

## МЕХАНІКА ҐРУНТІВ ТА ФУНДАМЕНТИ

УДК 625.15

DOI 10.31649/2311-1429-2022-2-108-118

Ю. О. Крeмiнська

І. В. Маєвська

М. М. Попович

РІЗНИЦЯ В РОБОТІ КОРОТКИХ І ДОВГИХ ПАЛЬ У СКЛАДІ  
СТОВПЧАСТОГО ПАЛЬОВОГО ФУНДАМЕНТУ ЗА  
РЕЗУЛЬТАТАМИ ФІЗИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ

Вінницький національний технічний університет

*В роботі, на підставі фізичного моделювання на маломасштабних моделях, досліджена та проаналізована сумісна робота паль та низького ростверку у складі пальового фундаменту. Окремо розглядалася робота ростверку без паль та ростверку з різною кількістю паль двох типорозмірів. Контролювалося зусилля у палах куща з використанням тензометричного обладнання. Розглянуто характер змін частки ростверку та реалізації несучої здатності паль у фундаменті із зміною їх кількості та довжини у групі при сталих розмірах ростверку. Проаналізована можлива несуча здатність куща за двома теоретичними гіпотезами: як сума несучих здатностей одиночних паль без урахування плити ростверку та як сума несучих здатностей одиночних паль та несучої здатності плити ростверку як фундаменту мілко закладання без паль. 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. При оцінці несучої здатності куща через несучі здатності його окремих елементів потрібно виходити із ступеня реалізації цих несучих здатностей у складі куща.*

*Оцінено ефективність застосування коротких паль порівняно із довгими палями.*

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

## Вступ

При проектуванні пальового фундаменту виникає багато питань. Одне із них це різниця в роботі груп з коротких паль та груп з довгих паль. Дослідами встановлено [1-3], що навантаження, яке сприймає пальовий фундамент, частково передається на ростверк, а частково – на пальі і не завжди несуча здатність паль у складі пальового фундаменту відповідає несучій здатності одиночної пальі. Характер цього перерозподілу суттєво залежить від довжини пальі, особливо це стосується роботи груп з коротких паль. Чинні норми України не дозволяють врахувати такі особливості [4].

На сьогоднішній день питання створення достовірної розрахункової моделі ґрунтової основи, що забезпечує достатню відповідність між результатами розрахунку і роботою натурних паль – все ще одна із найважливіших проблем фундаментобудування.

Використання ресурсів несучої здатності паль є одним із передових способів досягнення економії при влаштуванні пальових фундаментів. Попередні дослідження показали, що при роботі куща з короткими палями група працює як суцільний ґрунто-пальовий масив. При підтвердженні цієї гіпотези можна було б зменшувати кількість паль в межах габаритів ростверку без суттєвої втрати несучої здатності куща.

## 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 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 300×300 мм, виготовлено дерев'яні моделі довжиною 200 мм і 400 мм з поперечним перерізом 20×20 мм (масштаб моделювання 1:15). Товщина моделі плити ростверку прийнята 50 мм, розміри в плані 200×200 мм (рис. 1).

При випробуванні пальового 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.



Рисунок 1 – Модель ростверку 200×200 мм



Рисунок 2 – Лоток з ґрунтовою основою під фундамент

Для аналізу відмінностей поведінки пальового фундаменту виконувались три групи дослідів (табл. 1). Перша група дослідів з найбільшою можливою кількістю паль (типове рішення) та друга група зі зменшеною кількістю паль в межах однакового зовнішнього контуру, які проводяться двічі при довжині паль у ростверку 200 мм та 400 мм, а також третя група дослідів для плити ростверку без паль з різною глибиною закладання. У другій групі дослідів 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 пальового фундаменту з довжиною паль 200 мм.

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 200×200 мм, висотою 50 мм, глибина закладання 0 та 200 мм	-

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

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



Рисунок 3 – Наголовники із тензометричними датчиками



Рисунок 4 – Пристрій для тарування датчиків

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



Рисунок 5 – Важільна система

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

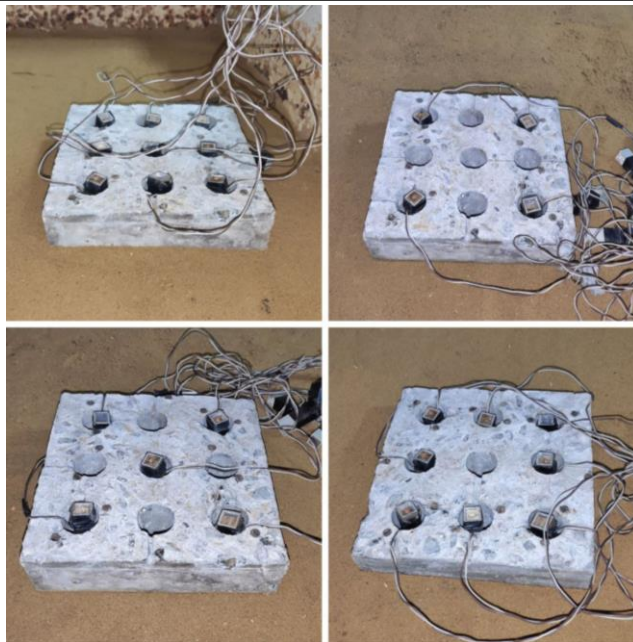


Рисунок 6 – Розміщення тензометричних датчиків у ростверку

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



Рисунок 7 – Модель пальового фундаменту перед випробуванням

Заплановане також проведення випробувань одиночних паль довжиною 200 мм та 400 мм та плити ростверку без паль на поверхні ґрунтового масиву (рис. 8) і у варіанті умовного фундаменту (рис. 9). Навантаження одиночних паль 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.



Рисунок 8 – Випробування плити ростверку



Рисунок 9 – Модель випробування плити ростверку у варіанті умовного фундаменту



Рисунок 10 – 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 куща 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 200×200 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 кущів 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.

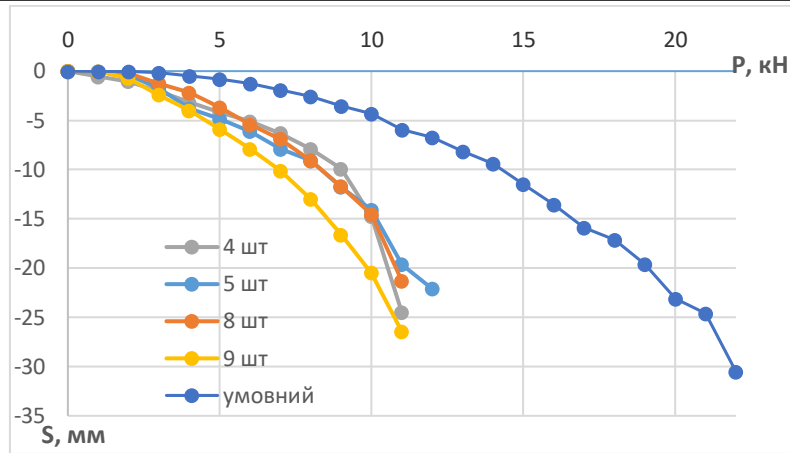


Рисунок 11 – Графіки залежності навантаження – осідання для куща паль довжиною 200 мм

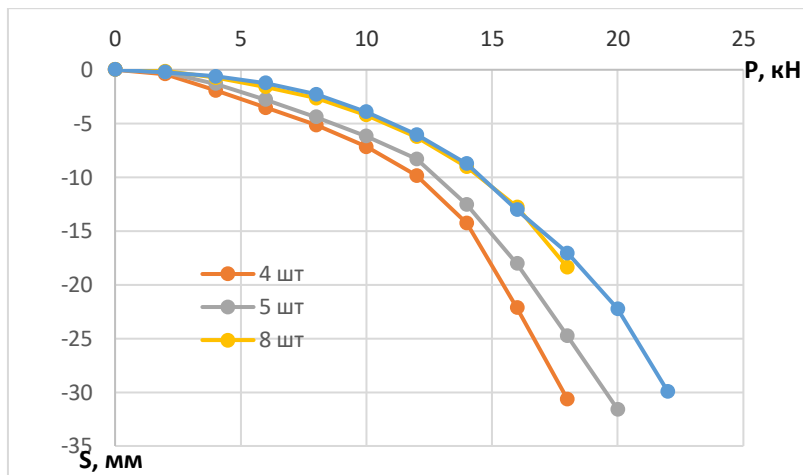


Рисунок 12 – Графіки залежності навантаження – осідання для куща паль довжиною 400 мм

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 пального фундаменту з умовним фундаментом мілкого 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 200×200 мм як штампу без паль.

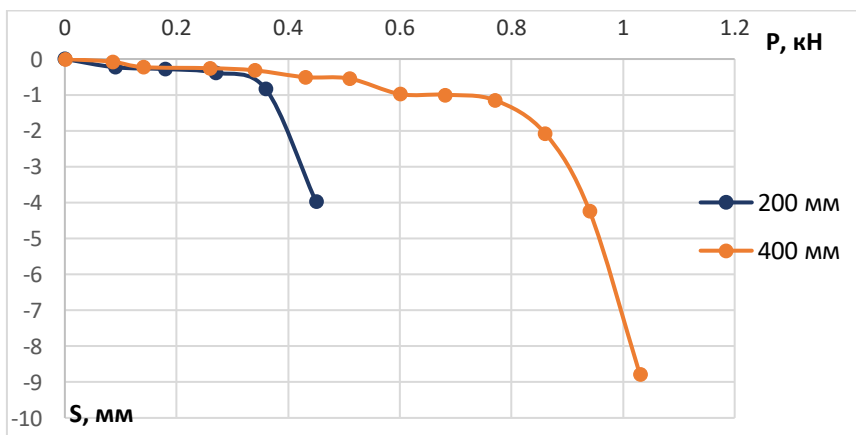


Рисунок 13 – Графіки залежності навантаження – осідання для паль довжиною 200 мм та 400 мм

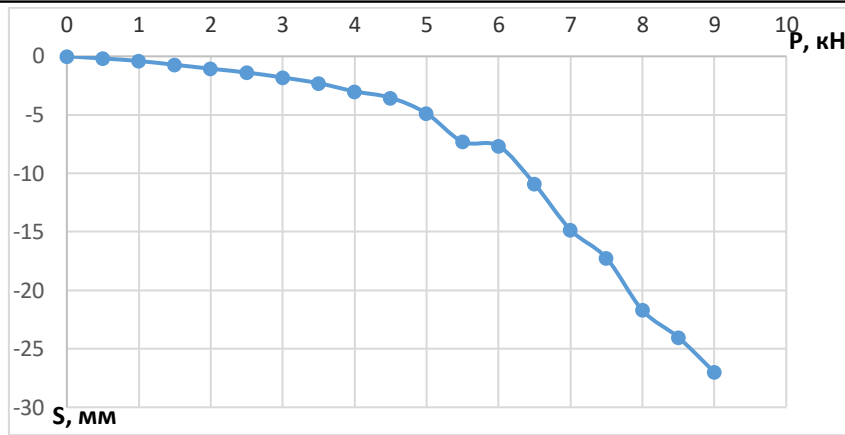


Рисунок 14 – Графік залежності навантаження – осідання для плити ростверку розмірами 200×200 мм як штампу без паль

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.

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.

Таблиця 2

**Порівняння роботи пальового фундаменту з плитою ростверку 200×200 мм з роботою його окремих елементів при осіданні куща  $S = 10,0$  мм**

Довжина паль, мм	Кількість паль в кущі, 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 кущ, кН	Частка ростверку, %	Несуча здатність одиночної палі, кН	Сума зусиль в одиночних палях, кН	Навантаження, що сприймається плитою ростверку без паль, кН	Навантаження на кущ, 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

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

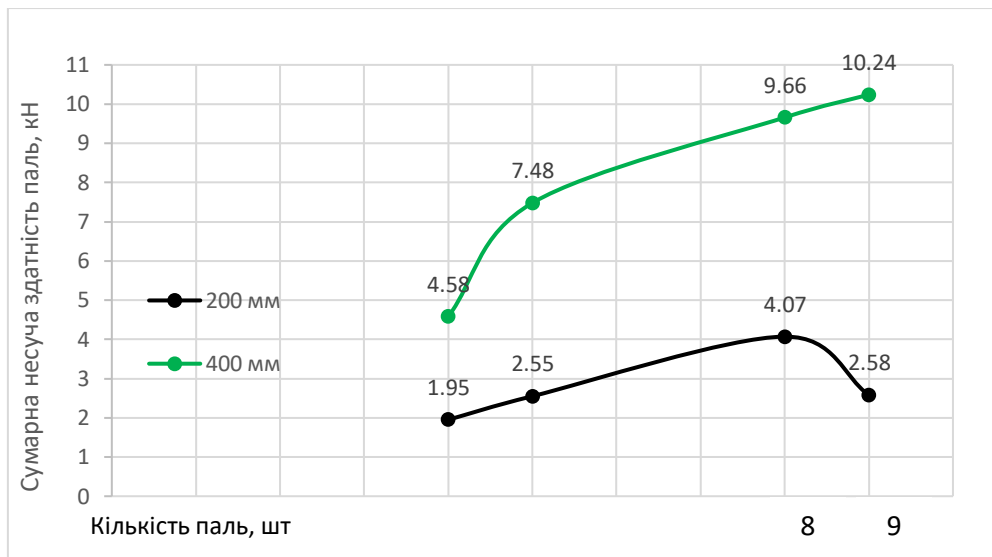


Рисунок 15 – Графік залежності сумарної несучої здатності палей у складі фундаменту від кількості і довжини палей

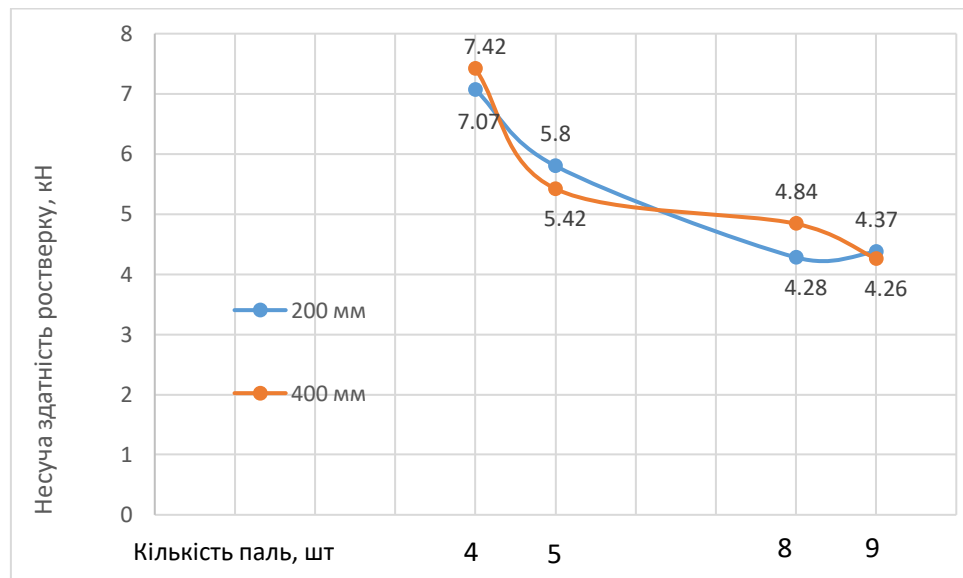


Рисунок 16 – Графік залежності несучої здатності ростверку від кількості та довжини палей

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

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

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

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

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



**Ступінь реалізації несучої здатності паль та тиску під ростверком пального 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

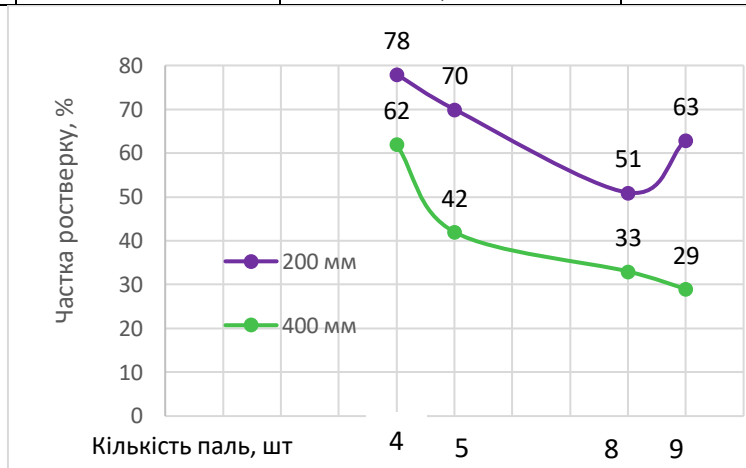


Рисунок 17 – Графік залежності частки ростверку у навантаженні на паливий фундамент від довжини та кількості паль

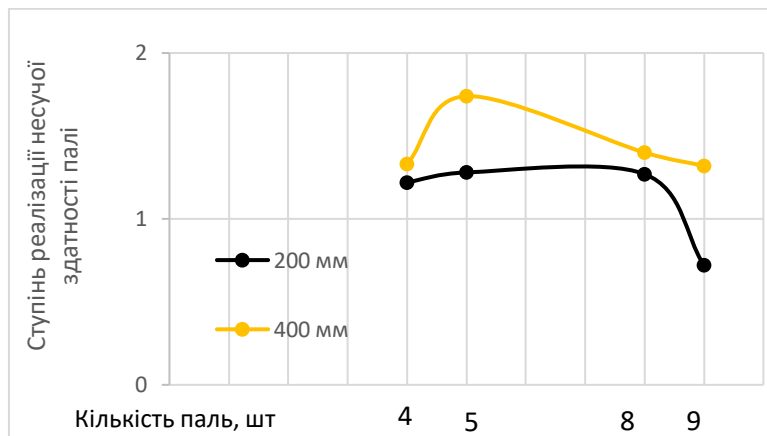


Рисунок 18 – Залежність ступеню реалізації несучої здатності палі у складі фундаменту від кількості і довжини паль

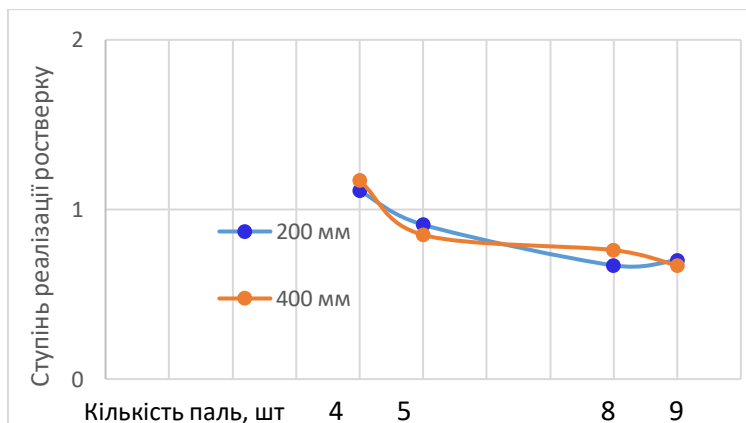


Рисунок 19 – Графік залежності ступеня реалізації ростверку від довжини та кількості паль

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 ростверку 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.

- 1) Заміна пального фундаменту на умовний фундамент мілкого закладання не дає адекватних результатів ні за деформаціями, ні за несучою здатністю.
- 2) Частка ростверку у навантаженні на паливий фундамент зменшується із збільшенням кількості паль і з збільшенням їх довжини.
- 3) При використанні коротких паль реалізація їх несучої здатності в групі перевищує одиницю (тобто вони працюють краще у кущі, ніж як одиночні).
- 4) При використанні коротких паль потенційна можливість ростверку сприймати навантаження не використовується в повній мірі, але збільшується при зменшенні кількості паль.
- 5) У випадку застосування коротких паль можна з метою економії матеріалів зменшити кількість паль в групі при збереженні розмірів ростверку з незначною втратою несучої здатності.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Цимбал С.Й., Карцева С.Л. Методика розрахунку паливих 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 паливому 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/3694/3103>.
3. Блащук Н.В., Маєвська І.В., Попович М.М. Перерозподіл зусиль між елементами стовпчастого пального 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.

### REFERENCES

5. Tsymbal S.Y., Kartseva S.L. Metodyka rozrakhunku pal'ovykh fundamentiv z urakhuvannyam roboty rostverku. Osnovy i fundamenti: mizhvidomchyy. nauk.-tekhn. zb., KNUBA, 2004. Vyp. 28. s. 121-130.
6. Malyshev O.M., Tsymbal S.O., Mayevs'ka I.V., Blashchuk N.V. Sumisna robota pal' i rostverku u stovpchastomu pal'ovomu fundamenti. Molod' v nauksi: tez. rehion. nauk.-prakt. internet-konf. studentiv, aspirantiv ta molodykh naukovtsiv VNTU, m. Vinnytsya, 2 sich. 2018. Vinnytsya, 2018. - URL: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/mn/mn2018/paper/viewFile/3694/3103>.
7. Blashchuk N.V., Mayevs'ka I.V., Popovych M.M. Pererозpodil zusyly' mizh elementamy stovpchastoho pal'ovoho fundamentu. Suchasni tekhnolohiyi, materialy ta konstruktsiyi v budivnytstvi: zb. nauk. pr. №1(24). Vinnytsya, 2018. S. 36-44.
8. DBN V.2.1-10:2018. Osnovy ta fundamenti sporud. Osnovni polozhennya. [Chynnyy vid 2019 – 01 - 01]. Vyd. ofits. Kyiv, 2019. 42 s.

**Маєвська Ірина Вікторівна**, канд. техн. наук, доцент кафедри будівництва, міського господарства та архітектури, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця. ORCID: 0000-0001-5999-6824, e-mail: irina.mayevskaja@gmail.com.

**Попович Микола Миколайович** – к. т. н, доцент, кафедра будівництва, міського господарства та архітектури, Вінницький національний технічний університет, Вінниця. e-mail: popovih@vntu.edu.ua

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

**I. Mayevska  
M. Popovich  
Y. Kreminska**

## **THE DIFFERENCE IN THE OPERATION OF SHORT AND LONG PILES IN THE COMPOSITION OF A COLUMNAR PILE FOUNDATION ACCORDING TO THE RESULTS OF PHYSICAL MODELING**

Vinnitsia National Technical University

*In the work, on the basis of physical modeling on small-scale models, the joint operation of piles and a low grid as part of a pile foundation was investigated and analyzed. The operation of a grid without piles and a grid with different numbers of piles of two standard sizes was considered separately. The force in the piles of the bush was monitored using tensometric equipment. The nature of changes in the share of the grid and realization of the load-bearing capacity of piles in the foundation with changes in their number and length in the group with constant dimensions of the grid were considered. The possible load-bearing capacity of the bush was analyzed according to two theoretical hypotheses: as the sum of the load-bearing capacities of single piles without taking into account the grid plate and as the sum of the load-bearing capacities of single piles and the load-bearing capacity of the grid plate as a foundation for shallow laying without piles. Failure to take into account the work of the grid as part of the foundation gives underestimated values of the loads on the bush, and taking into account the work of the grid without adjusting for the redistribution of forces between the elements of the bush during pile placement leads to an overestimation of the load-bearing capacity of the bush. When evaluating the bearing capacity of a bush through the bearing capacity of its individual elements, it is necessary to proceed from the degree of realization of these bearing capacities in the composition of the bush.*

*The efficiency of using short piles compared to long piles was evaluated.*

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

**Irina Mayevska** – Cand. Sc. (Eng), Assistant Professor of Construction, Municipal Economy and Architecture, Vinnitsia National Technical University, Vinnitsia. E-mail: [maevska@vntu.edu.ua](mailto:maevska@vntu.edu.ua)

**Mykola Popovich** – Cand. Sc. (Eng), Assistant Professor of Construction, Municipal Economy and Architecture, Vinnitsia National Technical University, Vinnitsia. e-mail: [popovih@vntu.edu.ua](mailto:popovih@vntu.edu.ua)

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