розроблених моделях максимально відображені властивості ґрунтової основи та фундаменту, його ростверку та паль, геометричні характеристики та враховано вплив розбивки на скінченні елементи. Були виконані розрахунки в програмних комплексах SCAD і ЛІРА-САПР із моніторингом розрахункового процесу. **Результати.** В ході чисельного аналізу пальового фундаменту мостової конструкції із високим ростверком визначено вертикальні переміщення, силові фактори (нормальні сили та згинальні моменти) в палях та напруження в тілі опори та палях. На основі цих результатів виконано аналіз, який поєднано із порівнянням отриманих результатів. Впровадження в практику зазначених програмних засобів SCAD і ЛІРА-САПР дозволяє істотно скоротити терміни проектування, знизити собівартість проєктів, підвищити якість і ефективність капіталовкладень. **Наукова новизна.** Проведене порівняння напружено-деформованого стану, отриманого в ході чисельного аналізу програмних засобів SCAD і ЛІРА-САПР, яке довело різницю в підході до моделювання в цих комплексах. **Практична значимість.** Результати обґрунтування напружено-деформованого стану пальового фундаменту з використанням програмних комплексів надали змогу перевірити конструктивне рішення всіх елементів фундаменту мостової конструкції із високим ростверком.

*Ключові слова:* мостова опора; пальовий фундамент; високий ростверк; напружено-деформований стан; чисельний аналіз; програмний комплекс

#### Вступ

Фундамент є відповідальним елементом мостової споруди, оскільки забезпечення його міцності та стійкості є запорукою довготривалої нормальної експлуатації мостового переходу. В загальному об'ємі будівництва влаштування фундаментів має значну питому вагу як за вартістю, так і за трудомісткістю потрібних будівельних робіт.

Аналіз статистичних даних показує, що значна частина аварій мостів була пов'язана з руйнуванням фундаментів (Scheer, 2010; Мирошник, Ключник, & Журбенко, 2012). Недоброякісне спорудження фундаментів є причиною ви-

никнення неприпустимих деформацій. В деяких випадках при будівництві навпаки влаштовують фундаменти більших розмірів. Це призводить до виконання непотрібних додаткових робіт на будівельному майданчику, недостатньому використанню несучої здатності ґрунтів основи і перевитраті будівельних матеріалів.

Внаслідок різноманіття умов зведення фундаментів, потрібно уважно підходити до їх проектування. Часто для однієї тієї ж споруди можна намітити декілька технічно обґрунтованих типів фундаментів. Завдання полягає не тільки в тому, щоб з усіх можливих варіантів на основі техніко-економічного аналізу обрати най-

більш доцільний варіант, але й щоб правильно запроектувати і побудувати той чи інший фундамент, який задовольняв би вимогам міцності, стійкості, надійності та довговічності, а також забезпечував надійну експлуатацію споруди (ДБН В.1.2-2:2006, 2006)).

Досвід будівництва мостових споруд на різних ґрунтах доводить, що найбільш доцільно використовувати пальові фундаменти (Швец, Шаповал, Петренко, & al., 2008; Dubinchuk, Bannikov, Kildieiev, & Kharchenko, 2020). Особливо це відноситься до мостів, опори яких мають високий ростверк і потребують більшої уваги при розрахунку їх міцності по причині складних умов роботи паль.

Для якісного проектування фундаментів необхідно знати особливості їх роботи під дією зовнішніх навантажень і застосовувати новітні програмні комплекси для обґрунтування напружено-деформованого стану (НДС).

В практиці проектування пальових фундаментів все більшого значення набуває застосування засобів обчислювальної техніки. При цьому використовуються окремі прикладні програми, комплекси програм, пакети прикладних програм (ППП) і системи автоматизації проектних робіт (САПР).

САПР є результатом об'єднання методичного, програмного, інформаційного і технічного забезпечення. САПР забезпечує можливість комплексного і систематичного застосування обчислювальної техніки користувачами, які не спеціалізуються в програмуванні.

Серед найбільш відомих програмних засобів, що застосовуються для автоматизації проектування фундаментів, можна виділити: програми обробки результатів інженерно-геологічних вишукувань; програми автоматизації розрахунків фундаментів різних типів по методикам, які реалізують рекомендації будівельних норм; програми, що забезпечують можливість вирішення завдань механіки ґрунтів, основ і фундаментів на основі нелінійних математичних моделей (Бартоломей, & Пилягин, 1988; Винников, 2004; Стрелец-Стрелецкий, Журавлев, & Водопьянов, 2019); програмні комплекси, що використовують метод скінчених елементів як базовий метод чисельного аналізу.

Окрім цих груп, в структурі програмного забезпечення виділяються сервісні програми,

що застосовуються в тій чи іншій мірі у всіх перерахованих розділах для формування і виводу результатів виконання програм у вигляді таблиць, графіків, наборів даних на зовнішніх запам'ятовуючих пристроях.

### Мета

Метою наукової статті є обґрунтування напружено-деформованого стану пальового фундаменту мостової конструкції з використанням програмних обчислювальних комплексів SCAD і ЛПА-САПР.

### Методика

**Система програмних засобів Structure CAD (SCAD) (Фірма SCAD Soft).** Обчислювальний комплекс SCAD – потужна обчислювальна система, що реалізує чисельний аналіз конструкцій різного призначення (Перельмутер, & Сливкер, 2002).

Єдине графічне середовище синтезу розрахункової схеми (геометрії) і аналізу результатів забезпечує визначні можливості моделювання розрахункових схем від найпростіших до найскладніших конструкцій, задовольняючи потреби досвідчених професіоналів і залишаючись при цьому доступною для початківців.

Високопродуктивний процесор дозволяє вирішувати завдання великої розмірності (сотні тисяч ступенів свободи при статичних і динамічних впливах) (Карпиловский, Криксунов, Перельмутер, & al., 2000).

SCAD включає розвинену бібліотеку скінчених елементів для моделювання стержневих, пластинчастих, твердотільних і комбінованих конструкцій, модулі аналізу стійкості, формування розрахункових сполучень зусиль, перевірки напруженого стану елементів конструкцій з позиції різних теорій міцності, визначення зусиль взаємодії фрагмента з рештою конструкцією, обчислення зусиль і переміщень від комбінацій навантажень (Перельмутер, & Сливкер, 2002).

До складу комплексу включені програми підбору арматури в елементах залізобетонних конструкцій і перевірки перетинів елементів металоконструкцій (Карпиловский, Криксунов, Перельмутер, & al., 2000), а також пальових фундаментів різного призначення, що взаємодіють із ґрунтом (Перельмутер, & Сливкер, 2002; Tiutkin, Keršys, & Neduzha, 2020).

Для проведення обґрунтування НДС стану пального фундаменту з використанням програмних комплексів обрано мостову опору для залізничного мосту. Вид дискретизації моделі пального фундаменту мостової опори на скінченні елементи в програмному комплексі SCAD наведено на рис. 1.

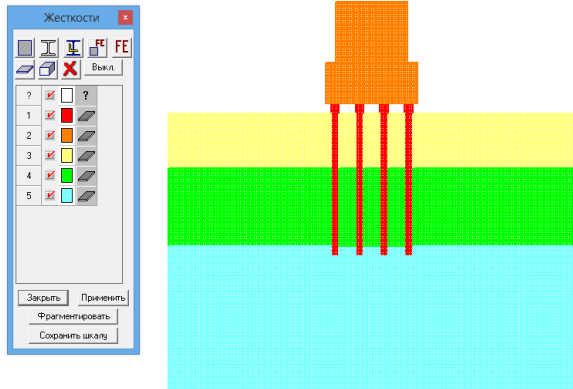


Рис. 1. Модель пального фундаменту в ПК SCAD

Особливістю скінченно-елементної моделі в ПК SCAD є те, що вона є чисто пластинчастою, причому і ґрунтова основа, і палі, і тіло опори моделюється виключно ними. З одного боку, це є перевагою моделі, оскільки в ній зберігається двовірна метрика, але, з іншого боку, як буде видно з результатів, силові фактори (моменти і нормальні сили) в палях не можуть бути отримані саме тому, що ці елементи змодельовані як пластини (елемент 36 ПК SCAD).

**Програмний комплекс ЛПА (ПК ЛПА).** ЛПА-САПР – багатофункціональний програмний комплекс для розрахунку, дослідження і проектування конструкцій різного призначення.

ПК ЛПА-САПР з успіхом застосовується в розрахунках об'єктів будівництва, машинобудування, мостобудування, атомної енергетики, нафтовидобувної промисловості і в багатьох інших сферах, де актуальні методи будівельної механіки (Стрелец-Стрелецкий, Журавлев, & Водопьянов, 2019).

Окрім загального розрахунку моделі об'єкта на всі можливі види статичних навантажень, ПК ЛПА автоматизує ряд процесів проектування: визначення розрахункових сполучень навантажень і зусиль, призначення конструктивних елементів, підбір і перевірка перерізів конструкцій з формуванням ескізів робочих креслень (Стрелец-Стрелецкий, Журавлев, & Водопьянов, 2019).

ПК ЛПА дозволяє досліджувати загальну стійкість розрахункової моделі, перевірити міцність перерізів елементів з різних теорій руйнування. ПК ЛПА-САПР надає можливість проводити розрахунки об'єктів з урахуванням фізичної, геометричної, фізико-геометричної і конструктивної нелінійностей, моделювати процес зведення споруди з урахуванням монтажу-демонтажу елементів з відстеженням змін фізичних властивостей матеріалів (Стрелец-Стрелецкий, Журавлев, & Водопьянов, 2019).

Модель пального фундаменту в програмному комплексі ЛПА при розбивці на скінченні елементи має вигляд, який наведено на рис. 2.

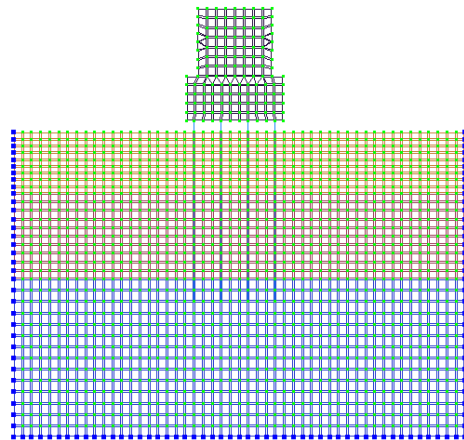


Рис. 2. Модель пального фундаменту в ПК ЛПА

На відміну від скінченно-елементної моделі в ПК SCAD, ця модель є гібридною: тіло опори і ґрунтова основа змодельовані пластинами, а палі – стержневими елементами. Палі розглядались як фізично нелінійний стержень для моделювання односторонньої роботи ґрунту на стиск з урахуванням зсуву за схемою плоскої деформації. Для розрахунків характеристики ґрунтів, навантаження і характеристики палі задавалися через СЕ 281-284 (пластина).

Палі в скінченно-елементних моделях обох ПК прийняті розміром 40×40 см. Навантаження також однакові і складають (ДБН В.1.2-2:2006, 2006):  $N = 222$  кН – сумарне вертикальне навантаження на опору,  $Q = 7$  кН – горизонтальна складова навантажень,  $M_y = 157$  кН·м – момент у рівні розрахункової поверхні опори.

Після надання всіх значень характеристик були виконані розрахунки в обох програмних комплексах із моніторингом розрахункового процесу.

Результати

Нижче наведені результати в програмних комплексах SCAD і ЛІРА-САПР (для економії місця наведено лише найбільш характерні). Результати розрахунку в ПК SCAD наведені на рис. 3 і 4.

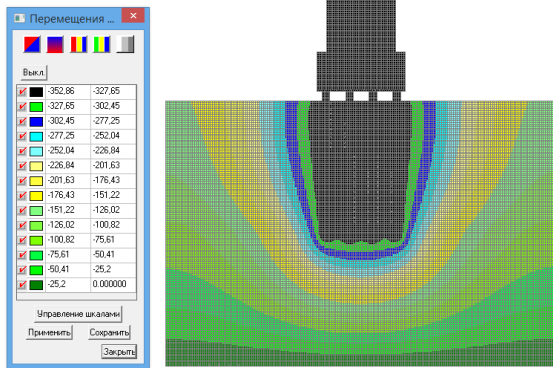


Рис. 3. Ізополя вертикальних переміщень від власної ваги

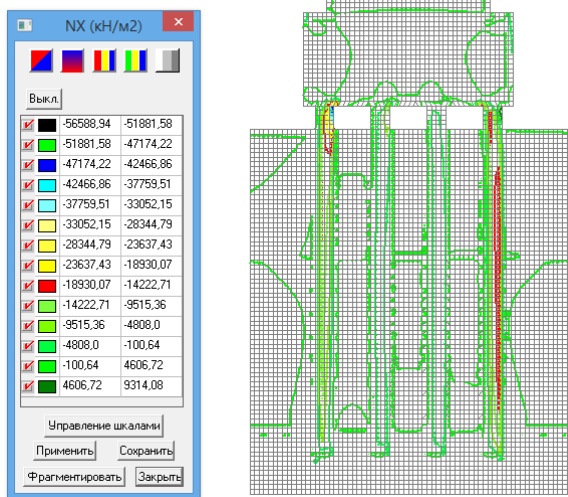


Рис. 4. Ізолії напружень по осі X від комбінації навантажень

Отримано, що величина максимального переміщення дорівнює – 352 мм, а мінімального – 25 мм (рис. 3). Цей випадок характерний для завантаження власною вагою і проаналізований як базовий варіант для порівняння із комбінаціями навантажень від рухомого складу. Максимальні горизонтальні напруження (рис. 4) сягають 56,5 МПа, що свідчить про зони тріщиноутворення в бетоні високого ростверку. Однак вони є локальними і не свідчать про загальне руйнування конструкції, оскільки середній рівень горизонтальних напружень менше міцності бетону (9,5...14,2 МПа).

Результати розрахунку в ПК ЛІРА представлені на рисунках 5 і 6.

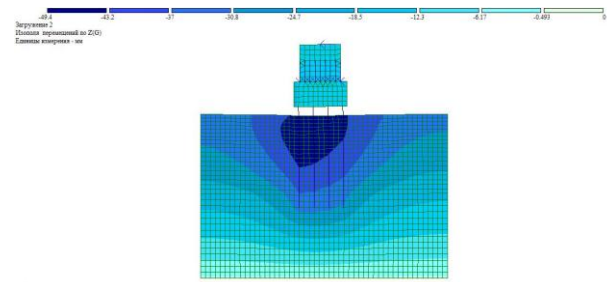


Рис. 5. Ізополя вертикальних переміщень від комбінації навантажень

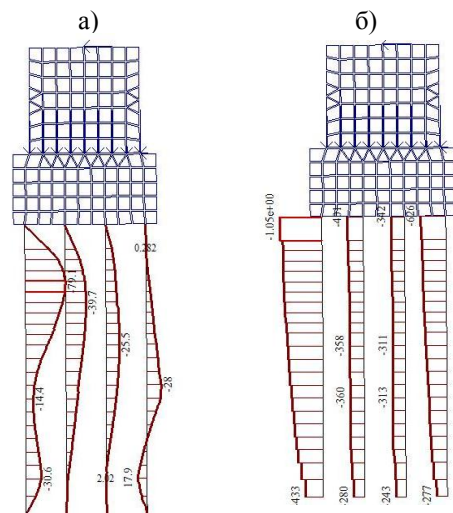


Рис. 6. Розподіл силових факторів в моделі пальового фундаменту: а) згинальні моменти  $M_x$ ; б) нормальні сили  $N$

Як видно, розподіл вертикальних переміщень від комбінації навантажень є нерівномірним, що пояснюється значним впливом моменту від маси та рухомого складу (рис. 5). Максимальні переміщення складають 41,2...49,2 мм, зона їх концентрації знаходиться на межі ґрунтового середовища та обрізу паль в проміжку між ростверком і основою, що потребує додаткового дослідження із з'ясування впливу розмиву на роботу пальового фундаменту.

Величина максимального моменту, отримана в ПК ЛІРА, складає 79,1 кН·м, поздовжня сила в місці максимального моменту дорівнює 992 кН (рис. 6, а); величина максимального зусилля в палях складає 12,7 кН, а мінімального – -51,67 кН (рис. 6, б). Близькість розташування максимального розрахованого моменту на межі ґрунтового середовища та обрізу паль в проміжку між ростверком і основою також потребує додаткової перевірки у випадку розмиву.

**Наукова новизна та практична значимість**

Проведене порівняння НДС, отриманого в ході чисельного аналізу програмними засобами SCAD і ЛІРА-САПР, доводить різницю в підході до моделювання в цих комплексах (створення моделей однієї метрики або гібридних; підхід до нелінійності; моделювання паль тощо). Особливості моделювання в ПК SCAD і ПК ЛІРА-САПР доводять також те, що найбільш адекватним складній задачі обґрунтування НДС пальового фундаменту мостової конструкції з високим ростверком є комплексний чисельний аналіз одразу в двох ПК.

**Висновки**

В ході чисельного аналізу пальового фундаменту мостової конструкції із високим ростверком визначено вертикальні переміщення, силові фактори (нормальні сили та згинальні моменти) в палях та напруження в тілі опори та палях. На основі цих результатів виконано аналіз, який поєднано із порівнянням отриманих результатів.

**СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ**

Scheer, J. (2010). *Failed bridges: case studies, causes and consequences*. Berlin: Ernst & Sohn.  
Dubinchuk, O., Bannikov, D., Kildieiev, V., & Kharchenko, V. (2020). Geotechnical analysis of optimal parameters for foundations interacting with loess area. *E3S Web of Conferences, II International Conference Essays of Mining Science and Practice*, 168, 00024.

Tiutkin, O., Keršys, R., & Neduzha, L. (2020). Research of the strained state in the "subgrade – base" system at the variation of deformation parameters. *Transport Means 2020. Sustainability: Research and Solutions, Part I*, 446-451.  
Бартоломей, А. А., & Пилягин, А. В. (1988). Напряженно-деформированное состояние оснований фундаментов из пирамидальных свай. *Основания, фундаменты и механика грунтов*, 3, 28-30.  
Винников, Ю. Л. (2004). *Математичне моделювання взаємодії фундаментів з ущільненими основами при їх зведенні та наступній роботі*. Полтава: ПолтНТУ ім. Юрія Кондратюка.  
ДБН В.2.1-10-2009 (2009). *Основи та фундаменти споруд. Основні положення проектування*. Київ: Мінрегіонбуд України.  
ДБН В.1.2-2:2006 (2006). *Навантаження і впливи. Норми проектування*. Київ: Мінбуд України.  
Карпиловский, В. С., Криксунов, Э. З., Перельмутер, А. В., & al. (2000). *SCAD для пользователя*. Киев: ВВП «Компас».  
Мирошник, В. А., Ключник, С. В., & Журбенко, М. К. (2012). Проблемы аварийности мостовых конструкций. *Мосты и тоннели: теория, исследования, практика*, 1, 55-59.  
Перельмутер, А. В., & Сливкер, В. И. (2002). *Расчетные модели сооружений и возможность их анализа*. Киев: Сталь.  
Стрелец-Стрелецкий, Е. Б., Журавлев, А. В., & Водопьянов, Р. Ю. (2019). *ЛИРА-САПР. Книга 1. Основы*. Киев: LIRALAND.  
Швец, В. Б., Шаповал, В. Г., Петренко, В. Д., & al. (2008). *Фундаменты промышленных, гражданских и транспортных сооружений на слоистых грунтовых основаниях*. Днепропетровск: Нова ідеологія.

O. I. DUBINCHUK<sup>1\*</sup>, L. O. NEDUZHA<sup>2</sup>

<sup>1\*</sup> Department «Transport infrastructure», Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St. 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 53, ел. пошта olga\_dubinchik@i.ua, ORCID 0000-0003-4059-2357

<sup>2</sup> Department of Theoretical and Structural Mechanics, Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St. 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 11, ел. пошта lnorhen@i.ua, ORCID 0000-0002-7038-3006

## JUSTIFICATION OF THE STRESS-STRAIN STATE OF THE PILE FOUNDATION USING SOFTWARE COMPLEXES

**Purpose.** Bridge supports with a high pile caps require more attention when calculating their strength due to the difficult operating conditions of the piles. The purpose of the scientific article is to substantiate the stress-strain state of the pile foundation of the bridge structure using software computing systems SCAD and LIRA-CAD. **Methodology.** An analysis of software used to automate the design of foundations was conducted. The main parameters of SCAD and LIRA-CAD software packages are yielded. With their help, finite-element models of the pile foundation of the bridge support with a high pile cap were built. The developed models maximally reflect the properties of the

soil base and foundation, its pile cap and piles, geometric characteristics and the influence of the finite elements meshing is considered. Calculations were performed in SCAD and LIRA-CAD software packages with monitoring of the calculation process. **Findings.** During the numerical analysis of the pile foundation of the bridge structure with a high pile cap, vertical displacements, force factors (normal forces and bending moments) in the piles and stresses in the body of the support and piles were determined. Based on these results, an analysis was performed, which is combined with a comparison of the obtained results. Implementation of SCAD and LIRA-CAD software allows to significantly reduce design time, to reduce project costs, to improve the quality and efficiency of investments. **Originality.** A comparison of the stress-strain state obtained during the numerical analysis of SCAD and LIRA-CAD software, which proved the difference in the approach to modeling in these complexes, was conducted. **Practical value.** The results of substantiation of the stress-strain state of the pile foundation with the use of software complexes made it possible to verify the design solution of all elements of the foundation of the bridge structure with a high pile cap.

*Keywords:* bridge support; pile foundation; high pile cap; stress-strain state; numerical analysis; software package

## REFERENCES

- Scheer, J. (2010). *Failed bridges: case studies, causes and consequences*. Berlin: Ernst & Sohn. (in English)
- Dubinchyk, O., Bannikov, D., Kildieiev, V., & Kharchenko, V. (2020). Geotechnical analysis of optimal parameters for foundations interacting with loess area. *E3S Web of Conferences, II International Conference Essays of Mining Science and Practice*, 168, 00024. (in English)
- Tiutkin, O., Keršys, R., & Neduzha, L. (2020). Research of the strained state in the "subgrade – base" system at the variation of deformation parameters. *Transport Means 2020. Sustainability: Research and Solutions*, Part I, 446-451. (in English)
- Bartolomey, A. A., & Pilyagin, A. V. (1988). Napryazhenno-deformirovannoe sostoyanie osnovaniy fundamentov iz piramidalnykh svay. *Osnovaniya, fundamenty i mekhanika gruntov*, 3, 28-30. (in Russian)
- Vynnykov, Yu. L. (2004). *Matematychni modeliuvannya vzaiemodii fundamentiv z ushchilnenymi osnovamy pry yikh zvedenni ta nastupni roboti*. Poltava: PolNTU im. Yurii Kondratiuka. (in Ukrainian)
- DBN V.2.1-10-2009 (2009). *Osnovy ta fundamenty sporud. Osnovni polozhennia proiektuvannia*. Kyiv: Minre-hionbud Ukrainy. (in Ukrainian)
- DBN V.1.2-2:2006 (2006). *Navantazhennia i vplyvy. Normy proektuvannia*. Kyiv: Minbud Ukrainy. (in Ukrainian)
- Karpilovskiy, V. S., Kriksunov, E. Z., Perelmutter, A. V., & al. (2000). *SCAD dlya polzovatelya*. Kiev: VVP «Kompas». (in Russian)
- Miroshnik, V. A., Klyuchnik, S. V., & Zhurbenko, M. K. (2012). Problemy avariynosti mostovykh konstruksiy. *Mosty i tonneli: teoriya, issledovaniya, praktika*, 1, 55-59. (in Russian)
- Perelmutter, A. V., & Slivker, V. I. (2002). *Raschetnye modeli sooruzheniy i vozmozhnost ikh analiza*. Kiev: Stal. (in Russian)
- Strelets-Streletskiy, Ye. B., Zhuravlev, A. V., & Vodopyanov, R. Yu. (2019). *LIRA-SAPR. Kniga I. Osnovy*. Kiev: LIRALAND. (in Russian)
- Shvets, V. B., Shapoval, V. G., Petrenko, V. D., & al. (2008). *Fundamenty promyshlennykh, grazhdanskikh i transportnykh sooruzheniy na sloistykh gruntovykh osnovaniyakh*. Dnepropetrovsk: Nova ideolohiia. (in Russian)

Надійшла до редколегії 19.10.2021.

Прийнята до друку 08.11.2021.