

## ФІЗИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПАЛЬОВИХ КУЩІВ З КОРОТКИМИ ТА ДОВГИМИ ПАЛЯМИ

Вінницький національний технічний університет

### Анотація

В даній роботі приведені результати експериментальних досліджень ефективності використання коротких паль для нового будівництва. Послідовно описаний експеримент фізичного моделювання. Подано порівняння коротких паль із довгими у різних варіантах.

**Ключові слова:** експеримент, новий пальовий фундамент, короткі палі, довгі палі, ростверк.

### Abstract

In this work the results of experimental researches are resulted efficiency of using short piles for new construction. The experiment of physical modeling is consistently described. The comparison of short piles with long ones in different variants is given.

**Keywords:** experiment, new pile foundation, short piles, long piles, grillage.

### Вступ

Попередніми дослідженнями [1-3] встановлено, що ступінь реалізації несучої здатності палі у складі пальового фундаменту залежить від відносної довжини і кроку паль. Реалізація несучої здатності паль у складі фундаменту підвищується із збільшенням кроку паль та із збільшенням їх відносної довжини. При відносній довжині паль ( $l/d$ ) менше 15 їх розміри сумірні з розмірами ростверків в плані і такі пальові фундаменти пропонується розглядати як єдиний ґрунто-пальовий масив. Як такий ґрунто-пальовий масив можна розглядати умовний фундамент мілкого закладання, в який перетворюється пальовий фундамент при визначенні осідання [4]. При підтвердженні цієї гіпотези можна було б зменшувати кількість паль в межах габаритів ростверку без суттєвої втрати несучої здатності куща.

У цій роботі поставлена задача на підставі фізичного моделювання дослідити характер зміни роботи пальового фундаменту і його елементів при зміні кількості паль в кущовому ростверку, коли розмір умовного фундаменту залишається незмінним. Передбачається відслідкувати вплив на ці зміни довжини паль.

### Виклад основного матеріалу дослідження

#### Програма та устаткування для проведення фізичного моделювання

Для того щоб побачити якісну картину сумісної роботи забивних паль і ростверку в складі нового пальового фундаменту було проведено фізичне маломасштабне моделювання в лабораторних умовах.

Для моделювання натурних коротких і довгих паль довжиною 3 м та 6 м, поперечним перерізом 300х300 мм, виготовлено дерев'яні моделі довжиною 200 мм і 400 мм з поперечним перерізом 20х20 мм (масштаб моделювання 1:15). Товщина моделі плити ростверку прийнята 50 мм, розміри в плані 200х200 мм (рис. 1).



Рис. 1 – Модель ростверку 200х200 мм

При випробуванні пального фундаменту використовувався лабораторний лоток розміром 1800×1200×1000 мм (рис. 2). В якості ґрунту використовувався пісок середньої крупності із заданою щільністю та вологістю. Врахувавши геометричні розміри лотка з піском та обмежені можливості упорної системи прийнято масштаб фізичного моделювання 1:15.



Рис. 2 - Лоток з ґрунтовою основою під фундамент

Для аналізу відмінностей поведінки пального фундаменту виконувались три види дослідів (табл. 1). Два види дослідів з найбільшою можливою кількістю паль (типове рішення) та зменшеною кількістю паль в межах однакового зовнішнього контуру, які проводяться двічі при довжині паль у ростверку 200 мм та 400 мм, а також дослід для плити ростверку без паль з різною глибиною закладання. У досліді №2 варіювались три схеми розміщення паль у ростверку. В таблиці 1 наведено програму модельних випробувань. Варіант розміщення плити ростверку без паль на глибині 200 мм моделював умовний фундамент мілкого закладання для пального фундаменту з довжиною паль 200 мм.

При проведенні досліджень передбачалось визначення зусиль у палях куща за допомогою тензометричних датчиків, закріплених на наголовниках паль, виконаних з відрізків квадратної труби (рис. 3). Для визначення зусилля в кожній palі пального фундаменту був застосований прилад ИДЦ-1 (вимірювач деформацій числовий).

Перед встановленням тензометричних наголовників у модель пального фундаменту було здійснено їх тарування за допомогою спеціального навантажувального пристрою і контрольного динамометра (рис. 4).



Рис. 3 – Наголовники із тензометричними датчиками

Таблиця 1 – Програма фізичного моделювання

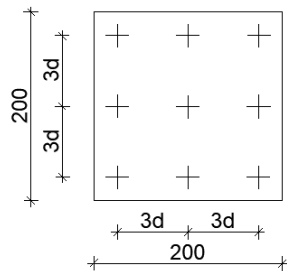
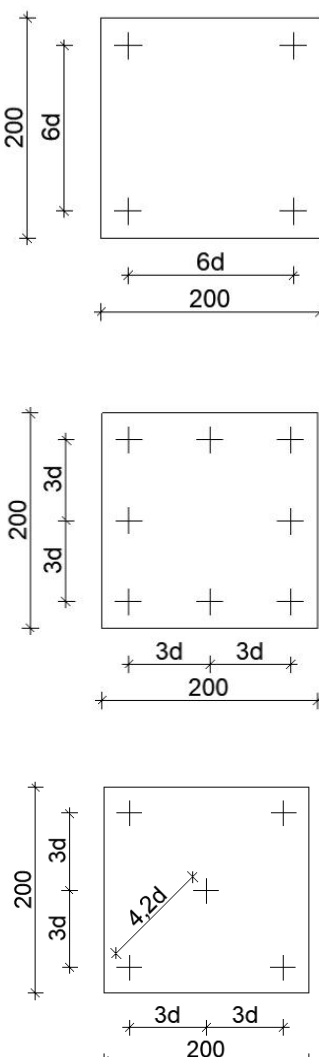
Група дослідів	Довжина та поперечний розмір паль	Крок і кількість паль
1	$L = 0,2 \text{ м}, d = 0,02 \text{ м}$	
2	$L = 0,4 \text{ м}, d = 0,02 \text{ м}$	
3	Плита ростверку без паль з розмірами у плані 200x200 мм, висотою 50 мм, глибина закладання 0 та 200 мм	-



Рис. 4 – Пристрій для тарування датчиків

Палі в ґрунтову основу вдавлювались за допомогою важільної системи (рис.5).



Рис. 5 – Важільна система

На вдавнені палі у ростверк ставились наголовники із тензометричними датчиками, які фіксувались металевою пластиною. Розміщення наголовників у різних варіантах показано на рис. 6.

На ростверк навантаження передавалось за допомогою домкрату, а для виміру зусилля використовувався динамометр. Навантаження, на яке розрахований домкрат і динамометр становить до 5 т.

Для виміру осідання пального фундаменту використовувались два прогиноміри, встановлені на незалежній упорній системі, по праву і ліву сторони основної упорної системи. Система в зборі наведена на рис. 7.

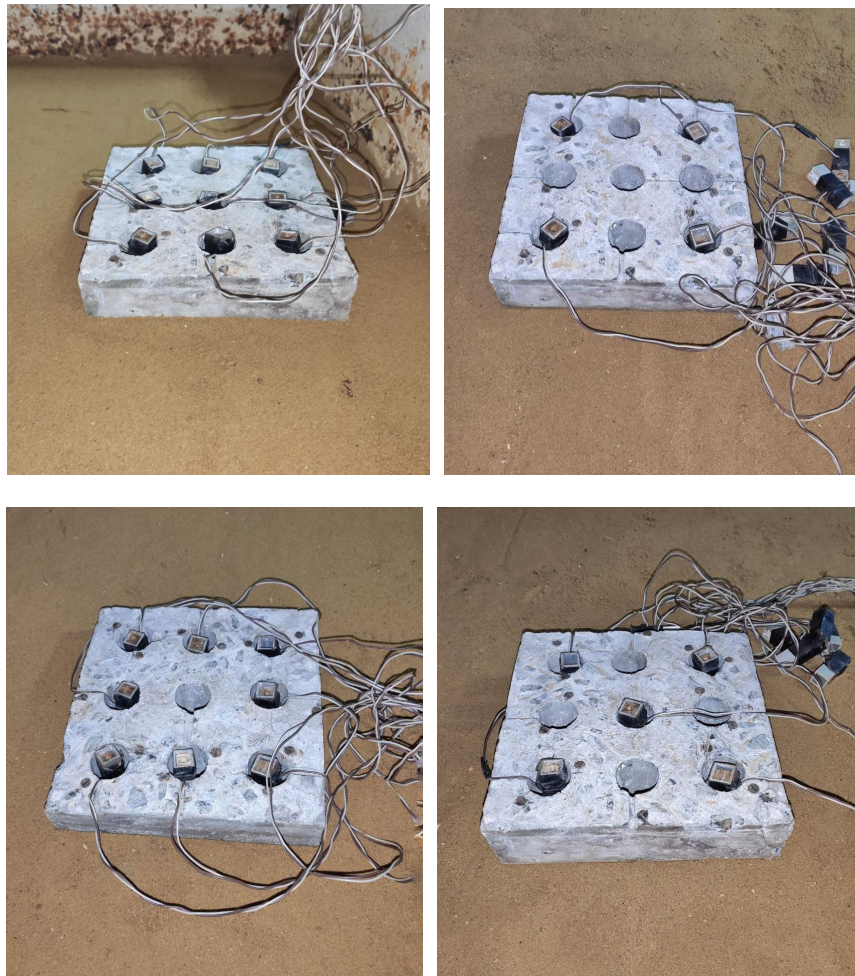


Рис. 6 – Розміщення тензометричних датчиків у ростверку



Рис. 7 – Модель пального фундаменту перед випробуванням

Заплановане також проведення випробувань одиночних палів довжиною 200 мм та 400 мм та плити ростверку без палів на поверхні ґрунтового масиву (рис. 8) і у варіанті умовного фундаменту (рис. 9). Навантаження одиночних палів здійснювалось за допомогою спеціального важеля, що

шарнірно кріпиться до стінки лотка. В залежності від місця розміщення палі в лотку співвідношення плечей важеля становить: для палі довжиною 200 мм -  $150/33=4,54$ ; для палі довжиною 400 мм -  $150/35=4,28$ . Модель випробування одиночної палі зображена на рис. 10.



Рис. 8 – Модель випробування плити ростверку



Рис. 9 – Модель випробування плити ростверку у варіанті умовного фундаменту



Рис. 10 – Модель випробування одиночної палі в лотку

### Результати фізичного моделювання роботи стовпчастого пальового фундаменту

В результаті проведення експерименту за розробленою програмою дослідження були одержані графіки залежності осідання – навантаження куца в цілому та графіки залежності сумарної несучої здатності паль від його осідання. Також були одержані графіки осідання – навантаження за результатами випробування одиночних паль різної довжини, графік осідання – навантаження при випробуванні плити ростверку розміром 200x200 мм як штампа без паль та графік осідання – навантаження при випробуванні плити ростверку у варіанті умовного фундаменту.

На рис. 11, 12 наведені графіки осідання – навантаження для куців з короткими (200 мм) та довгими (400 мм) палями. На графіку рис. 11 наведена також така залежність для фундаменту мілкого закладання глибиною 200 мм, що моделює умовний фундамент мілкого закладання.

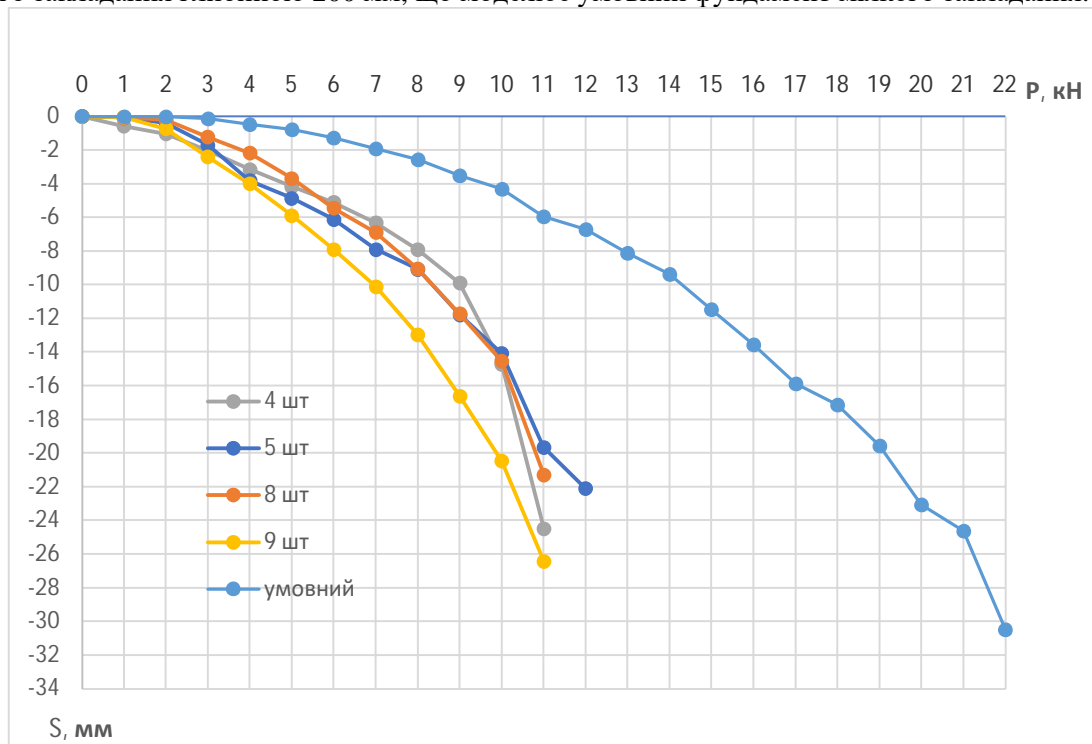


Рис. 11 – Графіки залежності навантаження – осідання для куца паль довжиною 200 мм

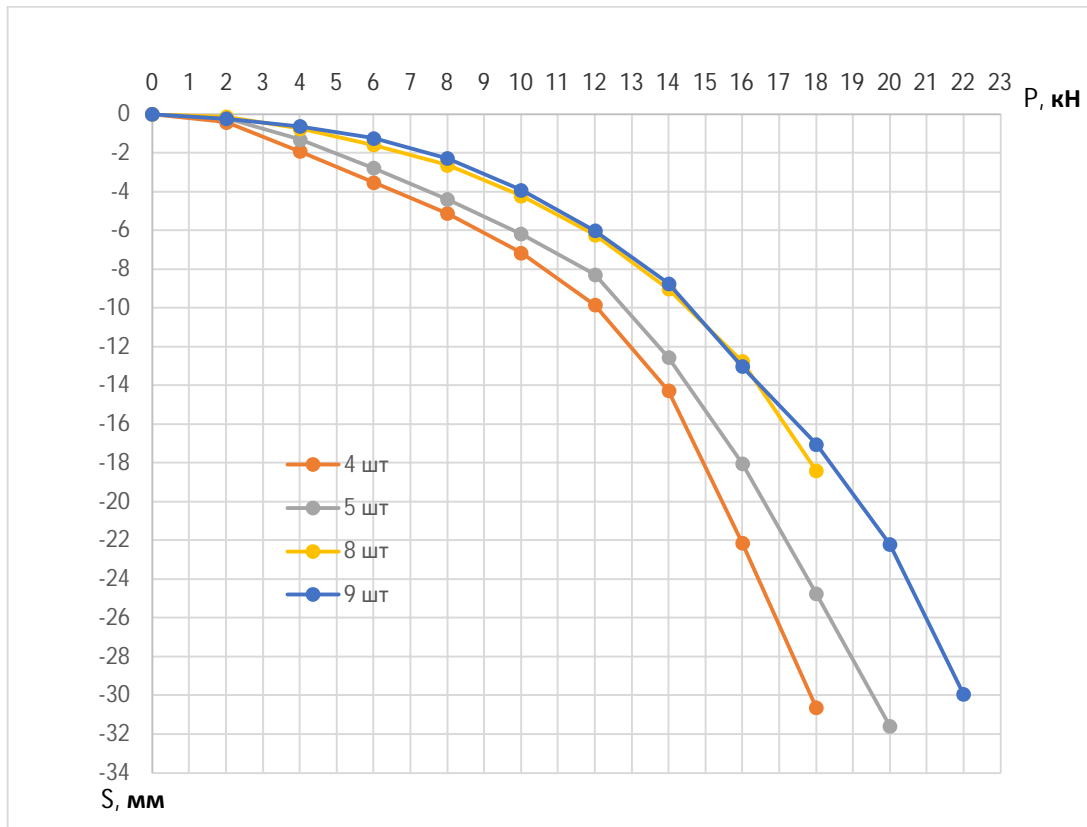


Рис. 12 – Графіки залежності навантаження – осідання для куща паль довжиною 400 мм

Бачимо, що зменшення кількості паль в межах єдиного зовнішнього контуру призводить до несуттєвого зменшення несучої здатності куща. Для паль довжиною 200 мм (співвідношення довжини до поперечного перерізу 10) зменшення несучої здатності не спостерігається (спостерігається навіть збільшення), а для паль довжиною 400 мм (співвідношення довжини до поперечного перерізу 20) зменшення несучої здатності при осіданні 10 мм сягає від 0 до 40% для різної кількості паль.

Отже, при відносній довжині паль ( $l/d$ ) 15 і менше можна зменшувати кількість паль при сталих габаритах ростверку без втрати несучої здатності.

Порівняння пальового фундаменту з умовним фундаментом мілкового закладання показало, що така заміна не дає адекватних результатів ні за деформаціями, ні за несучою здатністю.

На рис. 13 наведені такі графіки для одиночних паль, на рис. 14 – для плити ростверку розмірами 200x200 мм як штамп без паль.

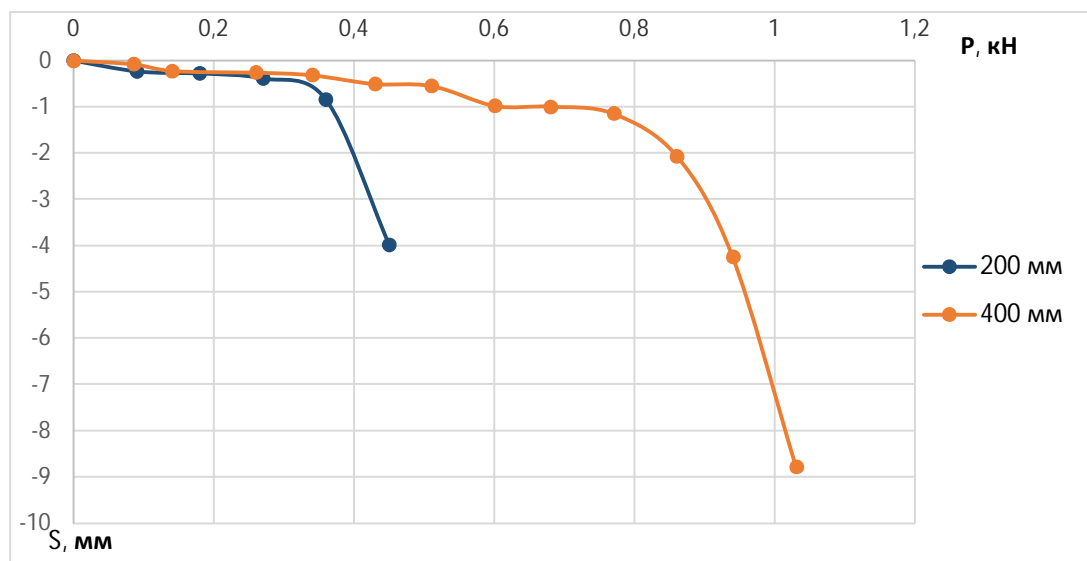


Рис. 13 – Графіки залежності навантаження – осідання для паль довжиною 200 мм та 400 мм



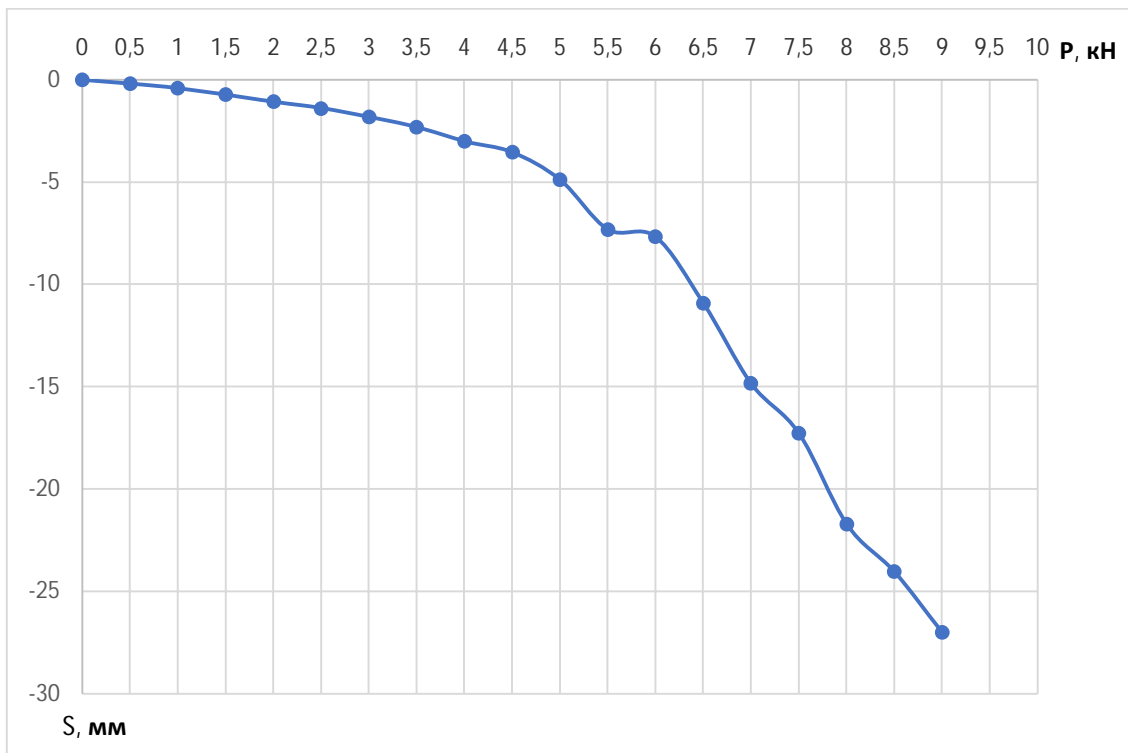


Рис. 14 – Графік залежності навантаження – осідання для плити ростверку розмірами 200x200 мм як штамп без паль

Частка навантаження, яке сприймають палі куща, визначалась як сума зусиль в палях, замірених тензометричними датчиками, частка навантаження, яку сприймає ростверк, визначалась як різниця між навантаженням, переданим на кущ, та сумою зусиль в палях.

В таблиці 2 наведені результати випробувань при осіданні пальового фундаменту  $s = 10,0$  мм.

Таблиця 2 – Порівняння роботи пальового фундаменту з плитою ростверку 200x200 мм з роботою його окремих елементів при осіданні куща  $s = 10,0$  мм

Довжина паль, мм	Кількість паль в куці, шт	При роботі у складі фундаменту					При роботі кожного з елементів як окремого			
		Осереднене навантаження на палю фундаменту, кН	Сума зусиль в палях куща, кН	Навантаження, що сприймається ростверком, кН	Навантаження на куц, кН	Частка ростверку, %	Несуча здатність одиночної палі, кН	Сума зусиль в одиночних палях, кН	Навантаження, що сприймається плитою ростверку без паль, кН	Навантаження на куц, як сума окремих елементів кН
200	4	0,5	1,95	7,07	9,02	78	0,4	1,6	6,36	8,0
	5	0,51	2,55	5,8	8,35	70		2,0		8,36
	8	0,51	4,07	4,28	8,35	51		3,2		9,56
	9	0,3	2,58	4,37	6,95	63		3,6		10
400	4	1,15	4,58	7,42	12,0	62	0,86	3,44	6,36	9,8
	5	1,5	7,48	5,42	12,9	42		4,3		10,66
	8	1,21	9,66	4,84	14,5	33		6,88		13,24
	9	1,14	10,24	4,26	14,5	29		7,74		14,1

В таблиці 2 проаналізована можлива несуча здатність куща за двома теоретичними гіпотезами: як сума несучих здатностей одиночних паль без урахування плити ростверку (гіпотеза норм [4]) та як сума несучих здатностей одиночних паль та несучої здатності плити ростверку як фундаменту мілкового закладання без паль.

Бачимо, що обидві ці гіпотези не працюють. Неврахування роботи ростверку у складі фундаменту дає занижені значення навантажень на кущ, а врахування роботи ростверку без коригування на перерозподіл зусиль між елементами куща при кучному розміщенні паль призводить до завищення несучої здатності куща.

Таким чином, при оцінці несучої здатності куща через несучі здатності його окремих елементів потрібно виходити із ступеня реалізації цих несучих здатностей у складі куща.

На рис. 15 та 16 наведений характер зміни навантажень, що сприймають палі і ростверк у складі куща при зміні кількості паль.

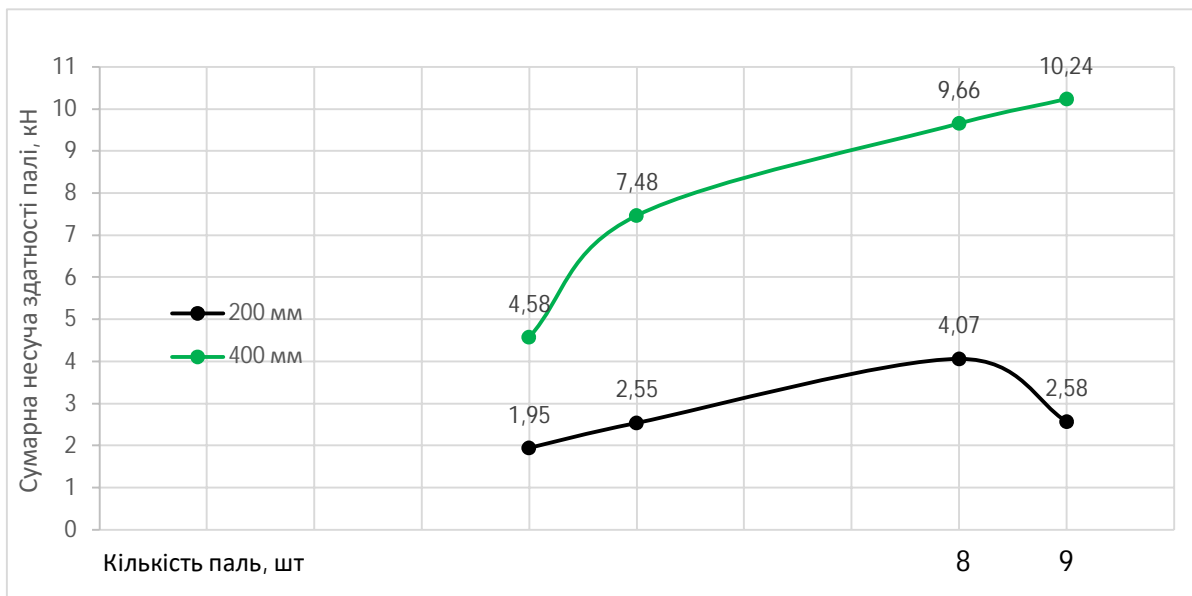


Рис. 15 – Графік залежності сумарної несучої здатності паль у складі фундаменту від кількості і довжини паль

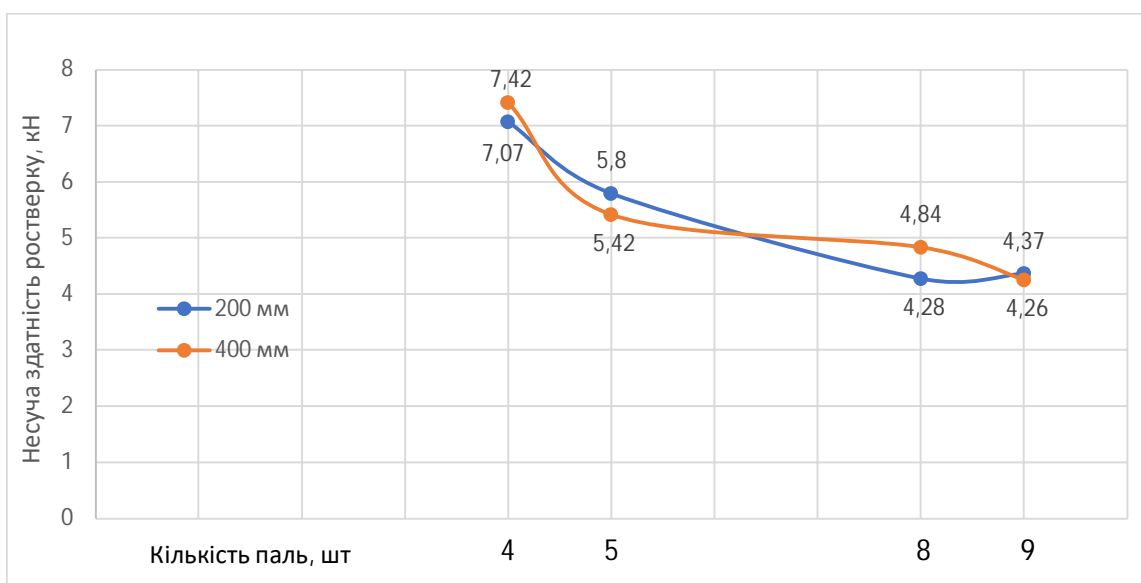


Рис. 16 – Графік залежності несучої здатності ростверку від кількості та довжини паль

Бачимо, що сумарна несуча здатність паль у складі групи зростає при збільшенні кількості паль, але не пропорційно збільшенню кількості, а несуча здатність ростверку зменшується.

Для кількісної оцінки характеру перерозподілу зусиль між елементами пальового фундаменту при обробці результатів досліджень аналізувались такі параметри:

- частка ростверку у навантаженні на пальовий фундамент;
- ступінь реалізації несучої здатності паль при роботі у групі;
- ступінь реалізації тиску під ростверком.

Ступінь реалізації несучої здатності паль визначався як відношення несучої здатності палі у групі до несучої здатності одиночної палі. Ступінь реалізації тиску під ростверком - як відношення частка навантаження, яку сприймає ростверк у складі фундаменту, до навантаження, яке сприймає плита ростверку, працюючи без паль.

У таблиці 3 та на рис. 17-19 наведені результати обробки параметрів фізичного експерименту.

Таблиця 3 – Ступінь реалізації несучої здатності паль та тиску під ростверком пальового фундаменту у піщаному ґрунті

Довжина паль, мм	Кількість паль в куці, шт.	Ступінь реалізації несучої здатності палі	Ступінь реалізації ростверку
200	4	1,22	1,11
	5	1,28	0,91
	8	1,27	0,67
	9	0,72	0,7
400	4	1,33	1,17
	5	1,74	0,85
	8	1,4	0,76
	9	1,32	0,67

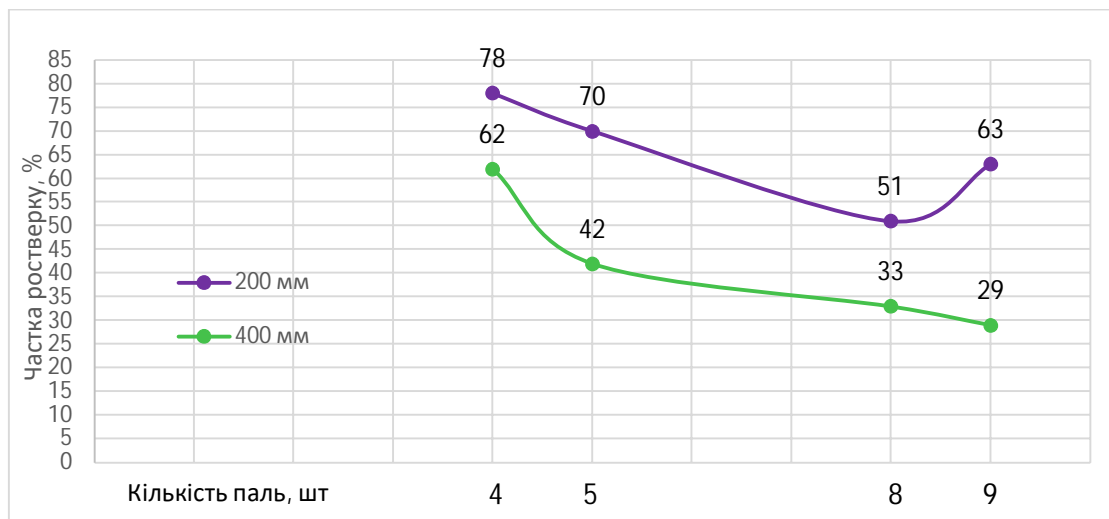


Рис. 17 – Графік залежності частки ростверку у навантаженні на пальовий фундамент від довжини та кількості паль

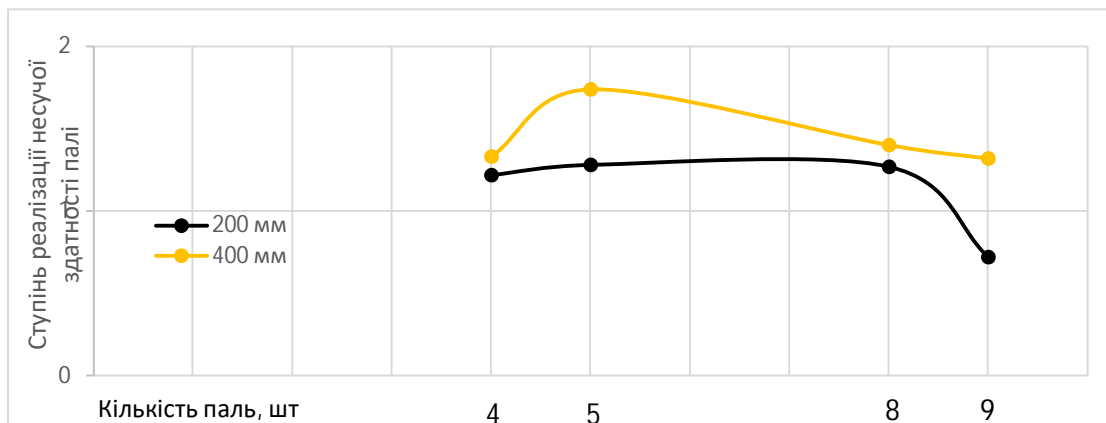


Рис. 18 – Залежність ступеню реалізації несучої здатності палі у складі фундаменту від кількості і довжини паль

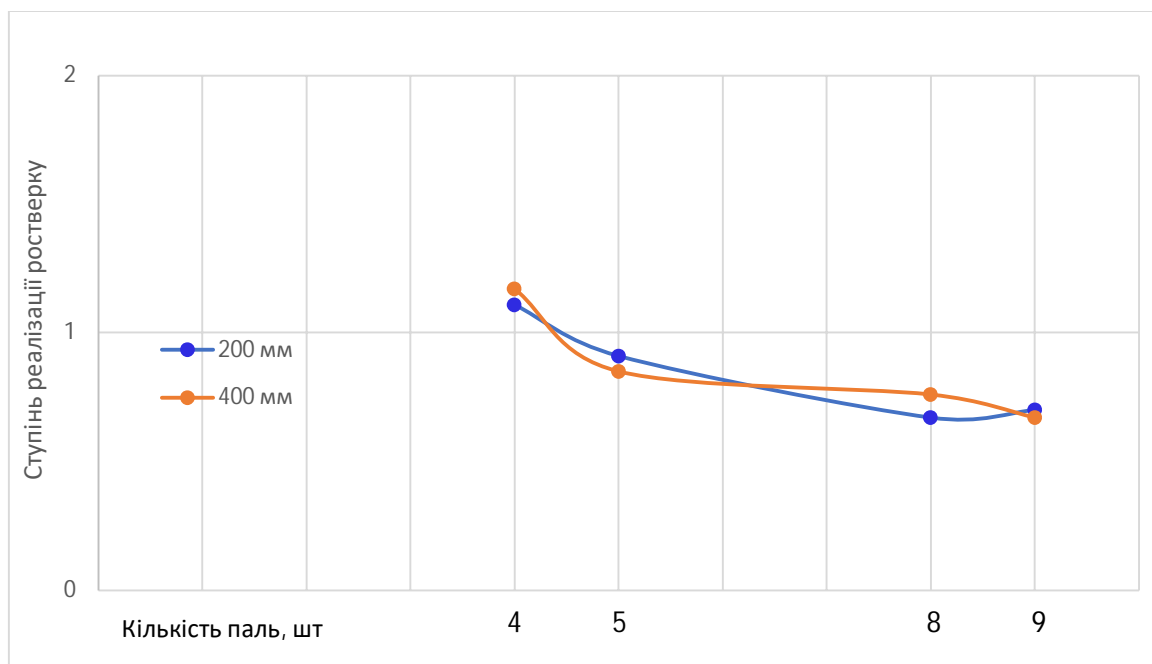


Рис. 19 – Графік залежності ступеня реалізації ростверку від довжини та кількості паль

Бачимо, що ступінь реалізації несучої здатності паль складає не менше 1,2 (виключенням є палі довжиною 200 мм при кількості 9 штук у кущі), а реалізація несучої здатності ростверка змінюється від 1,1 при малій кількості паль до 0,7 при найбільшій кількості паль незалежно від їх довжини.

Оскільки обидва варіанти довжини паль, що були прийняті в експериментах, можна відносити до категорії коротких (співвідношення довжини до поперечного перерізу 10 та 20), то можна зробити висновок, що при використанні коротких паль реалізація їх несучої здатності в групі перевищує одиницю (тобто вони працюють краще у кущі, ніж як одиночні), а потенційна можливість ростверку сприймати навантаження не використовується в повній мірі, але збільшується при зменшенні кількості паль.

### Висновки

1. Зменшення кількості паль в межах єдиного зовнішнього контуру призводить до несуттєвого зменшення несучої здатності куща. Для паль довжиною 200 мм (співвідношення довжини до поперечного перерізу 10) зменшення несучої здатності не спостерігається (спостерігається навіть збільшення), а для паль довжиною 400 мм (співвідношення довжини до поперечного перерізу 20) зменшення несучої здатності при осіданні 10 мм сягає від 0 до 40% для різної кількості паль.

Отже, при відносній довжині паль ( $l/d$ ) 15 і менше можна зменшувати кількість паль при сталих габаритах ростверку без втрати несучої здатності.

2. Неврахування роботи ростверку у складі фундаменту дає занижені значення навантажень на кущ, а врахування роботи ростверку без коригування на перерозподіл зусиль між елементами куща при кучному розміщенні паль призводить до завищення несучої здатності куща.

Таким чином, при оцінці несучої здатності куща через несучі здатності його окремих елементів потрібно виходити із ступеня реалізації цих несучих здатностей у складі куща.

3. Заміна пальового фундаменту на умовний фундамент мілкового закладання не дає адекватних результатів ні за деформаціями, ні за несучою здатністю.

4. Частка ростверку у навантаженні на пальовий фундамент зменшується із збільшенням кількості паль і з збільшенням їх довжини.

5. При використанні коротких паль реалізація їх несучої здатності в групі перевищує одиницю (тобто вони працюють краще у кущі, ніж як одиночні).

6. При використанні коротких паль потенційна можливість ростверку сприймати навантаження не використовується в повній мірі, але збільшується при зменшенні кількості паль.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Цимбал С.Й., Карцева С.Л. Методика розрахунку пальових фундаментів з урахуванням роботи ростверку. Основи і фундаменти: міжвідомчий. наук.-техн. зб., КНУБА, 2004. Вип. 28. с. 121-130.
2. Малишев О.М., Цимбал С.О., Маєвська І.В., Блащук Н.В. Сумісна робота паль і ростверку у стовпчастому пальовому фундаменті. *Молодь в науці*: тез. регіон. наук.-практ. інтернет-конф. студентів, аспірантів та молодих науковців ВНТУ, м. Вінниця, 2 січ. 2018. Вінниця, 2018. - URL: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/mn/mn2018/paper/viewFile/3694/31033103>.
3. Блащук Н.В., Маєвська І.В., Попович М.М. Перерозподіл зусиль між елементами стовпчастого пальового фундаменту. *Сучасні технології, матеріали та конструкції в будівництві*: зб. наук. пр. №1(24). Вінниця, 2018. С. 36-44.
4. ДБН В.2.1-10:2018. Основи та фундаменти споруд. Основні положення. [Чинний від 2019 – 01 - 01]. Вид. офіц. Київ, 2019. 42 с.

**Кремінська Юлія Олександрівна** — студентка групи Б-20м, факультет будівництва теплоенергетики та газопостачання, Вінницький національний технічний університет, Вінниця; e-mail: 1b16b.[kreminska@gmail.com](mailto:kreminska@gmail.com)

Науковий керівник: **Маєвська Ірина Вікторівна** — к. т. н, доцент, кафедра будівництва, міського господарства та архітектури, Вінницький національний технічний університет, Вінниця. e-mail: irina.mayevskaja@gmail.com [maevska@vntu.edu.ua](mailto:maevska@vntu.edu.ua)

**Kreminska Yuliia** — Department of Building Heating and Gas Supply, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia. E-mail: 1b16b.[kreminska@gmail.com](mailto:kreminska@gmail.com)

Supervisor: **Irina V. Mayevska** — Cand. Sc. (Eng), Assistant Professor of Construction, Municipal Economy and Architecture, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia. E-mail: irina.mayevskaja@gmail.com [maevska@vntu.edu.ua](mailto:maevska@vntu.edu.ua)