

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ СТОВПЧАСТИХ ПАЛЬОВИХ ФУНДАМЕНТІВ З РОЗРІДЖЕНИМ РОЗМІЩЕННЯМ ПАЛЬ ШЛЯХОМ ФІЗИЧНОГО МАЛОМАСШТАБНОГО МОДЕЛЮВАННЯ

Вінницький національний технічний університет

Анотація

В роботі наведені результати фізичного моделювання роботи паль та низького ростверку у складі стовпчастого пальового фундаменту при розрідженому розміщенні паль на маломасштабних моделях. Метою досліджень є підтвердження доцільності зменшення кількості паль в межах сталого розміру ростверка. Розглянуті ростверки різної площі та варіюється довжина паль. За підсумками моделювання виконаний аналіз впливу геометричних параметрів пальового фундаменту на несучу здатність фундаменту в цілому та окремих його елементів. Проаналізована зміна частки ростверку у несучій здатності фундаменту та питомої несучої здатності коротких та довгих паль.

Виявлено, що зменшення кількості паль у 2-2,5 рази у межах постійної площі ростверка призводить до зменшення навантаження, яке сприймає куц, лише у 1,1-1,3 рази для коротких паль і у 1,2-1,3 рази для довгих. Короткі палі краще реалізують себе у складі стовпчастого пальового фундаменту, отже, варіюючи розміщення паль у ростверку та їх довжиною можна досягнути більш ефективного використання матеріалів.

Ключові слова: новий пальовий фундамент, розріджене розміщення паль, короткі палі, довгі палі, ростверк, маломасштабні моделі, несуча здатність, частка ростверку, питома несуча здатність.

Abstract

The paper presents the results of physical modeling of the operation of piles and a low grillage as part of a columnar pile foundation with sparse pile placement on small-scale models. The purpose of the research is to confirm the feasibility of reducing the number of piles within a constant grillage size. Grillage of different areas and varying pile lengths are considered. Based on the results of the modeling, an analysis of the influence of the geometric parameters of the pile foundation on the bearing capacity of the foundation as a whole and its individual elements was performed. The change in the share of the grillage in the bearing capacity of the foundation and the specific bearing capacity of short and long piles was analyzed.

It was found that reducing the number of piles by 2-2.5 times within a constant grillage area leads to a decrease in the load perceived by the bush by only 1.1-1.3 times for short piles and 1.2-1.3 times for long ones. Short piles are better implemented as part of a columnar pile foundation, therefore, by varying the placement of piles in the grillage and their length, more efficient use of materials can be achieved.

Keywords: new pile foundation, sparse pile placement, short piles, long piles, grillage, small-scale models, bearing capacity, grillage fraction, specific bearing capacity.

Вступ

При масовому проєктуванні за чинними нормами [1], визначивши потрібну кількість паль, виходячи тільки з їх несучої здатності, намагаються розмістити їх в куці якомога компактніше, щоб скоротити витрати на ростверк, робота якого не враховується. Якщо розмістити меншу кількість паль на значній відстані одна від одної в межах сталого ростверку або розміри ростверка прийняти доволі значними, це може компенсувати незначну кількість паль включенням у роботу ростверка. Такі фундаменти можна назвати комбінованими по аналогії з плитно-пальовими фундаментами, де в роботу включається ростверк.

Попередні дослідження [3-6] показали, що зменшення кількості паль в групі при збереженні розмірів ростверка призводить до незначної втрати несучої здатності, яка не сумірна з зменшенням витрат матеріалів на палі. Одночасно досліджувалась ефективність роботи коротких паль у порівнянні з довгими у таких пальових фундаментах з розрідженим розміщенням паль.

Для підтвердження раніше виконаних досліджень ефективності використання пальових фундаментів із зменшеною кількістю паль в межах сталого ростверка виконані фізичні експерименти на маломасштабних моделях. Проведені дослідження розглядають стовпчасті пальові фундаменти при новому

будівництві. Додатковий акцент робиться на виявленні переваг коротких паль у порівнянні з довгими при такому компонуванні групи паль.

Устаткування та прилади для проведення фізичного моделювання

Випробування маломасштабних моделей пального фундаменту проводилось у лабораторному лотку розміром 1800×1200×1000 мм, обладнаного упорною системою для домкрату, який передає навантаження на паливий куш.

В якості ґрунту використовувався пісок середньої крупності із щільністю $\rho = 1,67 \text{ г/см}^3$ та вологістю $w = 0,07$. Основа створювалась шляхом пошарового засипання у лоток піску заданої вологості з ущільненням кожного шару до заданої щільності. Щільність контролювалась методом ріжучого кільця у трьох точках кожного шару товщиною 15 см.

Навантаження на модель фундаменту передавалось за допомогою гвинтового домкрату вантажо-підйомністю 1,5 т, а для виміру зусилля, що передається на фундамент, використовувався динамометр з максимальним зусиллям 3 т.

Для замірювання переміщень моделі фундаменту використовувалась система прогиномірів, встановлена на незалежній реперній системі, закріпленій на стінки лотка.

Проведені раніше моделювання стовпчастих паливих фундаментів на маломасштабних моделях при кафедрі БМГА ВНТУ [3, 5] дозволили обрати масштаб моделювання 1:20, який дозволить довести до втрати несучої здатності фундаменти з моделями паль довжиною до 10 м при перерізі 30х30 см (виходячи з обмежених можливостей упорної системи).

Для випробувань виготовлені моделі дерев'яних паль перерізом 15х15 мм з довжинами 150, 230, 300 та 450 мм (відповідають натурним палям перерізом 300х300 мм з довжинами 3, 4,5, 6 та 9 м).

У роботі [2] наведений детальний опис використаного устаткування, моделей паль та ростверку з ілюстрацією шляхом фотофіксації.

При проведенні досліджень визначались зусилля у палях куша за допомогою тензометричних датчиків, встановлених на голови паль. Використовувались датчики промислового виготовлення, передбачені для виміру поздовжніх зусиль до 2 кН.

Для фіксації показів датчиків і перетворення їх у зусилля в палях був виготовлений спеціальний пристрій для замірів навантаження, що припадає на палі групи.

На рис. 1 наведене розміщення паль у тілі ростверків в двох дослідках (фото після закінчення дослідів).



Рис. 1 – Розрізнене розміщення паль у тілі ростверків

На рис. 2 показана в зборі система для передавання навантаження на модель пального фундаменту.



Рис. 2 – Система для передавання навантаження на модель пальового фундаменту

Для випробування одиночних паль був використаний спеціальний важіль, що кріпиться до стінки лотка (рис. 3). Для замірювання переміщень палі також використовувався прогиномір, встановлений на незалежній реперній системі, закріпленій на стінки лотка.



Рис. 3 – Система для передавання навантаження на одиночну палю

План експериментів фізичного моделювання

Випробувались пальові фундаменти з різною кількістю паль, розміщених не в кожному отворі виготовлених ростверків. Схема розміщення паль у ростверках різних розмірів наведена на рис. 4.

Для кожного з означених ростверків попередньо був виконаний дослід з розміщенням паль в кожному отворі, що дозволило при обробці результатів порівняти одержані результати для щільного і розрідженого розміщення паль.

Випробування передбачали для кожного з ростверків використання моделей паль з довжиною 150 мм (модель палі довжиною 3 м) і довжиною 450 мм (модель палі довжиною 9 м).

При плануванні модельного експерименту в якості незалежних змінних обрані основні геометричні параметри пальового куща:

- приведена довжина палі, l/d ;
- площа ростверка;
- кількість паль у групі.

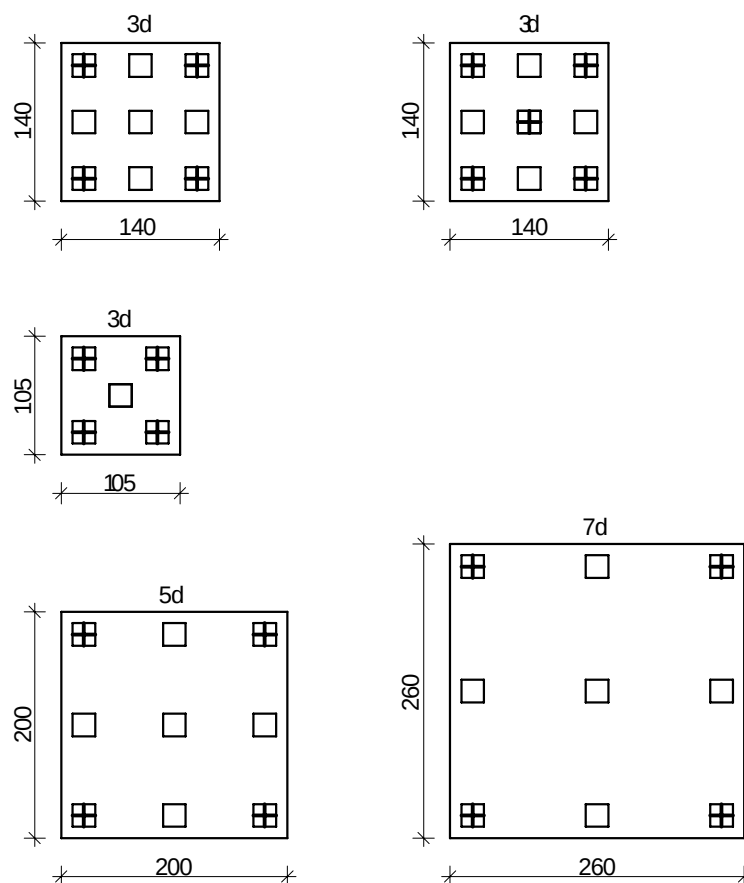


Рис. 4 – Схеми розміщення дослідних паль у тілі ростверків

Передбачені:

- група паль зі сталим розміром ростверка 140×140 мм і трьома варіантами розміщення паль (4, 5 та 9 шт.);
- група паль зі сталою кількістю паль (4 шт.), розташованих по кутах ростверка з варіюванням розмірів ростверків (105×105 , 140×140 , 200×200 , 260×260 мм).

Для кожного дослідів виконане випробування для двох довжин паль (150 та 450 мм).

Передача статичного навантаження на фундамент здійснювалась ступенями з витримкою кожного ступеня до умовної стабілізації деформацій (не більше 0,25 мм за 15 хв. спостережень) до досягнення навантаженням граничного значення.

Для аналізу відмінності поведінки паль і ростверку у складі кушового фундаменту і поведінки одиночної палі та плити ростверку проведені випробування одиночних паль різної довжини та плити ростверків без паль.

Результати фізичного моделювання роботи стовпчастого пальового фундаменту з різним розміщенням паль

В результаті проведення експериментів за розробленою програмою дослідження були одержані:

- графіки залежності осідання – навантаження куца в цілому;
- графіки осідання – навантаження за результатами випробування одиночних паль різної довжини;
- графіки осідання – навантаження при випробуванні плити ростверку як штампа без паль.

У таблиці 1 наведено результати експериментальних досліджень маломасштабних моделей пальових фундаментів при осіданні 30 мм.

На рис. 5 - 7 наведені графіки залежності несучої здатності фундаментів від кількості паль для різних розмірів сталого ростверку. Таким чином залежності побудовані виходячи з компонування куців при постійних розмірах ростверка.

Таблиця 1 – Результати експериментальних випробувань моделей пальових фундаментів із розрізним кроком паль при осіданні 30 мм

Розміри рост- верку, мм	Кількість паль	Приведена дов- жина паль, (l/d)	Навантаження на модель фундаменту, кН	Навантаження, яке сприймають палі, кН	Несуча здатність одиначної палі при 0,2S, кН	Ступінь реаліза- ції несучої здатно- сті	Навантаження, яке сприймає рост- верок, кН	Несуча здатність ростверку, кПа	Частка ростверку, %	Ступінь реалізації ростверку, %	Питома несуча здатність палі, кН/см
105 ×105	5	10	2,40	1,49/0,3	0,3	1,0	0,91	1,9	38,0	47,9	0,02
		30	4,80	3,7/0,74	0,75	0,98	1,1	1,9	22,9	57,9	0,0164
105 ×105	4	10	2,20	1,0/0,25	0,3	0,83	1,2	1,9	54,5	63,1	0,0167
		30	3,90	2,7/0,67	0,75	0,89	1,2	1,9	30,7	63,1	0,015
140 ×140		10	5,20	2,81/0,31	0,3	1,03	2,39	3,5	46,0	68,3	0,0206
		30	7,00	5,77/0,64	0,75	0,85	1,23	3,5	17,6	35,1	0,0142
		10	4,48	2,16/0,43	0,3	1,44	2,32	3,5	51,8	66,3	0,0288
		30	6,00	4,00/0,8	0,75	1,07	2,00	3,5	34,4	57,1	0,0178
		10	3,80	1,47/0,37	0,3	1,23	2,33	3,5	61,3	66,6	0,0245
		30	6,00	2,90/0,73	0,75	0,97	3,10	3,5	51,7	88,6	0,0161
20 0×20 0		10	5,70	1,44/0,16	0,3	0,53	4,26	5,0	74,7	85,2	0,0107
		30	8,80	3,89/0,43	0,75	0,58	4,91	5,0	55,8	98,2	0,0096
20 0×20 0		10	5,25	0,79/0,20	0,3	0,66	4,46	5,0	84,9	89,2	0,0132
		30	6,70	2,15/0,54	0,75	0,72	4,55	5,0	67,9	91,0	0,0119

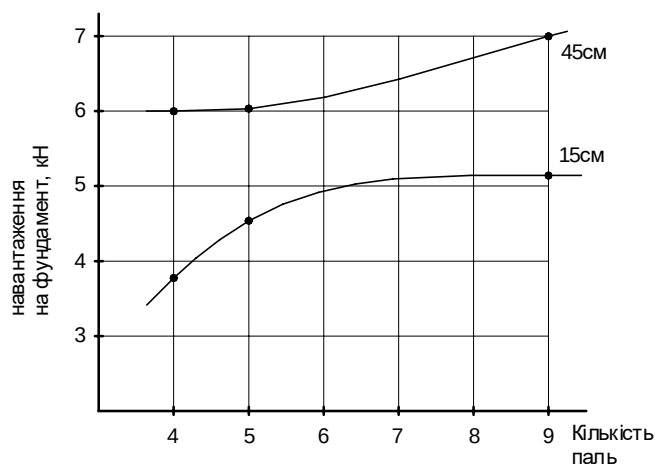


Рис. 5 – Графіки залежності несучої здатності фундаментів від кількості і довжини паль для ростверку 140×140 мм

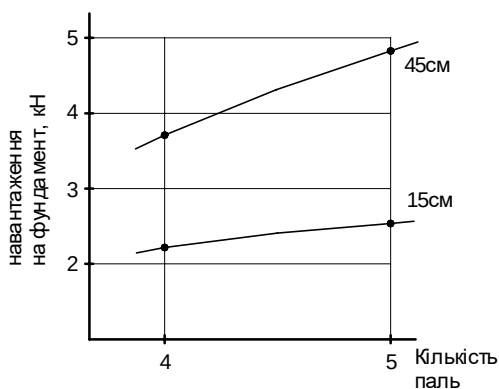


Рис. 6 – Графіки залежності несучої здатності фундаментів від кількості і довжини паль для ростверку 105×105 мм

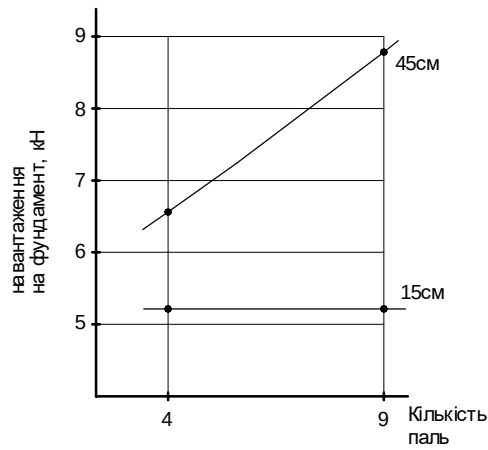


Рис. 7 – Графіки залежності несучої здатності фундаментів від кількості і довжини паль для ростверку 200×200 мм

На рис. 8 наведені графіки залежності несучої здатності фундаментів від площі ростверків при сталій кількості паль 4 шт.

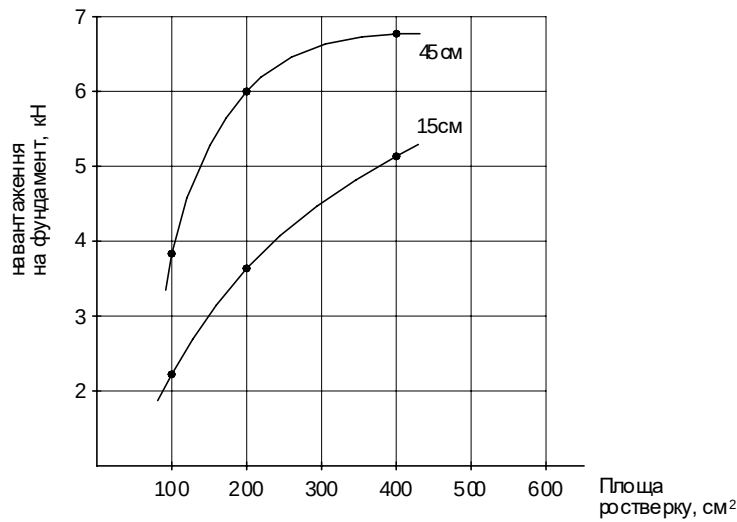


Рис. 8 – Графіки залежності несучої здатності фундаментів від довжини паль і площі ростверку при кількості паль в куці 4 шт.

На рис. 9 - 11 наведені графіки залежності частки ростверку у несучої здатності фундаментів від кількості паль для різних розмірів сталого ростверку.

На рис. 12 наведені графіки залежності частки ростверку у несучої здатності фундаментів від площі ростверків при сталій кількості паль 4 шт.

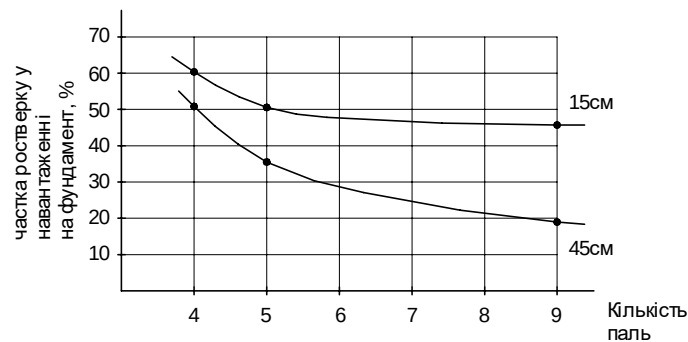


Рис. 9 – Графіки залежності частки ростверку у несучої здатності фундаментів від кількості і довжини паль для ростверку 140×140 мм

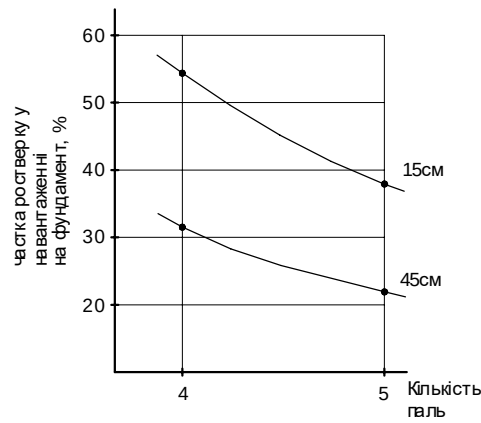


Рис. 10 – Графіки залежності частки ростверку у несучій здатності фундаментів від кількості і довжини паль для ростверку 105×105 мм

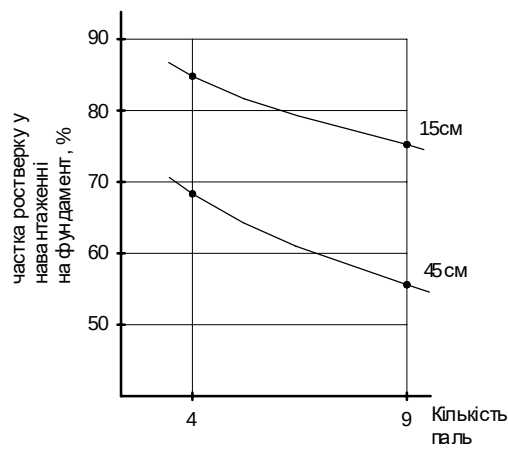


Рис. 11 – Графіки залежності частки ростверку у несучій здатності фундаментів від кількості і довжини паль для ростверку 200×200 мм

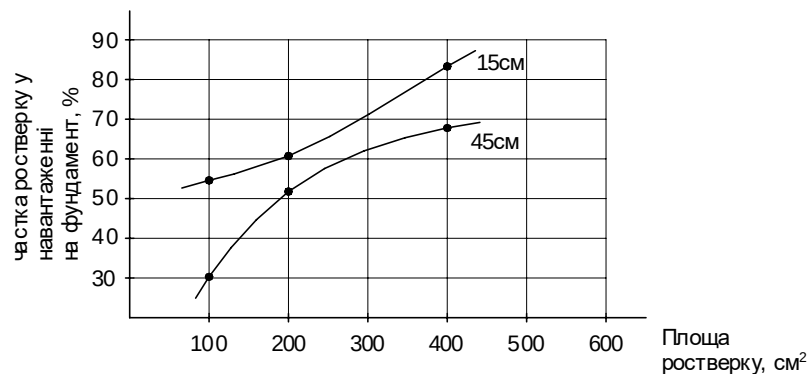


Рис. 12 – Графіки залежності частки ростверку у несучій здатності фундаментів від довжини паль і площі ростверку при кількості паль в куці 4 шт.

З графіків рис. 5 - 7 можна бачити, що зменшення кількості паль у 1,8 – 2,25 рази при сталих розмірах ростверка призводить до зменшення несучої здатності пальового фундаменту лише у 1,1-1,3 рази для коротких паль і у 1,2-1,3 рази для довгих. Найкращий ефект спостерігається для куців з короткими палями.

Графіки рис. 8 показують, що за рахунок збільшення площі ростверка можна досягти при сталій кількості паль збільшення навантаження на куц у 1,7-2,4 раза (для коротких паль цей ефект більший).

Аналіз результатів моделювання (табл. 1 та рис. 5 – 7) показують більшу ефективність розміщення паль у комбінованому фундаменті по кутах олсьверка.

Частка ростверку у несучій здатності фундаменту зростає із зменшенням кількості і збільшенням кроку паль, а при сталій кількості паль частка ростверку суттєво зростає при збільшенні його площі (рис. 5 - 8). Для коротких паль у всіх випадках частка ростверку більша, ніж для довгих. Для довгих паль частка ростверку знаходиться у діапазоні 20-60%, а для коротких 40-85%.

Маючи навантаження на ростверк в групі і несучу здатність ростверку як фундаменту мілкового закладання, а також несучу здатність одиночної палі і середнє навантаження на палю в групі, можна проаналізувати ступінь реалізації несучої здатності окремих елементів пальового фундаменту.

Як бачимо з таблиці 1, із збільшенням кількості паль у групі при сталих розмірах ростверка гірше реалізують себе як палі, так і ростверк.

Палі краще реалізують себе при малих ростверках і малій кількості паль. Ступінь реалізації ростверка збільшується при збільшенні його площі і зменшенні кількості паль.

Аналіз результатів показує, що в випадку застосування комплексних пальових фундаментів з розрідженим розміщенням паль і збільшеною площею ростверку ефективність роботи фундаменту в цілому, а також окремих його елементів підвищується.

Таким чином з метою економії матеріалів можна зменшувати кількість паль в групі при збільшенні розмірів ростверку без втрати несучої здатності фундаменту.

Висновки

1. В випадку застосування комбінованих пальових фундаментів з розрідженим розміщенням паль і збільшеною площею ростверку ефективність роботи фундаменту в цілому, а також окремих його елементів підвищується.

2. Зменшення кількості паль у 1,8 – 2,25 рази при сталих розмірах ростверка призводить до зменшення несучої здатності пальового фундаменту лише у 1,1-1,3 рази для коротких паль і у 1,2-1,3 рази для довгих. Найкращий ефект спостерігається для куців з короткими палями. Це свідчить про більш ефективне використання паль при застосуванні комбінованого варіанта пальового фундаменту.

3. За рахунок збільшення площі ростверка можна досягти при сталій кількості паль збільшення навантаження на куц у 1,7-2,4 рази (для коротких паль цей ефект більший).

4. При незмінній кількості паль збільшення площі ростверка призводить до збільшення його частки у навантаженні на куц, досягаючи доволі великих значень 70-85%.

5. Аналіз результатів моделювання показує ефективність розміщення паль у комбінованому фундаменті по кутах ростверка.

6. При традиційному компактному розміщенні паль ступінь реалізації несучої здатності ростверку коливається в діапазоні 0,3-0,6, тоді як при розрідженому їх розміщенні в комбінованому фундаменті цей діапазон 0,55-0,85.

7. З метою економії матеріалів можна зменшувати кількість паль в групі при збільшенні розмірів ростверку без втрати несучої здатності фундаменту.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. ДБН В.2.1-10-2009. Основи та фундаменти споруд. Основні положення проектування зі зміною №1 та №2. [Чинний від 2012-07-01]. Київ : Мінрегіонбуд України, 2009. 161 с. (Об'єкти будівництва та промислова продукція будівельного призначення).

2. Шмундяк О. Ю., М. С. Барбалюк М. С., Маєвська І. В. Результати першого етапу дослідження роботи коротких і довгих паль у стовпчастих пальових фундаментах шляхом фізичного маломасштабного моделювання. Міжнародна науково-технічна конференція Енергоефективність в галузях економіки України (2025), Вінниця, 19.11.2025 – 21.11.2025. ВНТУ, 2025. 7 с. URL: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/egeu/egeu2025/paper/viewFile/26304/21692>.

3. Маєвська І. В., Блащук Н. В. Робота паль і ростверку у складі стовпчастих пальових фундаментів : монографія. Вінниця : ВНТУ, 2023. 182 с.

4. Маєвська І. В., Блащук Н. В., Кременська Ю. О. Особливості роботи пальових куців з коротких паль за даними числового моделювання. Основи та фундаменти: науково-технічний збірник. Вип.43. Київ : КНУБА, 2021. С.30-39.

5. Маєвська І. В. Попович М.М., Кремінська Ю. О. Різниця в роботі коротких і довгих паль у складі стовпчастого пальового фундаменту за результатами фізичного моделювання. „Сучасні технології, матеріали та конструкції в будівництві”, н/т збірник ВНТУ, Вінниця. 2022. №2(33). С. 108-118.

6. Маєвська І.В., Блащук Н.В., Шмундяк О.Ю. Ефективність використання ростверку підвищеної площі у складі стовпчастого пальового фундаменту. Основи та фундаменти: науково-технічний збірник. Вип.50. Київ : КНУБА, 2025. С.123-138.

Шмундяк Олександр Юрійович - аспірант, факультет будівництва цивільної та екологічної інженерії, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: shmund@ukr.net.

Кордецький Роман Олександрович - студент гр. Б-25м, факультет будівництва цивільної та екологічної інженерії, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: romankovygh@gmail.com.

Маєвська Ірина Вікторівна — доцент кафедри "Будівництва, міського господарства та архітектури". Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: irina.mayevskaja@gmail.com.

Shmundyak Oleksandr YU — Faculty of Construction, Civil and Environmental Engineering, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, email : shmund@ukr.net

Kordetsky Roman Oleksandrovych - student of group B-25m, Faculty of Civil and Environmental Engineering, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: romankovygh@gmail.com

Maievskaya Irina Victorivna – associate professor of the Department of "Building, Urban and Architecture". Vinnitsa National Technical University, Vinnytsia, e-mail: irina.mayevskaja@gmail.com