

# ДОСЛІДЖЕННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ СТОВПЧАСТИХ ФУНДАМЕНТІВ І ОСНОВИ, ЩО АРМОВАНА ГРУНТОЦЕМЕНТНИМИ ПАЛЯМИ

Вінницький національний технічний університет

В даній роботі представлено результати комплексного дослідження напружено-деформованого стану системи «стовпчастий фундамент–армована основа» з використанням вертикальних ґрунтоцементних елементів. Актуальність роботи обумовлена зростанням щільності забудови та дефіцитом територій зі сприятливими інженерно-геологічними умовами, що спричиненою активною розбудовою міст, що в свою чергу змушує вести забудову у складних умовах чи на слабких ґрунтах, де традиційні методи підсилення основ є технічно складними чи економічно недоцільними. Використання ґрунтоцементних елементів для підсилення основ дозволяє суттєво знизити вартість будівництва та зменшити витрати на транспортування.

Метою чисельних досліджень, проведених в програмному комплексі SOFiSTiK 2024, став аналіз параметрів основи армованої вертикальними ґрунтоцементними елементами при варіюванні вмісту в'язучого в ґрунтоцементній суміші в межах від 10% до 40%. Для обґрунтування коректності використання програмного комплексу SOFiSTiK 2024 було виконане моделювання напружено-деформованого стану системи «штамп-армована основа» для натурного штампового випробування армованої основи, проведеного Р. В. Петрашем.

В результаті проведення серії модельних експериментів для трьох груп основ (неоднорідної, однорідного суглинку та однорідної глини) встановлено закономірності зміни приведенного модуля деформації в залежності від варіювання вмісту в'язучого. Встановлено, що використання ґрунтоцементної суміші з вмістом в'язучого 20% є оптимальним, адже для однорідної основи армованої вертикальними ґрунтоцементними елементами модуль деформації зріс на 54%, а подальше збільшення вмісту в'язучого (до 40%) призводить до незначного приросту модуля деформації (на 13% відносно 20%-го складу ґрунтоцементної суміші), що є економічно неефективним рішенням. Найбільш виражений ефект армування основи зафіксовано для слабкої основи ( 7,7 МПа), де при 20% вмісті в'язучого модуль деформації збільшився більше ніж у 2 рази, а розрахунковий опір збільшився в 1,3 – 1,5 разів.

**Ключові слова:** ґрунтоцемент, міцність, розрахунковий опір, модуль деформації, армована основа, напружено-деформований стан, стовпчастий фундамент.

Стаття надійшла до редакції / Received 19.03.2026  
Прийнята до друку / Accepted 20.04.2026  
Опубліковано / Published 29.05.2026



This is an Open Access article distributed under the terms of the [Creative Commons CC-BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

© Шевчук О.М.

## Вступ

Сучасне будівництво характеризується все частішим дефіцитом територій під забудову з сприятливими інженерно-геологічними умовами, що в свою чергу змушує вести забудову на будівельних майданчиках зі слабкими, стисливими ґрунтами. У таких умовах традиційні методи влаштування фундаментів часто виявляються економічно не вигідними чи технічно складними.

Використання ґрунтоцементу як матеріалу для підсилення основ є одним з найбільш ефективних напрямків покращення характеристик ґрунтової основи. Основна перевага цієї технології полягає у використанні ґрунтів як матеріалу, що безпосередньо залягають на території будівельного майданчику, що в свою чергу зменшує витрати на транспортування конструкцій для підсилення та утилізацію та вивезення вийнятого ґрунту.

Ефект армування основи ґрунтоцементними елементами полягає в тому, що у масиві слабого ґрунту частина об'єму замінюється більш жорсткими елементами з вищим модулем деформації у порівнянні з початковими характеристиками основи, що в свою чергу призводить до перерозподілу навантажень між ґрунтом та палями, створюючи комбіновану штучну основу, тому основним методом виготовлення ґрунтоцементних елементів є змішувальний. Виділяють декілька типів методів: струменевиї (Jet Grouting), буро-змішувальний та струменево змішувальний [1-3,7-9]. Властивості ґрунтоцементу залежать від технології його виготовлення. Головним фактором при цьому є наявність обтиснення ґрунтоцементної суміші. При виготовленні паль за стандартною бурозмішувальною технологією використовується текуча суміш, яка не підлягає ущільненню. Ущільнення суміші в тілі паль може здійснюватись за допомогою вібрації. Міцність ґрунтоцементу,

виготовленого за бурозмішувальною технологією знаходиться у діапазоні 1,0-6,0 МПа в залежності від виду ґрунту, вмісту цементу, водоцементного відношення [4,5].

Одним із перспективних напрямків дослідження напружено деформованого стану системи «фундамент – армована основа» є метод математичного моделювання на основі методу скінченних елементів. Методом скінченних елементів найбільше підходить для розв’язання подібних задач з великою варіативністю та неоднорідністю характеристик використовуваних матеріалів, а також можливість використання нелінійних моделей розрахунків максимально наближають отримані результати до реальної роботи конструкцій. Для чисельного моделювання напружено-деформованого стану системи «стовпчастий фундамент – армована основа» було обрано програмний комплекс SOFiSTiK 2024.

Метою чисельних досліджень є аналіз параметрів основи, армованої ґрунтоцементними палями з використанням різного відсотку в’язучого.

### Математичні дослідження оптимального складу ґрунтоцементних паль

Для обґрунтування коректності використання програмного комплексу SOFiSTiK 2024 було виконане моделювання напружено-деформованого стану системи «штамп-армована основа» для натурального штампового випробування армованої основи, проведеного Р. В. Петрашем. Розрахункова схема наведена на рис. 1 [6], характеристики ґрунтів та матеріалів наведені у таблиці 1.

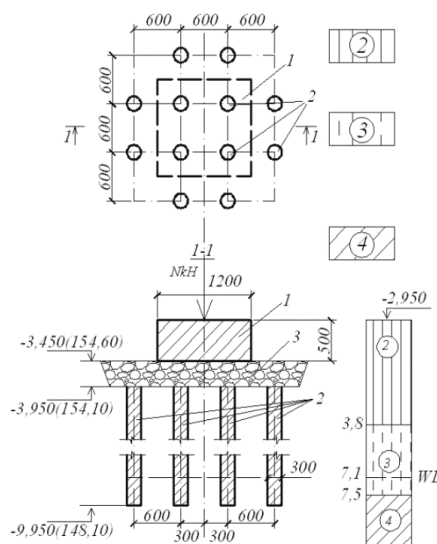


Рисунок 1 – Схема випробувань основи, з армуванням вертикальними ґрунтоцементними палями та квадратним залізобетонним штампом

Таблиця 1

#### Фізико-механічні характеристики ґрунтів

Назви шарів	Питома вага, $\gamma, \text{кН} / \text{м}^3$	Модуль деформації, $E, \text{МПа}$	Коефіцієнт Пуассона, $\nu$	Питоме зчеплення, $c, \text{кН} / \text{м}^2$	Кут внутрішнього тертя, $\varphi^0$
ІґЕ – 2	16,1	12	0,35	14	23
ІґЕ – 3	16,4	8	0,35	9	24
ІґЕ – 4	19,1	14	0,35	24	25
ГЦЕ	18	100	0,25	-	-
Штамп	24	$2,3 \times 10^6$	0,2	-	-
Щебенева підготовка	18	60	0,3	-	-

В розрахунках були прийняті наступні передумови та параметри:

- модель ґрунту основи – пружно-пластична модель Кулона-Мора;
- матеріал армуючих елементів – ґрунтоцемент, прийнятий як лінійно деформоване тіло;
- діаметр армуючих елементів – 200мм;

- розміри розрахункової області – 10x10x10м;
- навантаження 1200 кН / м<sup>2</sup>;
- товщина щебеневої підготовки 250мм.

Для аналізу параметрів основи, армованої ґрунтоцементними палями було виконано моделювання роботи штампу розміром 1200x1200мм на основі армованій ґрунтоцементними палями довжиною 5700мм та діаметром 200 мм, розрахункова схема наведена на рис. 2.

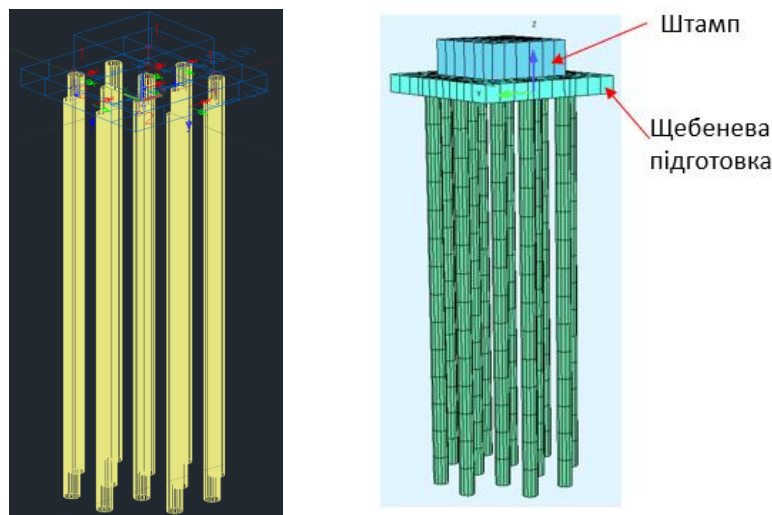


Рисунок 2 – Вигляд схеми в SofiPlus та в SOFiStiK 2024

В результаті проведення розрахунків було отримано графік залежності навантаження-осідання для залізобетонного штампу на основі армованій ґрунтоцементними палями. Графік наведений на рис. 3.

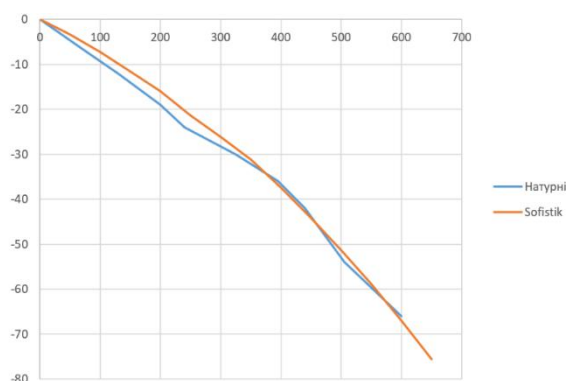


Рисунок 3 – Графік залежності навантаження-осідання для залізобетонного квадратного штампу на основі армованій вертикальними ґрунтоцементними палями

Як видно з рис. 3, розбіжність між значеннями осідань при однакових навантаженнях при статистичному випробуванні і за результатами чисельного моделювання не перевищує 10%, тому дана модель може бути використана для подальшого дослідження роботи фундаменту на армованій основі.

Метою чисельних досліджень є аналіз параметрів армованої основи з різним складом ґрунтоцементної суміші, параметри що підлягають аналізу, є приведений модуль деформації та перша критична сила (за Пузиревським М. П.), що дозволяє визначити допустиме навантаження на армовану основу.

Для моделювання ґрунтоцементних паль необхідно задати такі їх характеристики: питома вага, модуль деформації та коефіцієнт Пуассона. Коефіцієнт Пуассона за різними джерелами [1-3, 6] для ґрунтоцементу знаходиться в межах 0,2-0,25.

Властивості ґрунтоцементу залежать від технології його виготовлення. Головним фактором при цьому є наявність обтиснення ґрунтоцементної суміші [1-4]. При виготовленні паль за стандартною бурозмішувальною технологією використовується текуча суміш, яка не підлягає ущільненню. Модуль деформації ґрунтоцементу в залежності від вмісту в'язучого наведений на рис. 4 [2] та на рис. 5 (дані досліджень автора), значення модуля деформації корелюються.

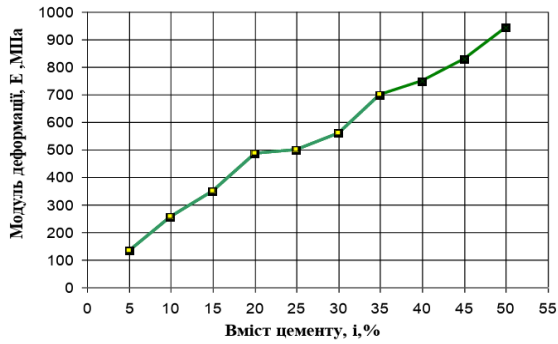


Рисунок 4 – Залежність модуля деформації ґрунтоцементу від вмісту цементу [2]

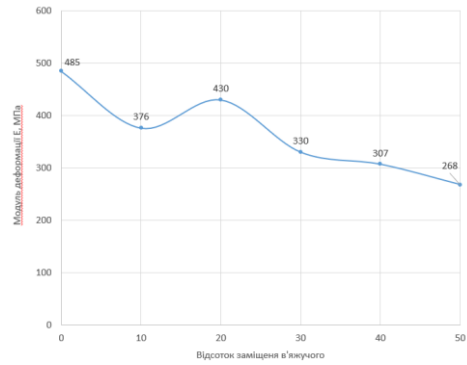


Рисунок 5 – Залежність модуля деформації ґрунтоцементу від вмісту золи замість в'язучого

Для аналізу параметрів основи, армованої ґрунтоцементними палями з різним вмістом в'язучого виконано моделювання роботи штампу з розмірами 1200x1200мм на основі армованій ґрунтоцементними палями довжиною 5700 мм, розрахункову схему прийнято відповідно до рис. 1.

При відстані між елементами 600мм (3d) штамп завантажує площу армовану 12 елементами діаметром 200мм з кроком 600мм. Згідно з [5,6] крок 3d є оптимальним з точки зору досягнення якості армованого масиву. При дослідженні передбачене варіювання модуля деформації ґрунтоцементу в залежності від вмісту цементу в межах від 10 до 40% (рис. 4).

Другим параметром, що досліджується, є модуль деформації основи армованої ґрунтоцементними елементами. Програма визначення приведеного модуля деформації та допустимого навантаження на основу передбачала етапи створення розрахункової моделі стовпчастого фундаменту та паль, дослідження залежності навантаження-осідання стовпчастого фундаменту від модуля деформації армуючих елементів та ґрунту.

Передумови при моделюванні були прийняті такі ж як і для обґрунтування коректності використання програмного комплексу SOFiStiK 2024.

Моделні експерименти розділено на три групи :

I – моделювання сумісної роботи фундаменту та ґрунтоцементних паль Ø0,2м та кроком 3d довжиною 5.7м на неоднорідному ґрунті з характеристиками згідно з таблицею 2, матеріал фундаменту – бетон класом міцності C16/20, щебенева підготовка  $\gamma = 18,0 \text{ кН/м}^3$ ,  $\nu=0,3$  кПа,  $E = 60 \text{ МПа}$  висотою 25 см

II – моделювання сумісної роботи фундаменту та ґрунтоцементних паль Ø0,2м та кроком 3d довжиною 5.7м на однорідному ґрунті з характеристиками: суглинок  $\gamma=17,3 \text{ кН/м}^3$ ,  $c= 15\text{кПа}$ ,  $\phi = 19^\circ$ ,  $E = 7,7\text{МПа}$ , матеріал фундаменту – бетон класом міцності C16/20, щебенева підготовка  $\gamma = 18,0 \text{ кН/м}^3$ ,  $\nu=0,3$  кПа,  $E = 60 \text{ МПа}$  висотою 25 см.

III – моделювання сумісної роботи фундаменту та ґрунтоцементних паль Ø0,2м та кроком 3d довжиною 5.7м на однорідному ґрунті з характеристиками: глина блакитно сіра  $\gamma=17,0 \text{ кН/м}^3$ ,  $c= 43,4\text{кПа}$ ,  $\phi = 16,8^\circ$ ,  $E = 16,2 \text{ МПа}$ , матеріал фундаменту – бетон класом міцності C16/20, щебенева підготовка  $\gamma = 18,0 \text{ кН/м}^3$ ,  $\nu=0,3$  кПа,  $E = 60 \text{ МПа}$  висотою 25 см. Фізико-механічні характеристики ґрунтів наведені в таблиці 2.

Таблиця 2

**Фізико-механічні характеристики ґрунтів**

Найменування ґрунту	$\gamma$ , кН/м <sup>3</sup>	$\gamma_s$ , кН/м <sup>3</sup>	W	W <sub>l</sub>	W <sub>p</sub>	I <sub>p</sub>	I <sub>l</sub>	e	S <sub>r</sub>	C, кПа	$\phi$ , град.	$\nu$	E, МПа	R <sub>0</sub> , кПа	Потужність шару, м
Рослинний шар	16,5	-	0,16	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,4-0,5
Пісок дрібний	17,9	26,5	0,17	-	-	-	-	0,73	0,62	0,4	29	0,31	20	200	2,5-2,8
Суглинок	17,3	26,8	0,13	0,17	0,09	0,08	0,5	0,75	0,46	15	19	0,37	<b>7,7</b>	203	2,0-2,4
Глина блакитно сіра	17,0	27,1	0,2	0,39	0,18	0,21	0,1	0,91	0,6	43,4	16,8	0,4	16,2	269	5,0

Модуль деформації ґрунту  $E$ , обчислювався для лінійного відрізка графіка за формулою згідно з ДСТУ Б В.2.1.-7-2000 ґрунти.

$$E = (1 - \nu^2) \cdot K_p \cdot K_1 \cdot D \frac{\Delta p}{\Delta S} \quad (1)$$

Розрахунковий опір ґрунту  $R$  визначався як перше критичне напруження  $\sigma_1$  за точкою відхилення від графіка. В результаті проведення модельного дослідження отримано графіки залежності навантаження осідання рис 6-8 а результати розрахунків наведено в таблиці 3.

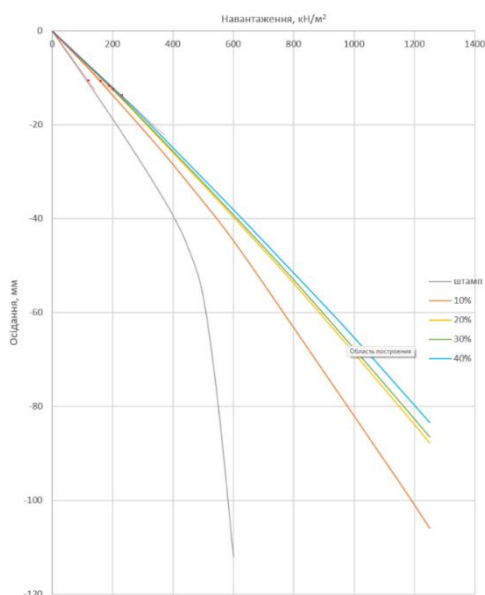


Рисунок 6 – Графіки залежності навантаження осідання для однорідної основи з модулем деформації  $E = 7,7$  МПа

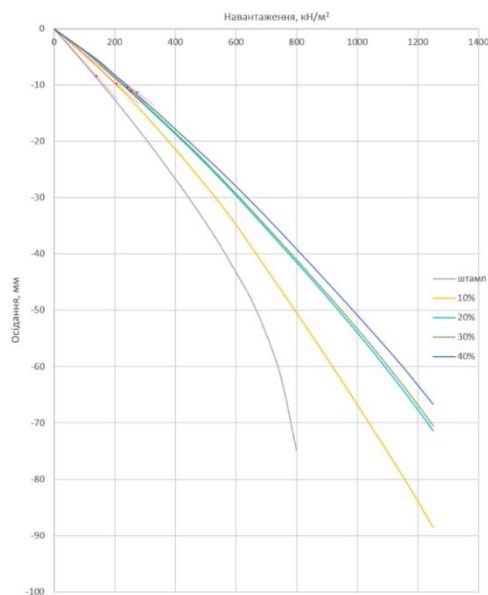


Рисунок 7 – Графіки залежності навантаження осідання для неоднорідної основи з приведеним модулем деформації  $E = 15,5$  МПа

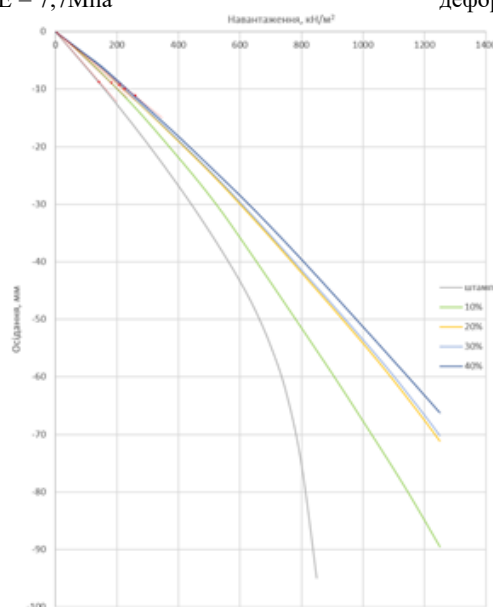


Рисунок 8 – Графіки залежності навантаження осідання для однорідної основи з модулем деформації  $E = 16,2$  МПа

Внаслідок армування основи з приведеним модулем деформації  $E = 15,5$  МПа (I група) ґрунтоцементними елементами модуль деформації при вмісті в'язучого 10%, 20%, 30%, 40% збільшився на 29%, 54%, 56% та 67% відповідно.

При однорідній основі з модулем деформації  $E = 16,2$  МПа (II група), модуль деформації при вмісті в'язучого 10%, 20%, 30%, 40% збільшився на 18%, 43%, 47% та 56% відповідно.

Для слабкої основи з модулем деформації  $E = 7,7$  МПа (III група), модуль деформації при вмісті в'язучого 10%, 20%, 30%, 40% збільшився на 81%, 210%, 215% та 220% відповідно.

Параметри армованої основи за даними дослідження

Підгрупи	Параметри основи	Модуль деформації елементів армування, МПа				
		Відсутнє	280	490	580	750
I	E, МПа	15,5	20	23,9	24,3	26
	$\sigma_1$ , кПа	160	200	230	250	270
II	E, МПа	16,2	19,2	23,2	23,9	25,1
	$\sigma_1$ , кПа	170	210	230	260	280
III	E, МПа	7,7	14	16,2	16,6	17
	$\sigma_1$ , кПа	130	160	190	200	230

### Висновки

Для оцінювання напружено-деформованого стану основи, армованої ґрунтоцементними елементами використано пружно-пластичну модель ґрунту, яка була реалізована в програмному комплексі SOFiSTiK 2024, при порівнянні отриманих залежностей навантаження-осідання за результатами чисельного моделювання та експериментальним шляхом продемонстровано високий ступінь кореляції результатів, що в свою чергу свідчить про коректність прийнятої розрахункової схеми та про правомірність вибору і застосування пружно-пластичної моделі ґрунту. Це доводить достовірність отриманих закономірностей та коректність застосованого методу для прогнозування деформативних характеристик армованих основ.

При аналізі отриманих результатів було встановлено оптимальний вміст в'язучого, який становить 20% від ваги ґрунту, адже додавання меншого відсотку в'язучого значно погіршує характеристики армованої основи а додавання більшої кількості в'язучого має несуттєвий вплив на приріст модуля деформації. Зокрема внаслідок армування неоднорідної основи з приведеним модулем деформації  $E = 15,5$  МПа та використанням ґрунтоцементної суміші з 20% вмістом в'язучого модуль деформації збільшився на 54%, а при збільшенні в'язучого в 2 рази модуль деформації збільшився на 13%, що не є ефективним рішенням з економічної точки зору.

Для слабкої основи з модулем деформації  $E = 7,7$  МПа модуль деформації армованої основи збільшився більше ніж у 2 рази при вмісті в'язучого 20%

Відповідно розрахунковий опір збільшився в 1,3 – 1,5 разів для випадків з використання ґрунтоцементної суміш з вмістом 20% в'язучого від ваги ґрунту.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Зоценко М.Л., Борт О.В., Бідношя М.В., Петраш Р.В. До оцінки механічних властивостей ґрунтоцементу залежно від умісту його складових. // Зб. наук. праць (галузеве машино буд., буд-во)/ Полт. нац. техн. ун-т ім. Ю. Кондратюка. – Полтава: ПНТУ, 2007. – Вип. 19. – С. 44-52
- [2] Зоценко М. Л., Винников Ю. Л., Зоценко В. М. Бурові ґрунтоцементні палі, які виготовляються за бурозмішувальним методом: монографія. Харків: «Друкарня Мадрид», 2016. 94 с
- [3] Новицький О. П. Вплив пластифікуючих добавок на міцність ґрунтоцементу / Збірник наукових праць (галузеве машинобудування, будівництво). – Полтава: ПолтНТУ, 2012. Вип. 4 (34) – с. 171 – 177
- [4] Нестеренко Т. М. Вплив вібрування на механічні характеристики ґрунтоцементу / Будівельні конструкції: міжвідомчий науково-технічний збірник наукових праць (будівництво). – Вип. 75. Кн. 2. – К.: ДП НДІБК, 2011. С. 656 – 660
- [5] Гріщенко Р. П., Масвська І. В. Аналіз міцності ґрунтоцементу при частковій заміні ґрунту на золу винесення. / Енергоефективність в галузях економіки України. Міжнародна н/т конф. ВНТУ, Вінниця, 2019. Режим доступу: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/egeu/egeu2019/paper/viewFile/8263/6946>.
- [6] Петраш, Р. В. Спільна робота ґрунту та елементів армування, які виготовлені за бурозмішувальною технологією: дис. на здобуття наук. ст. канд. техн. наук: 05.23.02 / ПолтНТУ, Полтава, 2009. – 216 с.
- [7] Bruce D. A., Geosystems E. Federal Highway Administration Design Manual: Deep Mixing for Embankment and Foundation Support. Washington, D.C. : Federal Highway Administration, 2013. 240 p. (Report / Federal Highway Administration ; no. FHWA-HRT-13-046).
- [8] Topolnicki M. Advances in Wet Soil Mixing Techniques. *Proceedings of the International Symposium on Ground Improvement (IS-GI Seoul 2014, Seoul, Korea, 20–22 Oct. 2014)*. Seoul, 2014. P. 113–134.
- [9] Porbaha A., Raybaut J., Nicholson P. State of the art in construction aspects of deep mixing technology. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Ground Improvement*. 2001. Vol. 5, no. 3. P. 123–140. DOI: <https://doi.org/10.1680/grim.2001.5.3.123>.

## REFERENCES

- [1] Zotsenko, M.L., Bort, O.V., Bidnoshyia, M.V., & Petrash, R.V. (2007). On the evaluation of mechanical properties of soil-cement depending on the content of its components. *Collection of Scientific Papers (Branch Mechanical Engineering, Construction)*, Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University, Issue 19, pp. 44-52
- [2] Zotsenko, M. L., Vynnykov, Yu. L., & Zotsenko, V. M. (2016). *Bored soil-cement piles manufactured by the deep soil mixing method: a monograph*. Kharkiv: "Madrid Printing House". 94 p.
- [3] Novytskyi, O. P. (2012). The influence of plasticizing additives on the strength of soil-cement. *Collection of Scientific Papers (Branch Mechanical Engineering, Construction)*. Poltava: PoltNTU, Issue 4 (34), pp. 171–177
- [4] Nesterenko, T. M. (2011). The influence of vibration on the mechanical characteristics of soil-cement. *Building Structures: Interdepartmental Scientific and Technical Collection of Scientific Papers (Construction)*, Issue 75, Book 2. Kyiv: SE NIISK, pp. 656–660
- [5] Hrishchenko, R. P., & Maievska, I. V. (2019). Strength analysis of soil-cement with partial replacement of soil with fly ash. *Energy Efficiency in the Economic Sectors of Ukraine. International Scientific and Technical Conference*. VNTU, Vinnytsia. Available at: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/egeu/egeu2019/paper/viewFile/8263/6946>
- [6] Petrash, R. V. (2009). *Joint action of soil and reinforcement elements manufactured using deep soil mixing technology* (Candidate of Technical Sciences dissertation, Specialty 05.23.02). PoltNTU, Poltava. 216 p.
- [7] Bruce D. A., Geosystems E. Federal Highway Administration Design Manual: Deep Mixing for Embankment and Foundation Support. Washington, D.C. : Federal Highway Administration, 2013. 240 p. (Report / Federal Highway Administration ; no. FHWA-HRT-13-046).
- [8] Topolnicki M. Advances in Wet Soil Mixing Techniques. *Proceedings of the International Symposium on Ground Improvement (IS-GI Seoul 2014, Seoul, Korea, 20–22 Oct. 2014)*. Seoul, 2014. P. 113–134.
- [9] Porbaha A., Raybaut J., Nicholson P. State of the art in construction aspects of deep mixing technology. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Ground Improvement*. 2001. Vol. 5, no. 3. P. 123–140. DOI: <https://doi.org/10.1680/grim.2001.5.3.123>.

**Шевчук Олексій Михайлович** – аспірант, факультет будівництва, цивільної та екологічної інженерії, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: [omshevchuk@gmail.com](mailto:omshevchuk@gmail.com). <https://orcid.org/0009-0009-9382-9750>.

**O. Shevchuk**

## STUDY OF THE STRESS-DEFORMED STATE OF COLUMN FOUNDATIONS AND BASE REINFORCED WITH SOIL-CEMENT PILES

Vinnytsia National Technical University

*This paper presents the results of a comprehensive study of the stress-strain state of the "columnar foundation-reinforced base" system using vertical soil-cement elements. The relevance of the work is due to the increase in building density and the shortage of territories with favorable engineering and geological conditions, which is caused by active urban development, which in turn forces construction to be carried out in difficult conditions or on weak soils, where traditional methods of strengthening foundations are technically difficult or economically impractical. The use of soil-cement elements to strengthen foundations allows to significantly reduce the cost of construction and reduce transportation costs.*

*The purpose of the numerical studies conducted in the SOFiSTiK 2024 software package was to analyze the parameters of the base reinforced with vertical soil-cement elements while varying the binder content in the soil-cement mixture within the range from 10% to 40%.*

*To substantiate the correctness of using the SOFiSTiK 2024 software package, a simulation of the stress-strain state of the "stamp-reinforced base" system was performed for the stamp test of the reinforced base, conducted by R. V. Petrash.*

*As a result of conducting a series of model experiments for three groups of bases (inhomogeneous, homogeneous loam and homogeneous clay), the patterns of change in the reduced modulus of deformation and the first critical force depending on the variation of the binder content were established.*

*It is established that the use of a soil-cement mixture with a binder content of 20% is optimal, because for a homogeneous base reinforced with vertical soil-cement elements, the modulus of deformation increased by 54%, and a further increase in the binder content (up to 40%) leads to a slight increase in the modulus of deformation (by 13% relative to the 20% composition of the soil-cement mixture), which is an economically inefficient solution. The most pronounced effect of base reinforcement was recorded for a weak base ( 7.7 MPa), where at a 20% binder content the modulus of deformation increased more than 2 times, and the design resistance increased by 1.3 - 1.5 times.*

**Keywords:** soil cement, strength, design resistance, deformation modulus, reinforced base, stress-strain state, columnar foundation

**Oleksiy M. Shevchuk** - Faculty of Construction, Civil and Environmental Engineering, Vinnytsya national technical university, Vinnytsya, email : [omshevchuk@gmail.com](mailto:omshevchuk@gmail.com). <https://orcid.org/0009-0009-9382-9750>.