

# СТУПІНЬ РЕАЛІЗАЦІЇ ПАЛЬ В СКЛАДІ СТРІЧКОВОГО ФУНДАМЕНТУ ЗА РЕЗУЛЬТАТАМИ ВИПРОБУВАНЬ НА МАЛОМАСШТАБНИХ МОДЕЛЯХ

Вінницький національний технічний університет

*Проведено фізичне моделювання на маломасштабних моделях стрічкового пальового фундаменту з низьким ростверком на бурових та забавних палях з метою дослідити сумісну роботу паль та ростверку з ґрунтом і відмінність в роботі паль залежно від способу їх влаштування в ґрунті. Також виконане випробування статичним навантаженням одиночних паль тих же геометричних параметрів, що і в складі стрічкового пальового фундаменту. Проведено порівняння ступеню реалізації бурових та забивних паль в складі стрічкового пальового фундаменту та проаналізовано залежність ступеня реалізації від довжини та кроку паль.*

*Огляд досліджень по темі сумісної роботи паль та ростверку в складі стрічкового пальового фундаменту показує наявність ефектів покращення роботи за рахунок взаємного впливу паль, включенням в роботу стрічкового ростверку за рахунок реакції ґрунтової основи.*

*Чинними нормативними документами рекомендовано враховувати спільну роботу паль та ростверку, але існуючі аналітичні моделі не в повній мірі враховують фактори, які впливають на несучу здатність пальового фундаменту. Проведені дослідження підтверджують вплив ростверку на несучу здатність пальового фундаменту, підвищення ступеню реалізації несучої здатності паль в складі фундаменту, на яку впливають складні фізико-механічні процеси, які виникають в ґрунті під навантаженням та інші фактори.*

*Підходи до визначення допустимого навантаження на бурові палі в складі стрічкового пальового фундаменту занижують фактичну несучу здатність стрічкового пальового фундаменту на бурових палях порівняно з забивними. Розробка та уточнення існуючих методів визначення несучої здатності стрічкових пальових фундаментів, які враховуватимуть покращення умов роботи паль в групі і взаємодії з ростверком дозволить реалізувати резерв несучої здатності пальових фундаментів, що покращить техніко-економічні показники стрічкового пальового фундаменту та дозволить приймати більш економічні рішення при проектуванні пальових фундаментів.*

**Ключові слова:** стрічковий пальовий фундамент, ґрунтова основа, забивна паля, бурова паля, статичне навантаження, несуча здатність, ступінь реалізації.

Стаття надійшла до редакції / Received 11.03.2026  
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/)

© Блащук Н.В., Перебийніс М.В.

## Вступ

Використання бурових паль в складі стрічкових пальових фундаментів поширено в Україні та за її межами. Бурові палі мають певні переваги: відсутність динамічних впливів на ґрунт під час влаштування, можливість використання в складних геотехнічних умовах, варіативність геометричних та конструктивних параметрів. Але бурові паль програють за техніко-економічними показниками забивним палям при навантаженні середнього діапазону та використовуються тільки при значних навантаженнях, або при спіранні на міцні шари ґрунту, або при неможливості улаштувати забивні палі через складні інженерно-геологічні умови чи наявність існуючої забудови поблизу.

Так як оцінка несучої здатності стрічкового пальового фундаменту приймається як сума несучих здатностей одиночних паль, бурові палі сприймають менше навантаження на одиницю матеріалу порівняно з забивними. При такому розрахунку не враховується ряд чинників, які впливають на роботу паль в ґрунті. При сумісній роботі паль в групі та стрічковим ростверком відбувається покращення умов роботи паль, що обумовлено включенням в роботу низького ростверку та ефекту обтиснення, за рахунок передачі через ґрунт навантаження від ростверку та взаємним вплив паль, що створює додатковий тиск по бічній поверхні палі. При врахуванні позитивних ефектів сумісної роботи елементів пальового фундаменту, а саме зростання опору під ростверком і ступінь реалізації паль в складі фундаменту можливо запропонувати більш економічно доцільне рішення при проектуванні.

Нормативною документацією, яка діє на території України [1], рекомендується враховувати сумісну роботу ростверку і паль, але не наведено положень і методики для його врахування. Дослідження проведені у ВНТУ показують певні фактори та залежності, які впливають на несучу здатність пальових фундаментів та стають в основі розробки ефективних методів розрахунку та проектування.

Результати досліджень [4, 5] показують що резерв несучої здатності паль фактично в значній мірі вищий ніж розрахований за допомогою аналітичних моделей, запропонованих у нормативних джерелах [1-3]. Тож методика розрахунку навантаження, які здатні сприймати бурові та забивні палі потребує удосконалення. При чому необхідність в удосконаленні методів розрахунку пальових фундаментів підтверджена як для проектування нових будівель та споруд, так і для підсилення існуючих.

Проведене дослідження [6] про характер залежності сил тертя по бічній поверхні доводить, що співвідношення зусиль, що сприймає ґрунт під вістряма і по бічній поверхні палі, залежить від її розмірів, жорсткості та властивостей ґрунтів, які прорізає паля. Повна реалізація несучої здатності палі тертя залежить від зрушувальної деформації палі, на що впливає вид й стан ґрунту, що оточує палю, та її розміри. Тому чим слабкіше ґрунт і більші поперечні розміри палі, тим величина зрушувального осідання більша.

Також з ціллю більш точного визначення несучої здатності паль по боковій поверхні в тому ж дослідженні, отримано вагомі залежності для розподілення по тілу палі. Результати показують що навантаження, які передає паля на ґрунт залежить від її розмірів та жорсткості ґрунту. Чим міцніший ґрунт під вістряма палі, тим більше навантаження буде приходиться на нижню частину палі і менше передаватися на ґрунт через сили тертя по боковій поверхні.

Такі результати вказують на важливість точного розрахунку палі, так як нерівномірний розподіл зусиль може призвести до неповної реалізації можливостей палі та передчасного її руйнування. Для ефективної роботи палі повинна відбуватися повна реалізація сил тертя по бічній поверхні, яка відповідає осіданню палі відносно оточуючого ґрунту при навантаженні.

Середнє значення опору однієї палі в складі стрічкового пальового фундаменту, за результатами експерименту [7] менше опору одиночної палі, що зумовлено взаємовпливом напружених зон основи сусідніх паль. Приріст середнього опору однієї палі зменшується зі збільшенням кількості паль. При тому розподіл навантаження, що приходиться на фундамент нерівномірно розподіляється на окремі палі.

Аналітичні методи, які використовуються для розрахунку пальових фундаментів базуються на низькі спрощень, що не в повній мірі відображає реальну роботу складових пальового фундаменту в ґрунтових умовах під дією навантажень. Відсутні методи визначення несучої здатності паль в складі стрічкового пальового фундаменту з низьким ростверком, які в повній мірі враховують взаємодію паль між собою та ростверком через напруження в ґрунті, особливо для бурових паль. Досліджень сумісної роботи паль з ростверком та основою є недостатня кількість, саме для стрічкових пальових фундаментів. Тому актуальним залишається напрямок дослідження роботи пальових фундаментів в ґрунтових умовах для підвищення точності розрахункових моделей і методів.

### Фізичне моделювання

Для оцінки сумісної роботи ростверку і паль в складі стрічкового пальового фундаменту з низьким ростверком під дією статичного навантаження та визначення частки навантаження, яке приходиться на палі в залежності від їх способу влаштування в ґрунт (бурова, забивна), кроку та довжини, проведено фізичне моделювання на маломасштабних моделях у лабораторних умовах.

Фізичне моделювання являється методом, який дозволяє досліджувати закономірності роботи паль і пальових фундаментів з масивом ґрунту в широкому діапазоні змін геометричних характеристик. Дослідження на маломасштабних моделях дозволяє отримати достовірну та точну якісну оцінку поведінки фундаменту та основи від прикладення статичного навантаження та взаємодію елементів фундаменту в наближених до реальних умовах. Також вагомою перевагою є широкий вибір варіантів розмірів, розміщення паль та можливість багаторазового повторення.

Моделювання ґрунтової основи виконано в лотку розмірами 1800x1200x1000 мм. В якості ґрунту заплановано використовувати пісок середньої крупності, характеристики якого вказані в табл. 1. Основа створюється шляхом пошарового засипання у лоток піску заданої вологості з обов'язковим ущільненням кожного шару до заданої щільності. Щільність основи контролювалася методом ріжучого кільця відповідно до вимог проведення лабораторних випробувань. Вологість

визначається методом висушування до постійної ваги. Враховуючи розміри лотка, а також параметри упорної системи для передачі навантаження обрано масштаб моделювання 1:15. Маломасштабне моделювання системи «основа-фундамент» базується на теорії фізичної подібності геотехнічних середовищ і його результатом є якісна картина напружено-деформованого стану системи, тому жорсткість матеріалу конструкцій не має суттєвого впливу, ключовим критерієм подібності стає контактна та осьова жорсткість елементів. Для забезпечення достовірності результатів модель та натурний об'єкт повинні мати геометричну подібність.

Таблиця 1

#### Характеристики моделі ґрунтової основи в лотку

Назва характеристики	Пісок середньої щільності
Щільність, г/см <sup>3</sup>	1670
Вологість	0,07
Коефіцієнт пористості	0,70
Кут внутрішнього тертя, град.	30
Питоме зчеплення, кПа	1
Модуль деформації, МПа	24

Для моделювання паль довжиною 6, 4,5 і 3 м, поперечним перерізом 30x30 см, виготовлено моделі з деревини, розміром поперечного перерізу 2,5 см для бурових та забивних паль і довжиною 20, 30 і 40 см. Для результативності порівняння було прийнято розміри бурових і забивних паль однакової довжини і з однаковою площею бічної поверхні. Забивні палі занурювались забиванням, а бурові палі влаштовувались зануренням палі круглого перерізу в попередньо пробурену свердловину діаметром 2,5 см. Для влаштування свердловини було спеціально виготовлено міні бур з направляючим стержнем для забезпечення вертикальності. Була спроба використання будівельних розчинів як матеріалу для паль, нажалі випробування таких одиночних паль показало низьку несучу здатність, що пояснюється відносно не шорсткою бічною поверхнею і низьким опором тертя по боковій поверхні.

Виготовлено модель низького ростверку з металу висотою 2 см та довжиною 64 см, який дозволяє моделювати фундамент з міжосьовою відстанню між палями 3d (11 палі) та 6d (6 палі).

У ході експерименту на паливий фундамент прикладалося статичне навантаження з кроком 1.5 кН. Для навантаження моделі використовуються два механічних домкрата, розташованих по бокам моделі з однаковою відстанню від центру конструкції. Для контролювання прикладеного навантаження використовуються два динамометри ДС-5 і ДС-3, розташовані між домкратами та упорною балкою. Навантаження на ростверк передається через жорстку металеву балку для рівномірного розподілення навантаження. На кожен палию розміщено тензOMETричний датчик для вимірювання навантаження, що приходить на палию. ТензOMETричні датчики, розраховані на навантаження до 200 кг, передають дані на аналого-цифровий перетворювач ваги hx-711 (статична повторюваність становить 0,05-0,1 кг, клас побутової точності II та похибка 0,05% у використанні з тензодатчиками А4М1 з активним підсилювачем-передавачем), та виводить показники на дисплей модулю вагового індикатору. Для можливості одночасно отримувати показники з одинадцятьох датчиків сконструйовано прилад, який об'єднує модулі інтерфейсів підключення, перетворювачів та дисплеї індикаторів в одну конструктивну схему.

Величина осідання замірялася за допомогою прогиномірів, закріплених вертикально по обидва боки розподільчої балки. Схему влаштування конструкції, домкратів та вимірювальних приладів приладів показано на рис. 1.

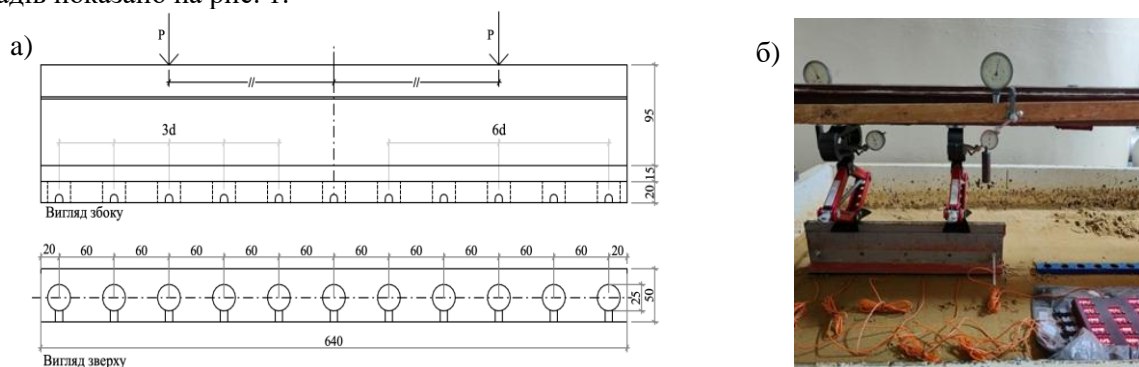


Рисунок 1 – Влаштування та навантаження моделі стрічкового фундаменту палі

Для порівняння несучої здатності палі в складі стрічкового пальового фундаменту з несучою здатністю палі окремо проведено випробування статичним навантаженням одиночних забивних та бурових палей.

Навантаження на одиночну палю передавалося за допомогою важеля закріпленого до лотка, з врахуванням плеча прикладення зусилля, схему конструкції для випробування показано на рис 2.

В ході експерименту на палю подавалося навантаження з кроком 5 кг. На кожному етапі навантаження, по проходженню заданого проміжку часу, знімалися показники осідання для формування графіків залежності осідання до навантаження та подальшого порівняння результатів.

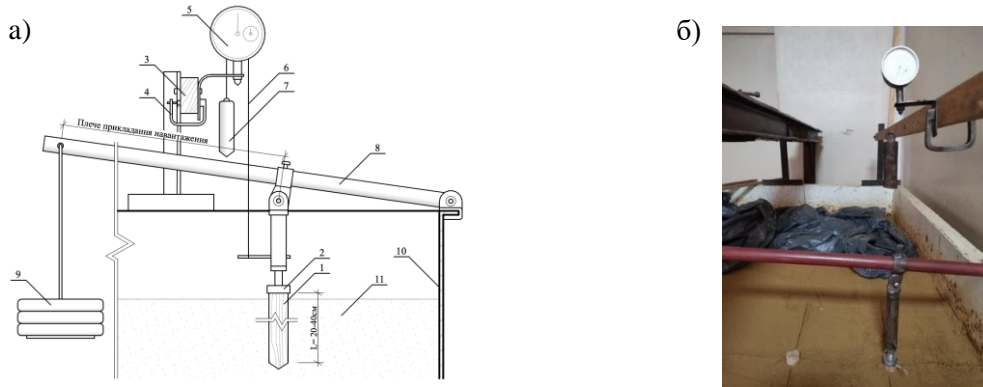


Рисунок 2 – Конструкція для випробування одиночних палей

а) схема завантаження палі в лотку: 1 – палія; 2 – центральна металева пластина; 3 – незалежна рейка для кріплення прогиноміру; 4 – струбуцина; 5 – прогиномір; 6 – сталевий дріт; 7 – висок; 8 – важільна система; 9 – навантаження; 10 – стінки лотка; 11 – ґрунтова основа; б) випробування моделі одиночної палі

### Результати досліджень

З отриманої в ході випробування величини осідання стрічкового пальового фундаменту та величини навантаження, що приходилося на кожен палю отримано величину осідання палі в складі фундаменту, що дозволило якісно оцінити напружено-деформований стан системи «основа – пальовий фундамент» з використанням забивних чи бурових палей. Графіки залежності осідання - навантаження для палей в складі стрічкового пальового фундаменту при кроці 3d та 6d різної довжини показані на рис.3а для забивних і на рис 4а для бурових палей. Графіки залежності осідання - навантаження сформовані за результатами випробування одиночних палей показані на рис.3б для забивних та на рис. 4б для бурових палей.

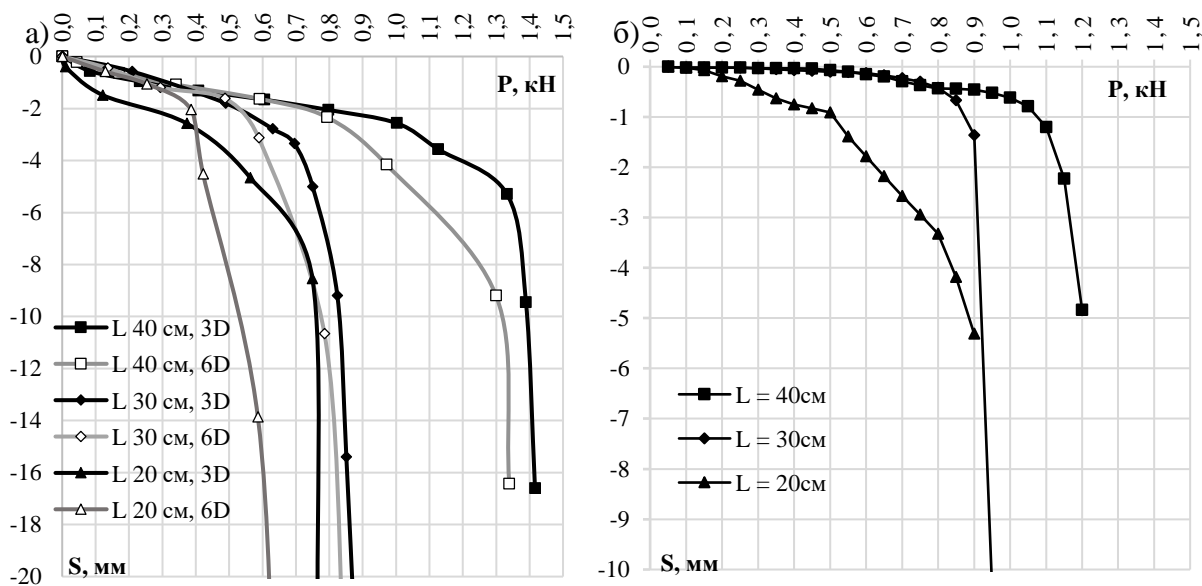


Рисунок 3 – Графік залежності осідання-навантаження забивних палей: а) в складі фундаменту з кроком 3d; б) одиночна палія

На основі результатів випробування статичним навантаженням стрічкових пальових фундаментів та одиночних паль визначено несучу здатність паль, як величину навантаження при граничній несучій здатності основи. Виконано порівняння несучої здатності паль в складі фундаменту з несучою здатністю одиночних паль, тих же геометричних параметрів та отримано показник ступеню реалізації несучої здатності паль, який виражено у відношенні несучої здатності палі в складі фундаменту до несучої здатності одиночної палі. Несучу здатність випробуваних паль та ступінь їх реалізації показано в табл. 2.

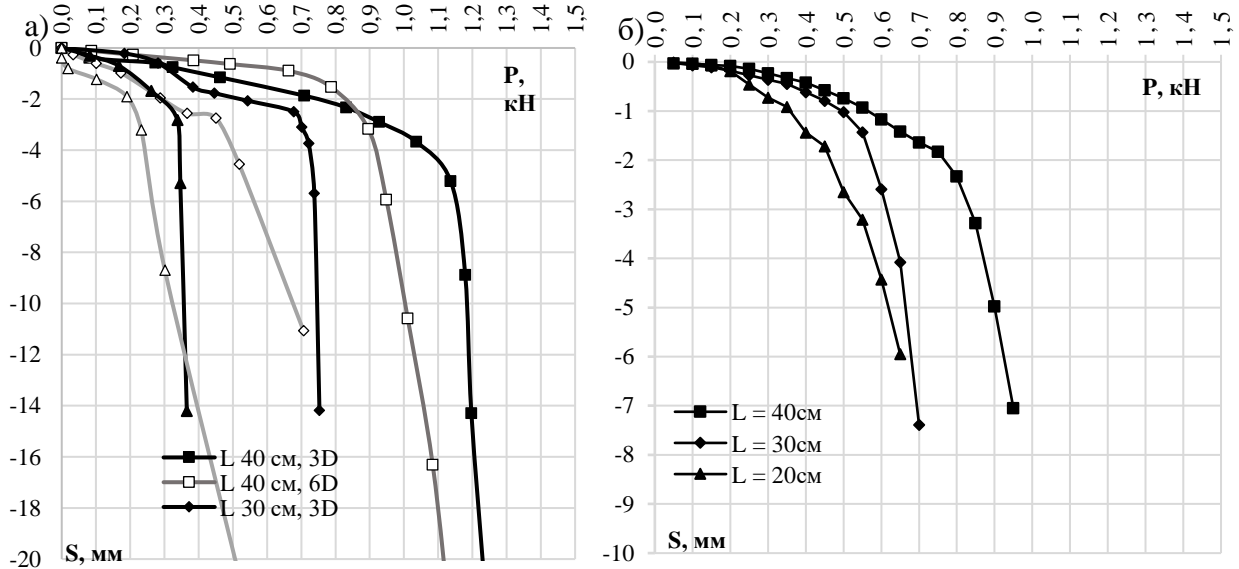


Рисунок 4 – Графік залежності осідання-навантаження бурових паль: а) в складі фундаменту з кроком 6d; б) одиночна палія

Проаналізовано залежність ступеню реалізації палі в складі стрічкового пального фундаменту від довжини паль та кроку для бурових та забивних паль і показано у вигляді графіку залежності ступеню реалізації палі до довжини при різному кроці на рис.5.

Таблиця 2

**Порівняння ступеню реалізації несучої здатності паль у складі стрічкового фундаменту з одиночними**

крок паль	довжина паль, см								
	20		30		40				
	у складі фундаменту, кН	одиночна, кН	ступінь реалізації несучої здатності паль у складі фундаменту	одиночна, кН	ступінь реалізації несучої здатності паль у складі фундаменту	одиночна, кН	ступінь реалізації несучої здатності паль у складі фундаменту		
На забивних палях									
3d	0,55	0,6	0,92	0,75	0,9	0,83	1,30	1,14	1,14
6d	0,42	0,6	0,70	0,67	0,9	0,72	1,05	1,14	0,92
На бурових палях									
3d	0,35	0,46	0,76	0,72	0,6	1,20	1,55	0,76	1,51
6d	0,25	0,46	0,54	0,54	0,6	0,90	0,93	0,76	1,22

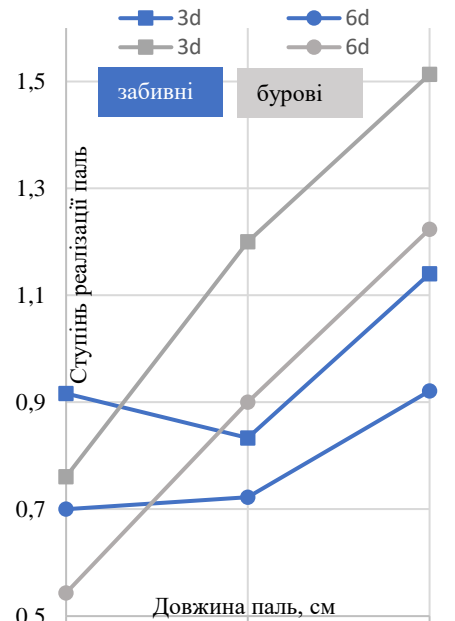


Рисунок 5 – Графік залежності ступеню реалізації бурових та забивних паль до довжини при різному кроці

## Висновки

1. Ступінь реалізації несучої здатності палі у складі стрічкового пального фундаменту з низьким ростверком більший у порівнянні з одиночною палею. Для бурових паль в складі пального стрічкового фундаменту до 1,5 разів, а для забивних до 1,1 разів.
2. При збільшенні довжини та кроку паль ступінь реалізації зростає, при чому в більшій мірі для бурових паль, що вказує на залежність несучої здатності стрічкового пального фундаменту в цілому від геометричних та конструктивних параметрів.
3. Врахування реальної роботи бурових паль у складі стрічкового пального фундаменту дає можливість підвищити техніко-економічні показники і відповідно економити матеріальні та трудові ресурси під час проведення будівельних робіт.
4. Реальна робота палі в групі з низьким ростверком суттєво відрізняється від суми несучих здатностей одиночних паль, що вказує на особливості роботи паль під навантаженням, які не враховують аналітичні методи визначення несучої здатності стрічкового пального фундаменту.
5. Отримані результати підтверджують необхідність уточнення аналітичних методів розрахунку несучої здатності стрічкових палових фундаментів з врахуванням взаємодії палі з ґрунтом під навантаженням. Практичне значення дослідження полягає у можливості розробки та вдосконалення методів проектування стрічкових палових фундаментів для підвищення їх точності та надійності.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] ДБН В.2.1-10-2009 Основи та фундаменти споруд. Основні положення проектування (Зміна №1 Палі і палові фундаменти). Київ: Мінбуд України, 2011. 56 с.
- [2] ДБН В.2.1-10-2018. Основи та фундаменти споруд. Основні положення проектування. [Чинний від 2019-01-01]. Київ : Мінрегіон України, 2018. 36 с.
- [3] ДСТУ-Н Б 1997-1:2010(2011). Єврокод 7. Геотехнічне проектування. Частина 1 Загальні правила (EN 1997-1:2004, IDT). Київ: Мінрегіонбуд Україна.
- [4] Маєвська І.В., Романенко А.В. Аналіз достовірності визначення несучої здатності бурін'єкційних паль за діючими методиками СНиП Будівельні конструкції. Міжвідомчий науково-технічний збірник. – К.: КНУБА, 2011. – Вип. 75, кн.2. – С. 164-169.
- [5] Блащук Н. В., Підгорний О. С. Визначення несучої здатності фундаментів за результатами фізичного моделювання : Дисертація. – ВНТУ, 2016.
- [6] Пилипчук, М. Л., & Капшієнко, Ю. Ю. (2018). Визначення несучої здатності паль тертя по боковій поверхні [Магістерська робота, Вінницький національний технічний університет]. Інституційний репозитарій ВНТУ. <http://ir.lib.vntu.edu.ua/handle/123456789/33822>.
- [7] Моргун А. С., Мойсенко Е. О. Вивчення перерозподілу зусиль в стрічкових палових фундаментах методом граничних елементів. Вісник Вінницького політехнічного інституту. 2019. No 3 с.7-12. ISSN 1997 <https://doi.org/10.31649/1997-926>.
- [8] Viggiani C., Mandolini A., Russo G. Piles and Pile Foundations. London : Spon Press (Taylor & Francis Group), 2011. 296 p. ISBN 9780415490665.
- [9] Reul O., Randolph M. Combined Pile-Raft Foundations: Design and Practice. London : CRC Press, 2024. 270 p. DOI: <https://doi.org/10.1201/9781003244646>. ISBN 9781032155500.

## REFERENCES

- [1] DBN V.2.1-10-2009 Foundations and foundations of structures. Basic design provisions (Amendment No. 1 Piles and pile foundations). Kyiv: Ministry of Construction of Ukraine, 2011. 56 p.
- [2] DBN V.2.1-10-2018. Osnovy ta fundamenti sporudy. Osnovni polozhennya proektuvannya. [Chynnyy vid 2019-01-01]. Kyiv : Minrehion Ukrayiny, 2018. 36 s.
- [3] DSTU-N B 1997-1:2010 (2011). Yevrokod 7. Neotekhnichne proektuvannya. Chastyna 1 Zahalni pravyla (EN 1997-1:2004, IDT). Kyiv: Minrehionbud Ukrainy.
- [4] Maievska I.V., Romanenko A.V. Analysis of the reliability of determining the bearing capacity of bored-injected piles using current methods of SNiP Building Structures. Interdepartmental scientific and technical collection. – Kyiv: DP NDIBC. – 2011. – Issue 75, Vol. 2. – pp. 164–169. Пилипчук М. Л., Капшієнко Ю. Ю. Визначення несучої здатності паль тертя по боковій поверхні : дис. – ВНТУ, 2018.
- [5] Blaschuk N.V., Pidgorny O.S. Determination of the bearing capacity of foundations based on the results of physical modeling: dissertation. – VNTU, 2016.
- [6] Pylypchuk, M. L., & Kapshiienko, Yu. Yu. (2018). Vyznachennia nesuchoi zdatnosti pal tertia po bokovii poverkhni [Determination of the bearing capacity of friction piles on the lateral surface] [Master's thesis, Vinnytsia National Technical University]. VNTU Institutional Repository. (in Ukrainian).
- [7] Morhun A. S., Moiseienko E. O. Vyvchennia pererозpodilu zusyly v strichkovykh palovykh fundamentakh metodom hranychnykh elementiv (Study the redistribution of forces in strip pile foundations using the boundary element method). Visnyk Vinnytskoho politekhnichnoho instytutu. 2019. No 3 s.7-12. ISSN 1997 <https://doi.org/10.31649/1997-926>.

- [8] Viggiani C., Mandolini A., Russo G. Piles and Pile Foundations. London : Spon Press (Taylor & Francis Group), 2011. 296 p. ISBN 9780415490665.
- [9] Reul O., Randolph M. Combined Pile-Raft Foundations: Design and Practice. London : CRC Press, 2024. 270 p. DOI: <https://doi.org/10.1201/9781003244646>. ISBN 9781032155500.

**Блащук Наталя Вікторівна** – канд. техн. наук, доцент кафедри будівництва, міського господарства та архітектури, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: [blaschuk@vntu.edu.ua](mailto:blaschuk@vntu.edu.ua)  
ORCID: 0000-0001-9764-0271.

**Перебийніс Михайло Володимирович** – аспірант, Факультет будівництва, цивільної та екологічної інженерії, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: [Mishauavn@gmail.com](mailto:Mishauavn@gmail.com)

**N. Blaschuk**  
**M. Perebyinis**

## DEGREE OF PILE EMBEDMENT IN A STRIP FOUNDATION BASED ON THE RESULTS OF TESTS ON SMALL-SCALE MODELS

Vinnitsa National Technical University

*Physical modeling was conducted using small-scale models of a strip pile foundation with a low grillage on bored and driven piles to investigate the interaction between the piles, the grillage, and the soil, as well as the differences in pile behavior depending on the method of their installation in the soil. Static load tests were also performed on individual piles with the same geometric parameters as those in the strip pile foundation. A comparison was made of the degree of load transfer for bored and driven piles within a strip pile foundation, and the dependence of the degree of load transfer on pile length and spacing was analyzed. A review of studies on the interaction of piles and the pile cap within a strip pile foundation demonstrates the presence of performance-enhancing effects due to the mutual interaction of the piles and the engagement of the strip pile cap through the reaction of the soil foundation.*

*Current regulatory documents recommend considering the joint performance of piles and the grillage, but existing analytical models do not fully account for the factors affecting the bearing capacity of the pile foundation. The conducted studies confirm the influence of the grillage on the bearing capacity of the pile foundation, as well as an increase in the degree of realization of the piles' bearing capacity within the foundation, which is influenced by complex physical-mechanical processes occurring in the soil under load and other factors.*

*Approaches to determining the allowable load on bored piles within a strip pile foundation underestimate the actual bearing capacity of the strip. Current approaches to determining the allowable load on bored piles in strip pile foundations underestimate the actual bearing capacity of such foundations compared to those using driven piles. The development and refinement of existing methods for determining the bearing capacity of strip pile foundations, which will account for improved operating conditions of piles in a group and their interaction with the grillage, will allow for the realization of the bearing capacity reserve of pile foundations, which will improve the technical economic performance of strip pile foundations and enable more cost-effective decisions to be made when designing pile foundations.*

**Keywords:** strip pile foundation, soil foundation, driven pile, bored pile, static load, bearing capacity, degree of realization.

**Natalia V. Blaschuk** - candidate. Sc., assistant professor of department of construction, architecture and municipal economy, Vinnytsia National Technical University. Vinnitsa, e-mail: [blaschuk@vntu.edu.ua](mailto:blaschuk@vntu.edu.ua)

**Mykhailo Perebyinis** — Faculty of Construction, Civil and Environmental Engineering, Vinnytsya national technical university, Vinnytsya, email : [Mishauavn@gmail.com](mailto:Mishauavn@gmail.com).