

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

УДК 624.151:[539.1:517.962]

В. Д. ПЕТРЕНКО^{1*}, В. В. ХАРЧЕНКО^{2*}, Р. М. ТЕРЕЩУК³, О. М. ПЕТРОВ⁴

^{1*} Кафедра «Мости та тунелі», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (050) 708 50 69, ел. пошта petrenko.diit@gmail.com, ORCID 0000-0003-2201-3593

^{2*} Кафедра «Мости та тунелі», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 53, ел. пошта harchenko-76@ukr.net, ORCID 0000-0002-7653-3001

³ Кафедра будівництва, геотехніки і геомеханіки, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», просп. Д. Яворницького, 19, м. Дніпро, Україна, 49005, тел. +38 (095) 751 25 26, ел. пошта Tereschuk.rm@gmail.com, ORCID 0000-0003-4509-2511

⁴ Кафедра «Мости та тунелі», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 53, ел. пошта olegonator12@gmail.com

ЗАЛЕЖНОСТІ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ФУНДАМЕНТІВ ТА ОСНОВ ПРИ ЇХ ВІДНОВЛЕННІ НА ОСНОВІ БУРОІН'ЄКЦІЙНИХ СВЕРДЛОВИН

Мета. Отримати залежності напружено-деформованого стану (НДС) фундаментів та основ при їх відновленні на основі буроін'єкційних свердловин для подальшого аналізу впливу розташування елементів підсилення. **Методика.** Для визначення параметрів НДС і для отримання його залежностей в фундаментах та основах при їх відновленні на основі буроін'єкційних свердловин обрано непідсилений випадок (Варіант 0) та три варіанти його підсилення (Варіант 1, Варіант 2 та Варіант 3). Підсилення виконано ґрунтоцементними палями довжиною 4 м діаметром 0,5 м, створеними на основі буроін'єкційної технології. Для чотирьох варіантів розроблено відповідні скінченно-елементні моделі. Їх чисельний аналіз проводився із застосуванням професійного ліцензійного комплексу SCAD. **Результати.** Отримано ізолінії та ізополя переміщень в моделях. Похибка між аналітичним розрахунком та чисельним аналізом складає 3 %, що свідчить про адекватність розробленої моделі. Побудовано залежності НДС фундаментів та основ при їх відновленні на основі буроін'єкційних свердловин, які свідчать, що варіантом, який максимально знижує рівень переміщень, є Варіант 1. Аналіз вертикальних переміщень доводить, що вони в центральній точці фундаменту зменшуються у 2,05 рази (Варіант 1), 1,87 рази (Варіант 2) та 1,59 рази (Варіант 3). Аналітичні закономірності напруженого стану показують стійке падіння горизонтальних напружень у 2,77 рази (Варіант 1), 1,80 рази (Варіант 2) та 1,09 рази (Варіант 3) та стійке зростання вертикальних напружень у 6,20 рази (Варіант 1), 4,06 рази (Варіант 2) та 1,38 рази (Варіант 3). **Наукова новизна.** Вона полягає в отриманні залежностей відновлення конструкцій фундаментів та основ на базі буроін'єкційних свердловин на основі чисельного аналізу НДС системи «фундамент–основа». **Практична значимість.** Полягає в обґрунтуванні зміни НДС при варіації розташування елементів відновлення, створених на основі буроін'єкційної технології.

Ключові слова: фундамент; основа; буроін'єкційні свердловини; метод скінченних елементів; напружено-деформований стан

Вступ

Довгострокова експлуатація системи «фундамент–основа», яка залежить від технології спорудження та перебігу існування, частіше усього пов'язана із поступовим вичерпанням несучої здатності (міцності) та збільшенням деформацій. Це, в свою чергу, потребує вживання заходів, що направлені на часткове, але достатнє для нормальної експлуатації вказаної системи, відновлення властивостей обох частин системи, що розглядається. Як будь-яка систе-

ма із змінними параметрами, які пов'язані в акті взаємодії, фундаменти і основи потребують зовнішньої інженерної дії, що направлена на відновлення.

Під відновленням фундаментів та основ слід розуміти приведення міцносних та деформаційних характеристик системи «фундамент–основа» до експлуатаційних, тобто таких, що забезпечують міцність, стійкість, надійність та довговічність. Відновлення основ різними шляхами може відбуватися як на стадії будівництва, так і експлуатації, відновлення фундаментів – тільки на стадії експлуатації.

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

Відновлення основ при спорудженні фундаментів часто практикується як зміна природного стану ґрунту і приведення його у стан експлуатаційний. Це досягається, наприклад, найбільш розповсюдженим методом поверхневого механічного ущільнення (Dubinchuk, Bannikov, Kildieiev, Kharchenko, 2020). Звісно, що такий метод відновлення міцносних та деформаційних характеристик ґрунту основи можливий лише на стадії будівництва. Після того, як споруджено фундамент, розпочинається його взаємодія із основою, яка може втрачати свої експлуатаційні характеристики.

Збільшення деформацій в процесі експлуатації ґрунтових основ також призводить до підвищеної деформаційної здатності фундаментів, які просідають та розпочинають процес тріщиноутворення. Відповідно, зменшення міцності основи призводить до зниження міцності фундаменту. Такий же випадок можливий і за умови того, що до початку спорудження фундаменту властивості основи не були відновлені або збільшення міцності та зменшення деформативності ґрунту відбувалося із технологічними помилками. Відновлення конструкцій фундаментів та основ в процесі їх експлуатації значно складніше, ніж при спорудженні.

Основним принципом відновлення фундаментів та основ при реконструкції є занурення різними методами вертикальних або похилих елементів підсилення (Камбефор, 1971; Малинин, 2009). Основними, найчастіше застосовуваними технологіями створення таких елементів на сьогоднішній день є три: вдавнення, буронабивна та буроін'єкційна (Covil, & Skinner, 1994; Dubinchuk, Petrenko, Ihnatenko, & Kildieiev, 2019; Малинин, 2009). Також в останній час значного розвитку отримали ще декілька технологій – бурозмішувальна (Kutzner, 1996; Krysan, V. I., Krysan, V. V., Petrenko, Tiutkin, & Andreev, 2019), електророзрядна, укручування паль тощо. Всі вони застосовуються, але найбільш практично розвинутою є буроін'єкційна, що і розглядається в наданій роботі.

Якщо аналізувати вказані технології, слід відмітити їх переваги. Усі вони дозволяють створювати елементи підсилення високої несучої здатності, причому буроін'єкційна технологія, на відміну від вдавлювання та буронабив-

ної, дозволяє створювати похилі елементи. Для усіх трьох технологій є можливість армування елементів підсилення, які залежно від інженерно-геологічних умов можуть мати довжину до 12 м (в середньому – 5...8 м) (Малинин, 2009).

Буроін'єкційна технологія відновлення фундаментів та основ базується на засадах спеціального способу хімічного закріплення ґрунтів (ХЗГ) – струминної цементації (Ржаницын, 1986; Парамонов, Кудрявцев, & Богов, 2006; Бройд, 2004; Малинин, 2009), що відома за кордоном як технологія *Jet-grouting* (Covil, & Skinner, 1994; Kutzner, 1996). Інші способи ХЗГ (силікатизація, смолізація, бітумізація, глинізація) також застосовувалися і продовжують застосовуватися, але їх частка, на відміну від цементації, дуже мала (Ржаницын, 1986).

При застосуванні *Jet-grouting* міцність та деформаційна здатність матеріалу ґрунтоцементних елементів залежить від фізико-механічних характеристик ґрунту, що відновлюється. Міцність укріпленого ґрунту на стиск в МПа наведена в джерелі (Петренко, Тют'єкін, Крисан, В. І., & Крисан, В. В., 2019); Малинин, Жемчугов, & Гладков (2011) наводять залежності одноісної міцності на стиск та модуля деформації ґрунтоцементу від обсягу цементу.

Ця технологія відпрацьована, а недоліки, такі як високий тиск в системі ін'єктування, критично проаналізовані в ряді наукових робіт. Елементи підсилення, що виконані за допомогою буроін'єкційної технології, призначені для підсилення і фундаментів, і основ, відновлюючи їх міцність та зменшуючи деформації. Застосування цієї технології в конкретних точках фундаменту дозволяє змінити нерівномірний деформований стан, вирівнявши значення переміщень та привівши їх до середнього.

На відміну від технологій вдавлювання та створення буронабивних паль, буроін'єкційна технологія є такою, що найменше вторгається систему «фундамент–основа» при проведенні операцій по створенню елементів підсилення. Проведене до початку реконструювання та при надбудові відновлення основи з допомогою буроін'єкційної технології дозволяє значно підняти несучу здатність ґрунту, підготувавши його до додаткового збільшення навантаження.

Мета

Мета роботи полягає в отриманні залежностей напружено-деформованого стану (НДС) фундаментів та основ при їх відновленні на основі бурін'єкційних свердловин.

Методика

Для визначення параметрів НДС для отримання його залежностей при відновленні фундаментів та основ на основі бурін'єкційних свердловин обрано непідсилений випадок (Варіант 0) та три варіанти його підсилення ґрунтоцементними палями довжиною 4 м діаметром 0,5 м, створеними на основі бурін'єкційної технології (рис. 1).

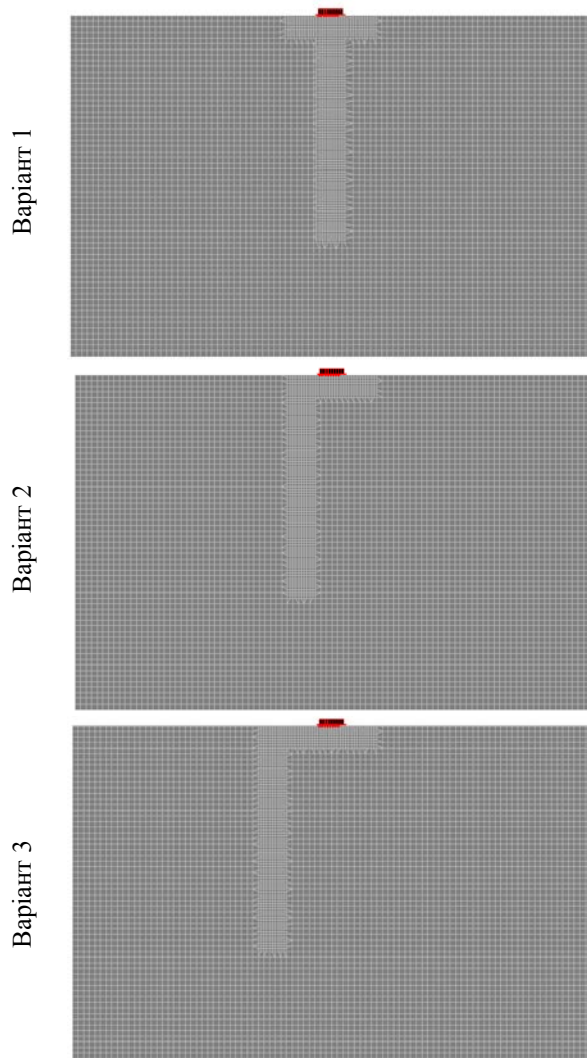


Рис. 1. Скінченно-елементні моделі підсилення системи «фундамент–основа»

Слід окремо підкреслити, що Варіант 1 можливий для втілення лише на етапі спорудження фундаменту і завчасного відновлення основи, Варіанти 2 і 3 впроваджуються і при будівництві, і при реконструкції.

Деформаційні характеристики обрані у відповідності із дослідженими ґрунтами основи: суглинок, питома вага $\gamma=1,9 \text{ т/м}^3$, модуль пружності $E=15 \cdot 10^3 \text{ кПа}$, коефіцієнт Пуассону $\nu=0,3$; фундамент – залізобетон, питома вага $\gamma=2,45 \text{ т/м}^3$, модуль пружності $E=35 \cdot 10^6 \text{ кПа}$, коефіцієнт Пуассону $\nu=0,2$; матеріал елемента підсилення – паля, що створена за допомогою бурін'єкційної технології, питома вага $\gamma=2,4 \text{ т/м}^3$, модуль пружності $E=2 \cdot 10^6 \text{ кПа}$ (при обсязі цементу 480 кг/м^3 за даними роботи Малинина, Жемчугова, & Гладкова (2011)), коефіцієнт Пуассону $\nu=0,2$.

Скінченно-елементна модель є плоскою. До неї прикладені граничні умови: знизу – заборона переміщення по всім трьом осям X, Y та Z, по боках – заборона по осях X та Y, по поперечних сторонах моделі – заборона по осі Y (умова плоскої деформації). Верх моделі вільний від граничних умов.

У ролі навантаження моделі було прийнято розподілене по ширині стіни 380 мм , значення узяті із аналітичного розрахунку фундаменту (ширина фундаменту $b=1,6 \text{ м}$, товщина фундаменту $h=0,4 \text{ м}$) – $316,83 \text{ кН/м}$.

Розв'язуючи задачу взаємодії в системі «фундамент–основа», необхідно враховувати правило знаків для переміщень і напружень, яке прийнято таким чином, що лінійні переміщення додатні, якщо вони спрямовані в сторону зростання відповідної координати.

Результати

Чисельний аналіз розроблених чотирьох моделей (непідсилений випадок та три варіанти підсилення) проводився із застосуванням професійного ліцензійного комплексу SCAD. Після проведених розрахунків були отримані результати напружено-деформованого стану чотирьох варіантів (компоненти переміщень, нормальних та дотичних напружень). Задля економії місця статті нижче наведені лише найхарактерніші з них (рис. 2-3), а залежності представлені для усіх, що були проаналізовані, без наведення проміжних результатів чисельного аналізу.

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

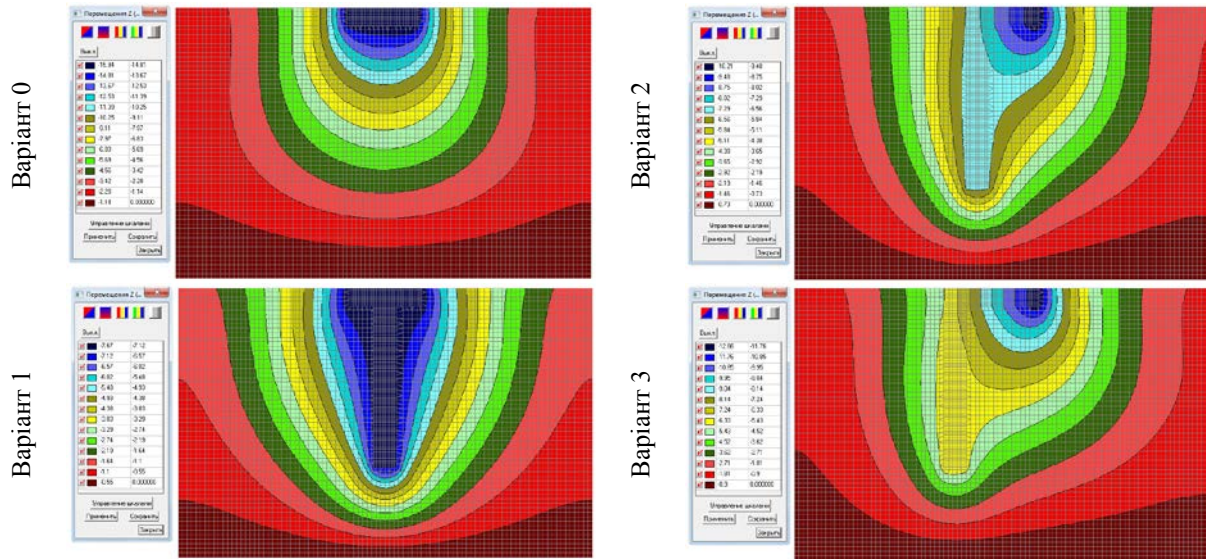


Рис. 2. Ізолії та ізополя переміщень по осі Z (вертикальна) в фрагменті моделей

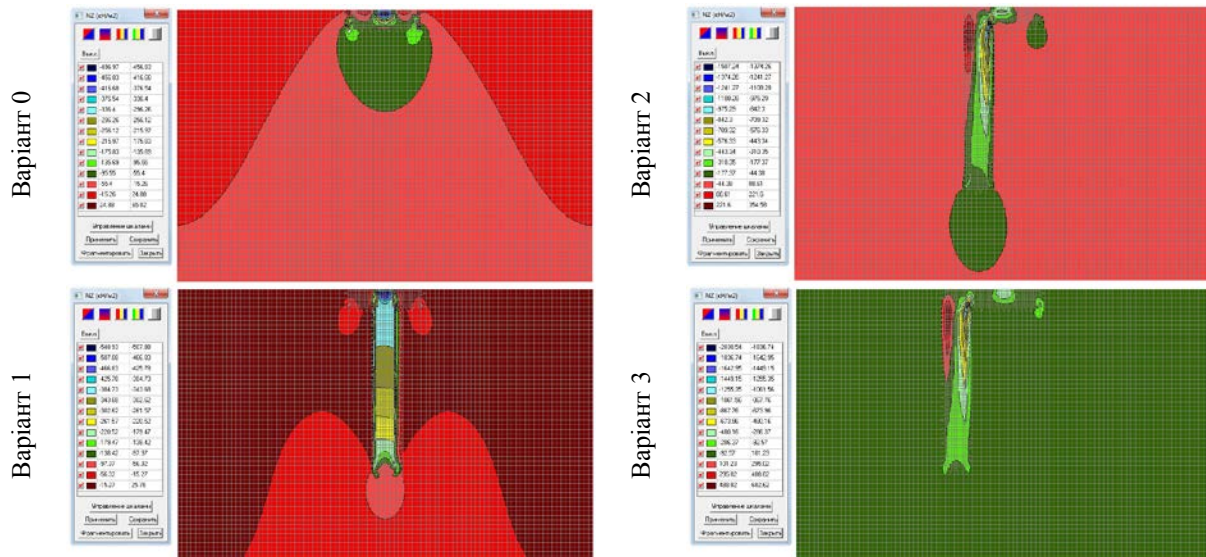


Рис. 3. Ізолії та ізополя нормальних напружень по осі Z (вертикальна) в фрагменті моделей

Аналіз НДС проводився для фундаменту, причому в його конструкції визначено характерні точки, в яких вимірювалися переміщення та напруження, отримані в ході чисельного аналізу варіантів (рис. 4).

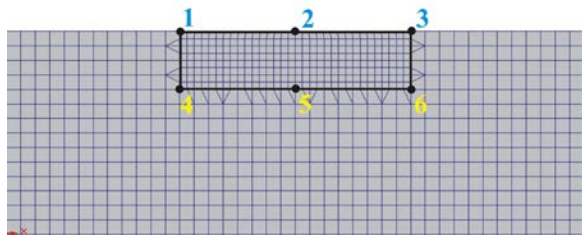


Рис. 4. Характерні точки конструкції фундаменту

Оскільки скінченно-елементні моделі відтворювали варіанти відновлення фундаменту та основи, два з яких (Варіант 2 і Варіант 3) мають несиметричне розташування паль, що створені на основі буроін'єкційної технології, то переміщення та напруження вимірюються на двох крайніх точках фундаменту. Переміщення (див. рис. 2) вимірюються в точках 1-3, а напруження (див. рис. 3) – в точках 4-6, тобто на контактні частини системи «фундамент–основа». Слід також відмітити, що для Варіанта 2 точки 1 та 4 співпадають із тілом палі, що пробурена у фундаменті та ін'єктована в ньому.

На рис. 5 наведено діаграму зміни горизонтальних переміщень. Варіантом підсилення вертикальними елементами, створеними на основі буроін'єкційної технології, що максимально знижує рівень горизонтальних переміщень, є Варіант 1. В Варіанті 2 та 3, які представляють

собойо несиметричне розміщення елемента підсилення, що практикується доволі часто (буріння лише зі сторони підвалу або зовні фундаменту), горизонтальні переміщення значно зросли. Це пояснюється локальним підвищенням жорсткості системи «фундамент–основа».

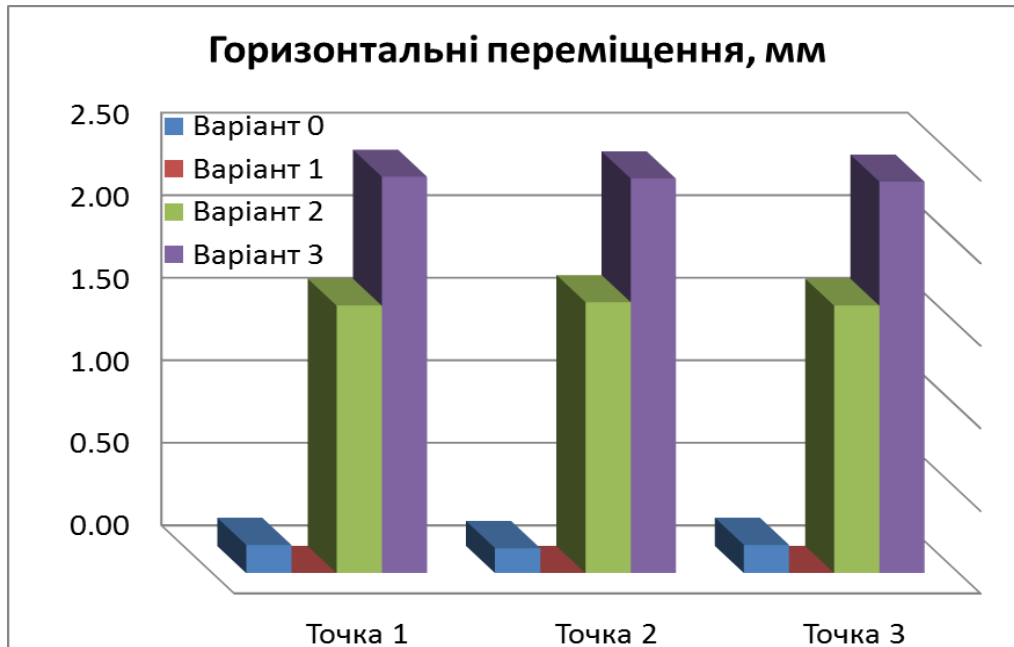


Рис. 5. Діаграма залежності горизонтальних переміщень (мм) в точках моделі системи «фундамент–основа»

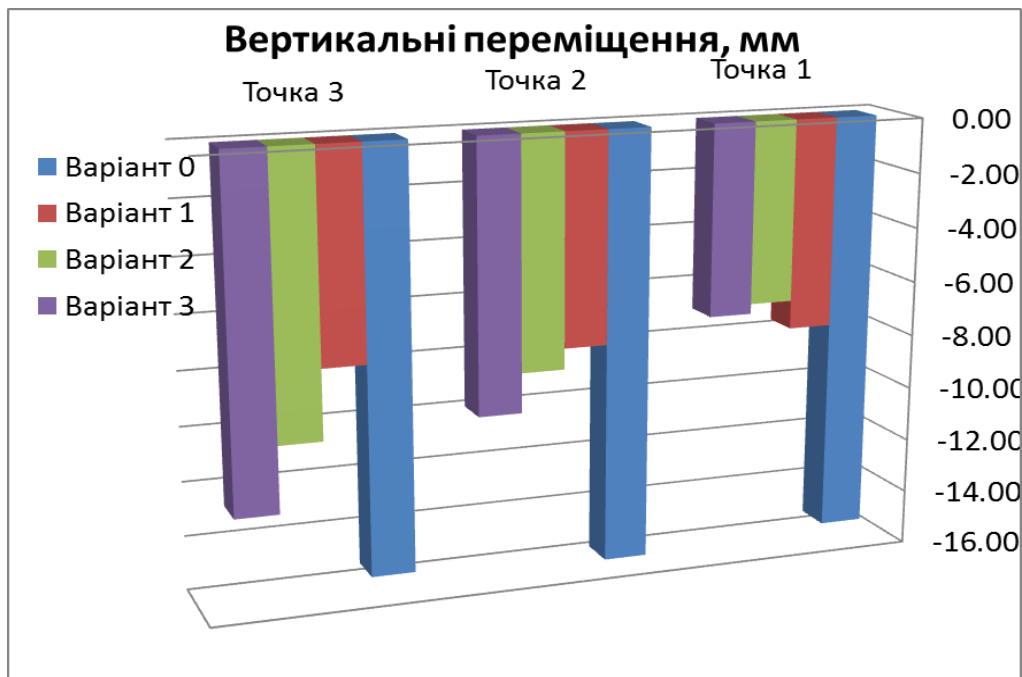


Рис. 6. Діаграма залежності вертикальних переміщень (мм) в точках системи «фундамент–основа»

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

На рис. 6 наведено діаграму зміни вертикальних переміщень, яка є більш чіткою, оскільки введення вертикальних елементів підсилення, створених на основі буроін'єкційної технології, направлений на максимальний вплив на саме цю компоненту переміщень.

Аналіз діаграми надає змоги зробити висновок, що усі три варіанти зменшують рівень переміщень в 1,21...2,32 рази. Перед тим, як порівнювати вертикальні переміщення Варіанту 0 (непідсилена основа) із трьома варіантами підсилення, слід порівняти результати аналітичного розрахунку та чисельного аналізу. Осідання основи фундаменту складало 1,62 см, в скінченно-елементній моделі воно дорівнює 1,57 см, тобто похибка між аналітичним розрахунком та чисельним аналізом складає 3%, що свідчить про адекватність побудованої моделі.

Аналіз вертикальних переміщень доводить, що вони в точці 2 (центральна точка фундаменту) зменшуються у 2,05 рази (Варіант 1), 1,87 рази (Варіант 2) та 1,59 рази (Варіант 3). Варіант 1 зменшує рівень вертикальних переміщень більш рівномірно 2,01...2,05 рази, Варіанти 2 і

3 хоча і мають максимальне зниження в точці 1, але в загальному деформуванні відіграють не дуже значну роль. Це пояснюється тим, що занурення вертикальних елементів, що призводить деформований стан до неоднорідного, найбільш впливає в зоні максимального розвитку деформацій.

Остаточний висновок про ефективність впливу вертикальних елементів підсилення, створених на основі буроін'єкційної технології, можна зробити після аналізу напруженого стану, результати якого наведені на діаграмах (рис. 7 і 8). Першим можна відмітити значну неоднорідність напруженого стану (горизонтальна компонента) Варіантів 2 і 3, в яких, по причині стрибкоподібної зміни жорсткості біля однієї межі фундаменту (точка 4), спостерігається зміна знаку напружень. Побудувати залежність розподілу горизонтальних напружень в точках 4 і 6, тобто на обрізі фундаменту, практично неможливо. Але характер зміни горизонтальних напружень в точці 5 (вісь симетрії) є характерним.

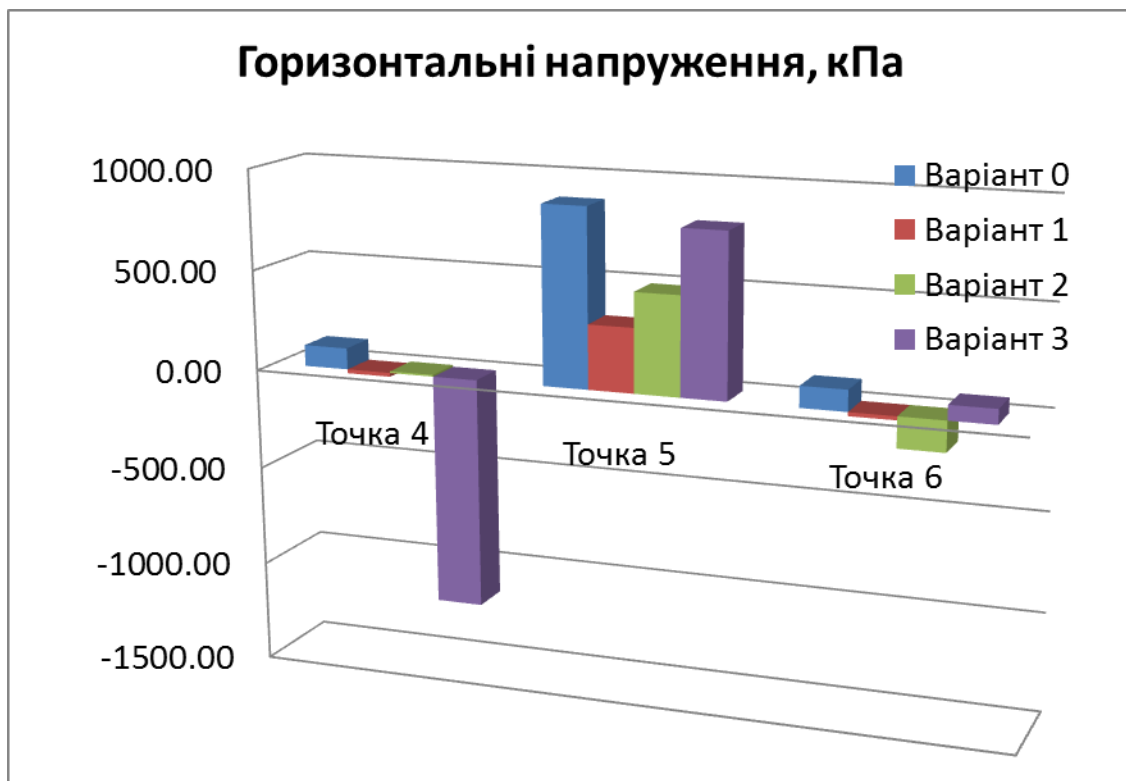


Рис. 7. Діаграма залежності горизонтальних напружень (кПа) в точках системи «фундамент–основа»

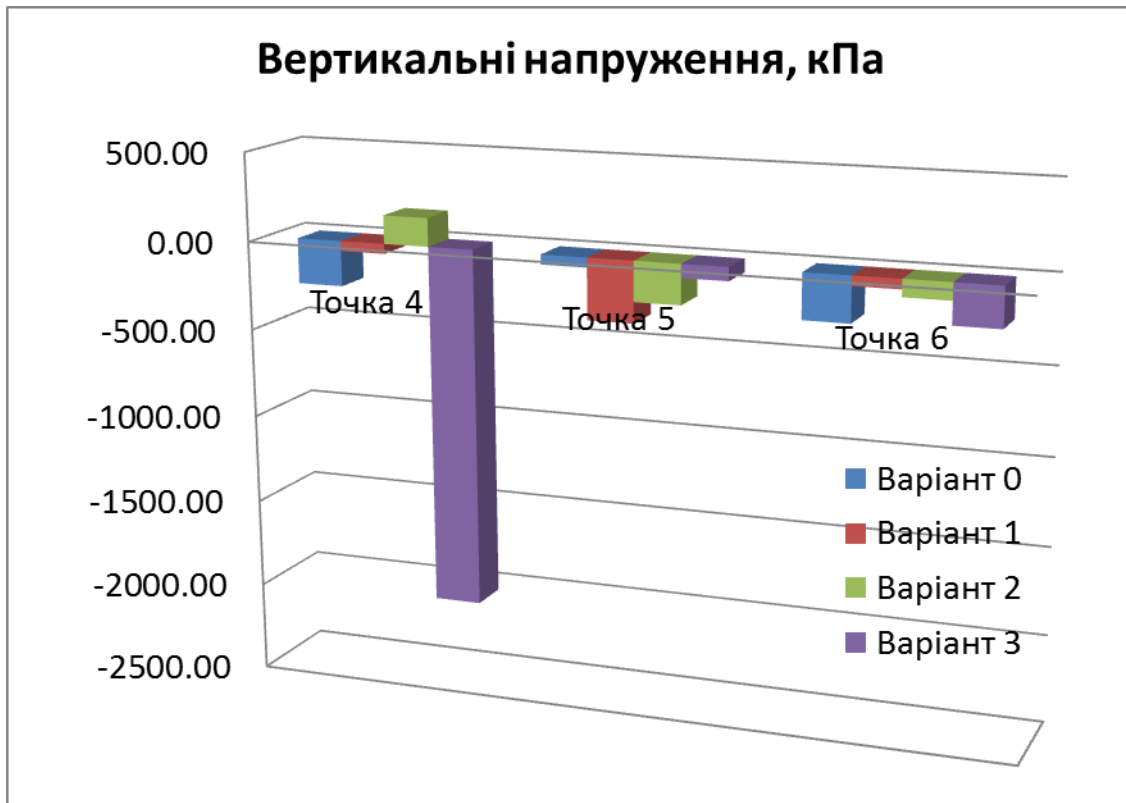


Рис. 8. Діаграма залежності вертикальних напружень (кПа) в точках системи «фундамент–основа»

Порівняння трьох варіантів відновлення фундаменту та основи за допомогою елементів, створених на основі буроін'єкційної технології, показує стійке падіння горизонтальних напружень у 2,77 рази (Варіант 1), 1,80 рази (Варіант 2) та 1,09 рази (Варіант 3). Однак, аналізуючи вертикальні напруження, слід відмітити, що відбувається стійке зростання вертикальних напружень у точці 5 у 6,20 рази (Варіант 1), 4,06 рази (Варіант 2) та 1,38 рази (Варіант 3). Це пояснюється тим, що елемент підсилення, створений на основі буроін'єкційної технології, зменшуючи вертикальні переміщення, призводить до концентрації вертикальних напружень. Але максимальне значення вертикальних напружень не свідчать про їх високий рівень, що міг би призвести до руйнування бетону фундаменту: -343,68 кПа у Варіанті 1, -225,20 кПа у Варіанті 2 та -76,33 кПа у Варіанті 3.

Наукова новизна та практична значимість

Таким чином, в даній статті на основі чисельного аналізу НДС системи «фундамент–основа» отримано залежності відновлення

конструкцій фундаментів та основ на базі буроін'єкційних свердловин.

Практичне значення має обґрунтування зміни НДС при варіації розташування елементів відновлення, створених на основі буроін'єкційної технології. В подальшому заплановано провести чисельний аналіз на основі методу скінчених елементів в просторовій постановці.

Висновки

Основним висновком після аналізу залежностей НДС варіантів є те, що варіантом відновлення частин системи «фундамент–основа», який активно впливає на деформований стан, зменшуючи вертикальні переміщення, є Варіант 1, тобто конструкція вертикальних елементів, створених на основі буроін'єкційної технології, розташованих під фундаментом. Це свідчить про те, що найкращим сценарієм відновлення слабкої основи є той, що запроваджується під час будівництва, оскільки Варіант 1 можливо втілити лише при спорудженні фундаменту.

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- Covil, C. S., & Skinner, A. E. (1994). Jet grouting: A review of some of the operating parameters that form the basis of the jet grouting process. *Grouting in the Ground*, 605-627.
- Dubinchyk, O., Bannikov, D., Kildieiev, V., & Kharchenko, V. (2020). Geotechnical analysis of optimal parameters for foundations interacting with loess area. *II International Conference Essays of Mining Science and Practice*, 168, 00024.
- Dubinchyk, O., Petrenko, V., Ihnatenko, D., & Kildieiev, V. (2019). Comprehensive analysis of the retaining pile structure with the determining the stability factor by numerical methods. *I International Conference Essays of Mining Science and Practice*, 109, 00020.
- Krysan, V. I., Krysan, V. V., Petrenko, V., Tiutkin, O., & Andreev, V. (2019). Improving the safety of soil foundations when they are restored using soil-cement elements. *2nd International Scientific and Practical Conference "Energy-Optimal Technologies, Logistic and Safety on Transport"*.
- Kutzner, C. (1996). *Grouting of rock and soil*. A. A. Balkema.
- Бройд, И. И. (2004). *Струйная геотехнология*. Москва: Издательство Ассоциации строительных вузов.
- Камбефор, А. (1971). *Инъекция грунтов. Принципы и методы*. Москва: Энергия.
- Малинин, А. Г. (2009). *Струйная цементация грунтов*. Москва: Стройиздат.
- Малинин, А. Г., Жемчугов, А. А., & Гладков, И. Л. (2011). Определение физико-механических свойств грунтоцемента в ходе натурных исследований. *Известия ТулГУ. Науки о Земле*, 1, 325-330.
- Парамонов, В. Н., Кудрявцев, С. А., & Богов, С. Г. (2006). Закрепление грунтов оснований фундаментов зданий по струйной технологии при увеличении нагрузок. *Развитие городов и геотехническое строительство*, 10, 192-199.
- Петренко, В. Д., Тютюкін, О. Л., Крисан, В. І., & Крисан, В. В. (2019). Відновлення міцносних та деформативних характеристик земляного полотна та його основи армуванням грунтоцементними елементами. *Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика*, 16, 65-74.
- Ржаницын, Б. А. (1986). *Химическое закрепление грунтов в строительстве*. Москва : Стройиздат.
- Соколович, В. Е. (1980). *Химическое закрепление грунтов*. Москва : Стройиздат.

В. Д. ПЕТРЕНКО^{1*}, В. В. ХАРЧЕНКО^{2*}, Р. Н. ТЕРЕЩУК³, О. Н. ПЕТРОВ⁴

^{1*} Кафедра «Мости и тоннели», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепр, Украина, 49010, тел. +38 (050) 708 50 69, эл. почта petrenko.diit@gmail.com, ORCID 0000-0003-2201-3593

^{2*} Кафедра «Мости и тоннели», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепр, Украина, 49010, тел. +38 (056) 373 15 53, эл. почта harchenko-76@ukr.net, ORCID 0000-0002-7653-3001

³ Кафедра строительства, геотехники и геомеханики, Национальный технический университет «Днепропетровская политехника», просп. Д. Яворницкого, г. Днепр, Украина, 49005, тел. +38 (095) 751 25 26, эл. почта Tereschuk.rm@gmail.com, ORCID 0000-0003-4509-2511

⁴ Кафедра «Мости и тоннели», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепр, Украина, 49010, тел. +38 (056) 373 15 53, эл. почта olegonator12@gmail.com

ЗАВИСИМОСТИ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ФУНДАМЕНТОВ И ОСНОВАНИЙ ПРИ ИХ ВОССТАНОВЛЕНИИ НА ОСНОВЕ БУРОИНЪЕКЦИОННЫХ СКВАЖИН

Цель. Получить зависимости напряженно-деформированного состояния (НДС) фундаментов и оснований при их восстановлении на основе буроинъекционных скважин для дальнейшего анализа влияния расположения элементов усиления. **Методика.** Для определения параметров НДС и для получения его зависимостей в фундаментах и основаниях при их восстановлении на основе буроинъекционных скважин выбран случай без усиления (вариант 0) и три варианта его усиления (Вариант 1, Вариант 2 и Вариант 3). Усиление выполнено грунтоцементными сваями длиной 4 м диаметром 0,5 м, созданными на основе буроинъекционной технологии. Для четырех вариантов разработаны соответствующие конечно-элементные модели. Их

© В. Д. Петренко, В. В. Харченко, Р. М. Терещук, О. М. Петров, 2020

численный анализ проводился с применением профессионального лицензионного комплекса SCAD. **Результаты.** Получены изолинии и изополя перемещений в моделях. Погрешность между аналитическим расчетом и численным анализом составляет 3 %, что свидетельствует об адекватности разработанной модели. Построенные зависимости НДС фундаментов и оснований при их восстановлении на основе буринъекционных скважин свидетельствуют, что вариантом, который максимально снижает уровень перемещений, является Вариант 1. Анализ вертикальных перемещений доказывает, что они в центральной точке фундамента уменьшаются в 2,05 раза (вариант 1), 1,87 раза (вариант 2) и 1,59 раза (вариант 3). Аналитические закономерности напряженного состояния показывают устойчивое падение горизонтальных напряжений в 2,77 раза (вариант 1), 1,80 раза (вариант 2) и 1,09 раза (вариант 3) и устойчивый рост вертикальных напряжений в 6,20 раза (вариант 1), 4,06 раза (вариант 2) и 1,38 раза (вариант 3). **Научная новизна.** Она заключается в получении зависимостей восстановления конструкций фундаментов и оснований на базе буринъекционных скважин на основе численного анализа НДС системы «фундамент–основание». **Практическая значимость.** Заключается в обосновании изменения НДС при вариации расположения элементов восстановления, созданных на основе буринъекционной технологии.

Ключевые слова: фундамент; основание; буринъекционные скважины; метод конечных элементов; напряженно-деформированное состояние

V. D. PETRENKO^{1*}, V. V. KHARCHENKO², R. M. TERESHCHUK³, O. M. PETROV⁴

^{1*} Department «Bridges and tunnels» of Dnipro National University of Railway Transport named after academician V. Lazaryan, Lazaryana Str., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (050) 708 50 69, e-mail petrenko.diit@gmail.com, ORCID 0000-0003-2201-3593

² Department «Bridges and tunnels» of Dnipro National University of Railway Transport named after academician V. Lazaryan, Lazaryana Str., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 53, e-mail harchenko-76@ukr.net, ORCID 0000-0002-7653-3001

³ Department construction, geotechnics and geomechanics, Dnipro University of Technology, av. Dmytra Yavornytskoho, 19, Dnipro, Ukraine, 49005, tel. +38 (095) 751 25 26, e-mail Tereschuk.rm@gmail.com, ORCID 0000-0003-4509-2511

⁴ Department «Bridges and tunnels» of Dnipro National University of Railway Transport named after academician V. Lazaryan, Lazaryana Str., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 53, e-mail olegonator12@gmail.com

DEPENDENCE OF STRAIN-DEFORMED STATE OF FOUNDATIONS AND BASES DURING THEIR RESTORATION ON THE BASIS OF GROUT-INJECTED PILE TECHNOLOGY

Purpose. To obtain the dependences of the stress-strain state (SSS) of foundations and bases during their restoration on the basis of grout-injected piles for further analysis of the influence of the location of reinforcement elements. **Methodology.** To determine the SSS parameters and to obtain its dependencies in the foundations and bases during their restoration based on grout-injected piles, a case without reinforcement (option 0) and three options for its reinforcement (Option 1, Option 2 and Option 3) were selected. Reinforcement was carried out with 4 m long soil-cement piles with a diameter of 0.5 m, created on the basis of grout-injected pile technology. Corresponding finite element models have been developed for four options. Their numerical analysis was carried out using a professional licensed SCAD complex. **Findings.** Contours and isofields of displacements in the models are obtained. The error between analytical calculation and numerical analysis is 3%, which indicates the adequacy of the developed model. The constructed dependences of the stress-strain state of foundations and bases during their restoration based on grout-injected piles indicate that the option that minimizes the level of displacements is Option 1. Analysis of vertical displacements proves that they decrease 2.05 times at the center point of the foundation (option 1), 1.87 times (option 2) and 1.59 times (option 3). Analytical patterns of the stress state show a steady drop in horizontal stresses by 2.77 times (option 1), 1.80 times (option 2) and 1.09 times (option 3) and a steady increase in vertical stresses by 6.20 times (option 1), 4.06 times (option 2) and 1.38 times (option 3). **Originality.** It lays in obtaining the dependencies of restoring the structures of foundations and bases based on grout-injected piles based on the numerical analysis of the stress-strain state of the “foundation-base” system. **Practical value.** It consists of the substantiation of the change in the stress-strain state with a variation in the location of the restoration elements created on the basis of grout-injected piles technology.

Keywords: foundation; base; grout-injected pile; finite element method; stress-strain state

© В. Д. Петренко, В. В. Харченко, Р. М. Терешук, О. М. Петров, 2020

REFERENCES

- Covil, C. S., & Skinner, A. E. (1994). Jet grouting: A review of some of the operating parameters that form the basis of the jet grouting process. *Grouting in the Ground*, 605-627. (in English)
- Dubinchyk, O., Bannikov, D., Kildieiev, V., & Kharchenko, V. (2020). Geotechnical analysis of optimal parameters for foundations interacting with loess area. *II International Conference Essays of Mining Science and Practice*, 168, 00024. (in English)
- Dubinchyk, O., Petrenko, V., Ihnatenko, D., & Kildieiev, V. (2019). Comprehensive analysis of the retaining pile structure with the determining the stability factor by numerical methods. *I International Conference Essays of Mining Science and Practice*, 109, 00020. (in English)
- Krysan, V. I., Krysan, V. V., Petrenko, V., Tiutkin, O., & Andreev, V. (2019). Improving the safety of soil foundations when they are restored using soil-cement elements. *2nd International Scientific and Practical Conference "Energy-Optimal Technologies, Logistic and Safety on Transport"*. (in English)
- Kutzner, C. (1996). *Grouting of rock and soil*. A. A. Balkema. (in English)
- Broyd, I. I. (2004). *Struynaya geotekhnologiya*. Moskva: Izdatelstvo Assotsiatsii stroitelnykh vuzov. (in Russian)
- Kambefor, A. (1971). *Inektsiya gruntov. Printsipy i metody*. Moskva: Energiya. (in Russian)
- Malinin, A. G. (2009). *Struynaya tsementatsiya gruntov*. Moskva: Stroyizdat. (in Russian)
- Malinin, A. G., Zhemchugov, A. A., & Gladkov, I. L. (2011). Opredelenie fiziko-mekhanicheskikh svoystv gruntotsementa v khode naturnykh issledovaniy. *Izvestiya TulGU. Nauki o Zemle*, 1, 325-330. (in Russian)
- Paramonov, V. N., Kudryavtsev, S. A., & Bogov, S. G. (2006). Zakreplenie gruntov osnovaniy fundamentov zdaniy po struynoy tekhnologii pri uvelichenii nagruzok. *Razvitie gorodov i geotekhnicheskoe stroitelstvo*, 10, 192-199. (in Russian)
- Petrenko, V. D., Tiutkin, O. L., Krysan, V. I., & Krysan, V. V. (2019). Vidnovlennia mitsnosnykh ta deformatyvnykh kharakterystyk zemlianoho polotna ta yoho osnovy armuvanniam gruntotsementnyimi elementami. *Mosti ta tuneli: teoriia, doslidzhennia, praktyka*, 16, 65-74. (in Ukrainian)
- Rzhanitsyn, B. A. (1986). *Khimicheskoe zakreplenie gruntov v stroitelstve*. Moskva: Stroyizdat. (in Russian)
- Sokolovich, V. Ye. (1980). *Khimicheskoe zakreplenie gruntov*. Moskva: Stroyizdat. (in Russian)

Надійшла до редколегії 11.09.2020

Прийнята до друку 26.10.2020