

## Аналіз ефективності використання коротких паль у складі стовпчастого пальового фундаменту

Ірина МАЄВСЬКА<sup>1</sup>, Наталя БЛАЦУК<sup>2</sup>, Олександр ШМУНДЯК<sup>3</sup>

Вінницький національний технічний університет  
95, Хмельницьке шосе, Вінниця, Україна, 21000,

<sup>1</sup> irina.mayevskaja@gmail.com, orcid.org/0000-0001-5999-6824

<sup>2</sup> blaschuk@vntu.edu.ua, orcid.org/0000-0001-9764-0271

<sup>3</sup> shmund@ukr.net, https://orcid.org/0009-0005-4025-873X

DOI: 10.32347/0475-1132.48.2024.48-60

**Анотація.** Досліджена реалізація роботи ростверку і паль у складі стовпчастого пальового фундаменту в залежності від довжини паль, способу влаштування паль, відстані між палями і виду ґрунтів при сталій кількості паль. Аналізувались ступінь реалізації несучої здатності паль і ступінь реалізації роботи ростверку у складі пальового фундаменту. Для розв'язання поставлених у даній роботі завдань було виконане математичне моделювання методом скінчених елементів сумісної роботи елементів пальового фундаменту з ґрунтовою основою та окремо роботи палі і ростверку як фундаменту мілкого закладання у програмному комплексі «Plaxis 3D Foundation».

Встановлено, що реалізація несучої здатності паль у складі фундаменту з великою відстанню між палями значно краща. Довжина паль також впливає на ступінь їх реалізації. При збільшенні довжини несуча здатність паль реалізується менше. Найбільша реалізація несучої здатності паль у складі фундаменту спостерігається для коротких паль. Реалізація тиску під подошвою ростверку із збільшенням кроку паль також покращується, реалізація несучої здатності ростверку складає від 8 до 50%, що дозволяє підвищити несучу здатність фундаменту. Для піщаних і глинистих ґрунтів характер перерозподілу зусиль між елементами стовпчастого пальового фундаменту аналогічний. Для фундаментів з бурових паль ступінь реалізації тиску під подошвою ростверку, як і ступінь реалізації несучої здатності паль вища, ніж для фундаментів з забивних паль. Керівним фактором є довжина паль.

Досліджена економічна ефективність переходу в однорідних ґрунтах від куща з довгих



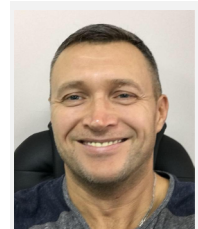
**Ірина Масвська**

доцент кафедри будівництва, міського господарства та архітектури  
к.т.н., доц.



**Наталя Блацук**

доцент кафедри будівництва, міського господарства та архітектури  
к.т.н., доц.



**Олександр Шмундяк**

аспірант кафедри будівництва, міського господарства та архітектури

паль при стандартному мінімальному кроці до куща з коротких паль при збільшеній відстані між палями. За рахунок врахування спільної роботи паль і ростверку кущ з коротких паль з більшими габаритами ростверку забезпечує таку ж несучу здатність, як кущ з довгих паль з компактним ростверком.

Не дивлячись на значне зростання об'єму бетону ростверку і кількості арматури при збільшенні кроку паль економія коштів на вартості паль забезпечує економічний ефект від використання кущів з коротких паль з широкими ростверками до 35%.

**Ключові слова.** Стовпчастий пальовий фундамент, ростверк, забивна паля, бурова па-

ля, перерозподіл навантажень, ступінь реалізації несучої здатності, кошторисна вартість, економічна доцільність.

## ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ ТА АНАЛІЗ ПОПЕРЕДНІХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Особливості поведінки паль і ростверка у складі групи досліджувалась значною кількістю авторів (Голубков Б. М., Бартоломей А. О., Дорошкевич Н. М., Знаменський В. В., Девальтовський Є. Е., Сернов В. О., Burland J. B. [1], Hanna T. H. [2], Whitaker T. [3], Katzenbach R. [4], Poulos H. G. [5], Randolph M. F. [6]). В результаті встановлено, що некоректно призначати параметри фундаментів з групи паль на підставі параметрів одиночних паль, потрібно враховувати взаємодію всіх елементів пального фундаменту.

Більшість авторів відзначають, що низький ростверк включається в роботу по мірі ущільнення шарів ґрунту під подошвою ростверку, через подошву ростверку може передаватись на ґрунтову основу значна частка (10-50%) навантаження на фундамент. Ґрунт у верхній частині міжпального простору переміщується відносно паль, завдяки чому опір тертя верхньої частини поверхні паль зменшується.

Дослідження роботи палих груп продовжується як в Україні, так і за кордоном. Так, у роботах [7 – 9] на підставі фізичного та математичного моделювання роботи палих груп з різною кількістю паль в межах ростверку сталих розмірів зроблені такі висновки:

- відсоток навантаження, яке сприймає ростверк, збільшується по мірі зменшення довжини і кількості паль;
- із зменшенням довжини паль відсоток навантаження, що сприймається ростверком, збільшується до 38%;
- із зменшенням кількості паль відсоток навантаження, що сприймається ростверком, збільшується до 55%;
- збільшення кількості паль призводить до збільшення навантаження, яке сприймає фундамент, але у значно меншій степені, ніж можна було очікувати.

Над питаннями розподілу зусиль між елементами пального фундаменту працюють науковці кафедри БМГА ВНТУ [10 – 15]. але є ще багато аспектів, які залишається поза увагою. Зокрема чи є економічно доцільним використання коротких паль у порівнянні з довгими і за яких умов використання коротких паль може дати економічний ефект.

Оскільки проектування фундаментів у вигляді груп паль за нормами [16] здійснюється на підставі визначення граничного опору одиночної палі, то при проектуванні за нормами короткі палі будуть поступатись довгим (за умови збереження їх кількості).

Врахування спільної роботи всіх елементів пального фундаменту може підвищити ефективність і надійність проектних рішень з використанням коротких паль, тому тема дослідження є актуальною і має практичне значення.

## МЕТА РОБОТИ

Метою роботи є дослідження ефективності використання коротких паль у складі стовпчастих палих фундаментів у порівнянні з довгими.

Була поставлена задача виявити вплив довжини паль та відстані між палями на перерозподіл зусиль між елементами стовпчастих палих фундаментів та ефективність роботи у складі фундаменту.

Крім геометричних параметрів паль досліджувався вплив таких параметрів: вид паль (влаштовані без виймання та з вийманням ґрунту), фізико-механічні характеристики основи на ефективність роботи елементів пального фундаменту.

Досліджувалась економічна ефективність переходу в однорідних ґрунтах від куца з довгих паль при стандартному мінімальному кроці до куца з коротких паль при збільшеній відстані між палями.

## ОСНОВНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ

Оскільки фізичне моделювання і тим більше польові дослідження палих фун-

даментів є громіздкими і дорого вартісними, а в випадку фізичного моделювання до того ж може використовуватись лише піщана основа, то у світовій практиці пропонуються різноманітні розрахункові методи для кількісного аналізу роботи пальових фундаментів з низькими та високими ростверками [17].

Дослідження проводилось на базі математичного моделювання у програмному комплексі Plaxis 3D, який розроблений на основі методів скінченних елементів та умов просторової задачі. Доцільність використання програмного комплексу Plaxis 3D для розв'язання різноманітних задач геотехніки підтверджується багатьма авторами.

*Програма чисельного моделювання роботи систем стовпчастий ростверк – палі – ґрунт*

Моделі експерименти розділено на такі підгрупи:

I – моделювання сумісної роботи ростверку і паль на однорідній піщаній основі при довжинах паль 3 м, 6 м, 9 м, 12 м та при осьовій відстані між ними 3d, 5d, 7d,

товщина ростверку 500 мм, програму моделювання наведено в табл. 1. Характеристики піщаного ґрунту: пісок дрібний,  $\gamma = 18,6 \text{ кН/м}^3$ ,  $e = 0,67$ ,  $c = 2 \text{ кПа}$ ,  $\varphi = 32^\circ$ ,  $E = 28 \text{ МПа}$ ;

II – моделювання сумісної роботи ростверку і паль на однорідній глинистій основі при довжинах паль 3 м, 6 м, 9 м, 12 м та при осьовій відстані між ними 3d, 5d, 7d, товщина ростверку 500 мм, програму моделювання наведено в табл. 1. Характеристики глинистого ґрунту: суглинок,  $\gamma = 18,7 \text{ кН/м}^3$ ,  $c = 23 \text{ кПа}$ ,  $\varphi = 21^\circ$ ,  $\nu = 0,35$ ,  $E = 14 \text{ МПа}$ ;

III – моделювання роботи одиночних паль різної довжини в різних ґрунтових умовах підгруп I – II;

IV – моделювання роботи ростверку як фундаменту мілкого закладання в різних ґрунтових умовах підгруп I – II.

У першій серії моделювались забивні палі, у другій серії – бурові палі.

Таблиця 1 – Програма моделювання сумісної роботи ростверку і паль стовпчастого пальового фундаменту для підгруп I – II

Table 1 - The program for simulating the joint operation of the grid and the piles of the columnar pile foundation for subgroups I - II

Група дослідів	Довжина та поперечний розмір паль	Крок і кількість паль	Розміри ростверка
1	L = 3 м, d = 0,3 м	3d, 9 шт.	2,4×2,4 м
2		5d, 9 шт.	3,6×3,6 м
3		7d, 9 шт.	4,8×4,8 м
4	L = 6 м, d = 0,3 м	3d, 9 шт.	2,4×2,4 м
5		5d, 9 шт.	3,6×3,6 м
6		7d, 9 шт.	4,8×4,8 м
7	L = 9 м, d = 0,3 м	3d, 9 шт.	2,4×2,4 м
8		5d, 9 шт.	3,6×3,6 м
9		7d, 9 шт.	4,8×4,8 м
10	L = 12 м, d = 0,3 м	3d, 9 шт.	2,4×2,4 м
11		5d, 9 шт.	3,6×3,6 м
12		7d, 9 шт.	4,8×4,8 м

*Результати чисельного моделювання системи «ростверк – палі – основа»*

Величина навантаження на моделі збільшувалась до тих пір, поки деформації знаходились в межах допустимих значень (не менше 100 мм).

На рис. 1, 2 наведено варіанти розрахункових моделей стовпчастого пальового фундаменту та ґрунтового масиву.

На рис. 3 – 6 наведені графіки залежності несучої здатності стовпчастого пальового фундаменту в цілому від довжини паль. Одночасно на графіках показаний характер зростання суми несучих здатностей одиночних паль.

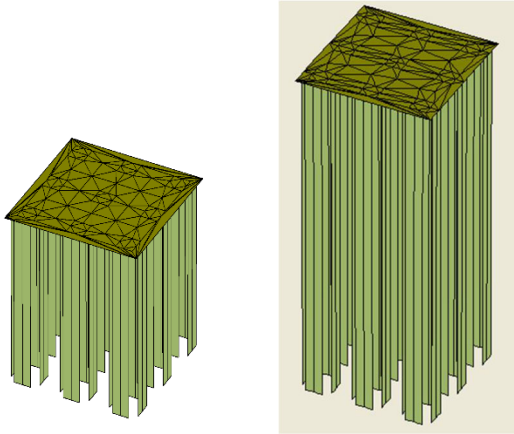


Рис. 1 – Розрахункові моделі стовпчастого пального фундаменту, палі довжиною 3 м та 9 м при кроці 3d  
 Fig. 1 – Calculation models of a columnar pile foundation, piles 3 m and 9 m long at a 3d step

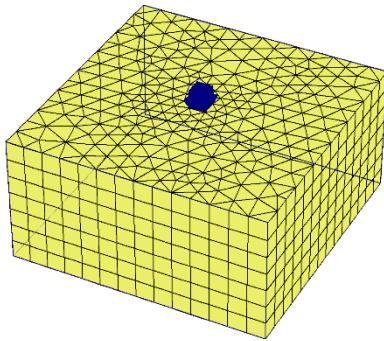


Рис. 2 – Розрахункова модель ґрунтового масиву  
 Fig. 2 - Calculation model of the soil mass

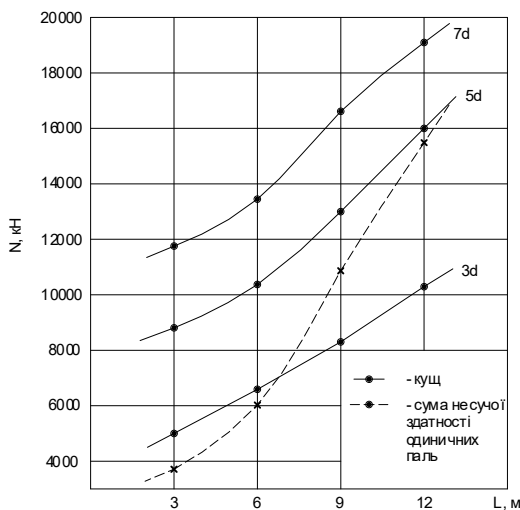


Рис. 3 – Графік залежності несучої здатності стовпчастого пального фундаменту від довжини палі (палі забивні, ґрунт – пісок)  
 Fig. 3 - Graph of the dependence of the bearing capacity of the columnar pile foundation on the length of the piles (driven piles, soil - sand)

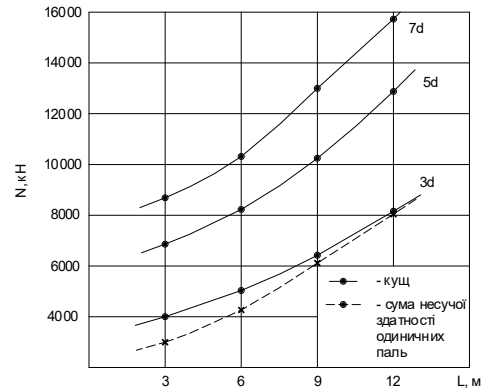


Рис. 4 – Графік залежності несучої здатності стовпчастого пального фундаменту від довжини палі (палі забивні, ґрунт – суглинок)  
 Fig. 4 – Graph of the dependence of the bearing capacity of the columnar pile foundation on the length of the piles (driven piles, soil - loam)

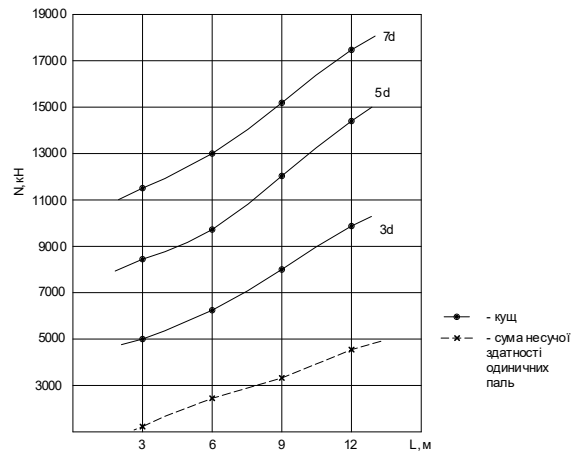


Рис. 5 – Графік залежності несучої здатності стовпчастого пального фундаменту від довжини палі (палі бурові, ґрунт – пісок)  
 Fig. 5 – The graph of the dependence of the bearing capacity of the columnar pile foundation on the length of the piles (drilled piles, soil - sand)

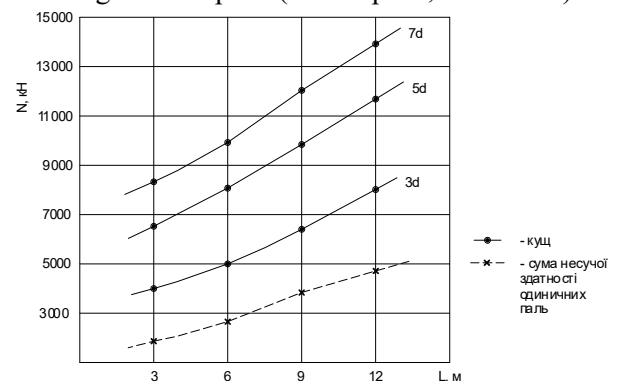


Рис. 6 – Графік залежності несучої здатності стовпчастого пального фундаменту від довжини палі (палі бурові, ґрунт – суглинок)  
 Fig. 6 – The graph of the dependence of the bearing capacity of the columnar pile foundation on the length of the piles (drilled piles, soil - loam)

Загальна несуча здатність збільшується при збільшенні довжини і кроку паль, що закономірно, але несуча здатність фундаменту з забивних паль перевищує суму несучих здатностей одиночних паль у глинистому ґрунті, а в піщаному при кроці 3d лише для коротких паль. При збільшенні кроку паль (і відповідно збільшенні площі ростверку) загальна несуча здатність фундаменту відповідно зростає.

Для бурових паль несуча здатність фундаменту перевищує суму несучих здатностей одиночних паль в будь-якому випадку і з збільшенням кроку паль це перевищення стає дуже суттєвим.

Можна відзначити також, що збільшення довжини палі у 4 рази дає збільшення несучої здатності фундаменту лише у 1,5 рази при кроці 7d і у 2 рази про кроці 3d. Отже, ефективність роботи коротких паль у складі фундаменту значно вища.

Аналіз графіків на рис. 3 – 6 показує, що фундамент з забивних паль довжиною 12 м при розмірах ростверку  $2,4 \times 2,4$  м (крок паль 3d) має таку ж несучу здатність, як фундамент з паль довжиною 6 м при розмірах ростверку  $3,6 \times 3,6$  м (крок паль 5d) і фундамент з паль довжиною 3 м при розмірах ростверку  $4,8 \times 4,8$  м (крок паль 7d). Слід відзначити, що графіки побудовані для значень несучої здатності при осіданні 100 мм.

Для фундаментів з бурових паль картина ще краще. Несуча здатність фундаменту з паль довжиною 3 м наближається до несучої здатності фундаменту з паль довжиною 12 м при розмірах ростверку  $2,4 \times 2,4$  м вже при розмірі ростверку  $3,6 \times 3,6$  м.

Таким чином можна значно скоротити довжину паль за рахунок збільшення габаритів ростверку.

Для кращого розуміння впливу окремих елементів пального фундаменту на його сумарну несучу здатність на графіках рис. 7 – 10 наведена залежність навантаження, що припадає на ростверк і палі у складі фундаменту від довжини і кроку паль. На рисунках показана також залежність сумарної несучої здатності одиночних паль від їх довжини. Значення навантажень на рост-

верк і палі на рис. 7 – 10 визначались для осідання 100 мм.

Бачимо, що навантаження, що припадає на ростверк, практично не залежить від довжини паль як для забивних, так і бурових паль і при різних видах ґрунту основи. При коротких палях ростверк забезпечує сприйняття значної частки навантаження на фундамент, а при довгих палях переважну частку навантаження беруть на себе палі.

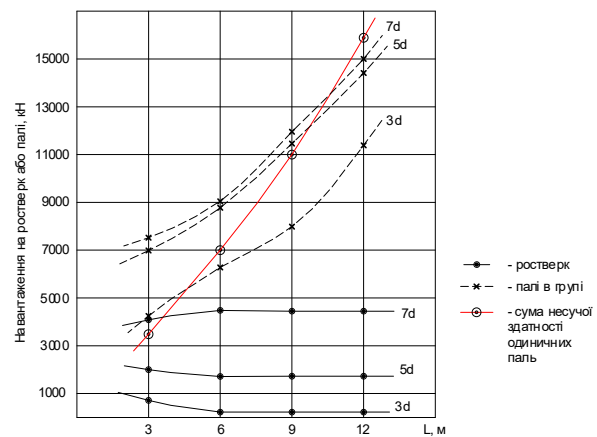


Рис. 7 – Залежність навантаження, що припадає на ростверк і палі у складі пального фундаменту від довжини і кроку паль (палі забивні, ґрунт піщаний)

Fig. 7 – Dependence of the load falling on the grid and piles as part of the pile foundation on the length and pitch of the piles (driven piles, sandy soil)

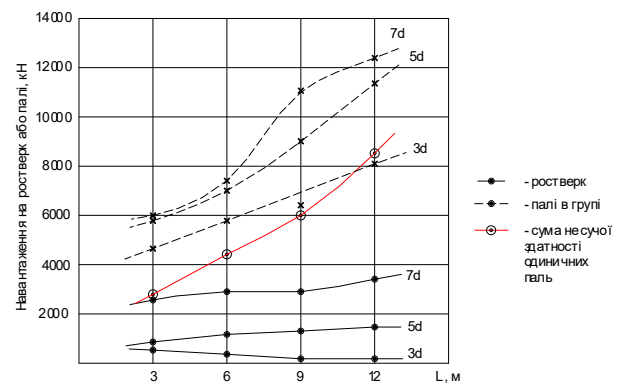


Рис. 8 – Залежність навантаження, що припадає на ростверк і палі у складі пального фундаменту від довжини і кроку паль (палі забивні, ґрунт глинистий)

Fig. 8 – Dependence of the load falling on the grid and piles as part of the pile foundation on the length and pitch of the piles (driven piles, clay soil)

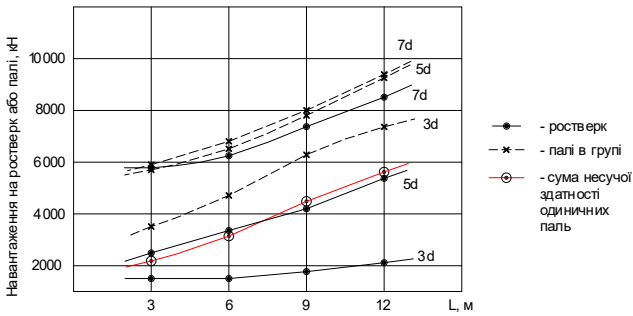


Рис. 9 – Залежність навантаження, що припадає на ростверк і палі у складі пального фундаменту від довжини і кроку палів (пали бурові, ґрунт піщаний)

Fig. 9 – Dependence of the load falling on the grid and piles as part of the pile foundation on the length and pitch of the piles (drilled piles, sandy soil)

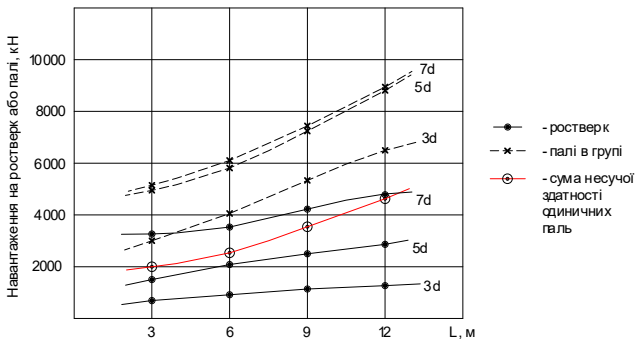


Рис. 10 – Залежність навантаження, що припадає на ростверк і палі у складі пального фундаменту від довжини і кроку палів (пали бурові, ґрунт глинистий)

Fig. 10 – Dependence of the load falling on the grid and piles as part of the pile foundation on the length and pitch of the piles (drilled piles, clay soil)

Видно також, що палі у складі фундаменту краще себе реалізують, ніж одиночні. Виключення складають фундаменти з забивних палів у піщаних ґрунтах (рис.7), але і в цьому випадку гірша реалізація несучої здатності палів стосується лише довгих палів. Для палів довжиною 3 м в будь-якому випадку палі у групі сприймають більше навантаження, ніж сума несучих здатностей одиночних палів.

Представляє інтерес визначення питомої несучої здатності палів та ростверків у складі фундаментів (відношення несучої здатності елемента до його об'єму,  $\text{kN/m}^3$ ).

Результати розрахунків представлені на рис. 11 – 14.

З рис. 11 – 14 чітко видно, що питома несуча здатність коротких палів у всіх випадках є найбільшою (питома несуча здатність триметрової палі перевищує питому несучу здатність дванадцятиметрової палі в 1,5 – 2 рази. Питома несуча здатність палів зростає також і при збільшенні кроку палів (розмірів ростверку). Такі залежності спостерігаються як для забивних, так і для бурових палів незалежно від виду ґрунту.

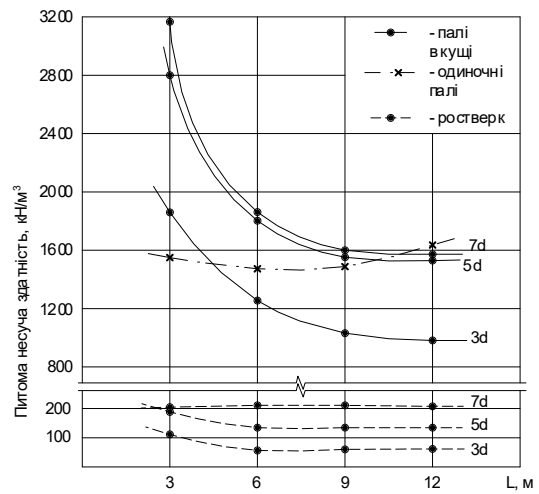


Рис. 11 – Залежність питомої несучої здатності палів і ростверку від довжини і кроку палів (пали забивні, ґрунт піщаний)

Fig. 11 – Dependence of the specific bearing capacity of piles and grating on the length and pitch of the piles (driven piles, sandy soil)

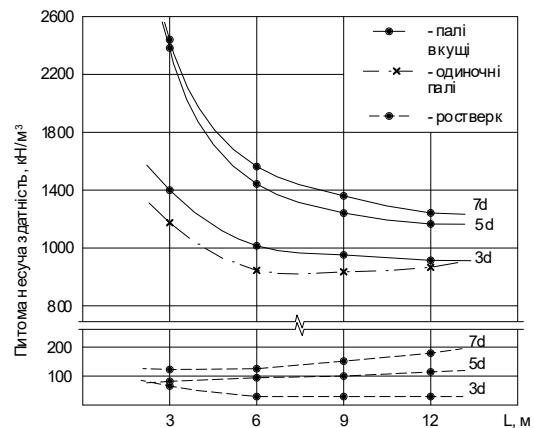


Рис. 12 – Залежність питомої несучої здатності палів і ростверка від довжини і кроку палів (пали забивні, ґрунт глинистий)

Fig. 12 – Dependence of the specific bearing capacity of piles and grid on the length and pitch of the piles (driven piles, clay soil)



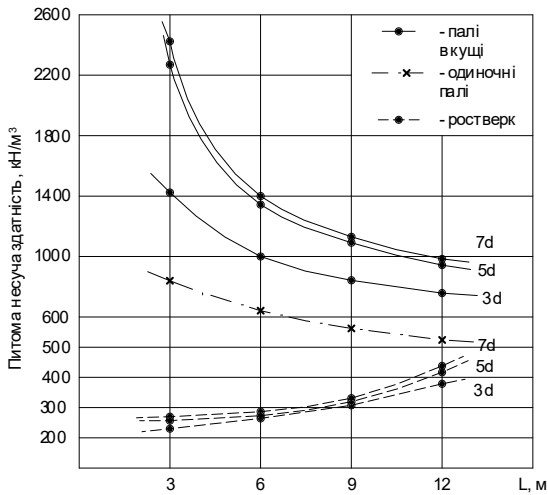


Рис. 13 – Залежність питомої несучої здатності палів і ростверку від довжини і кроку палів (палі бурові, ґрунт піщаний)

Fig. 13 – Dependence of the specific bearing capacity of piles and grid on the length and pitch of the piles (drilled piles, sandy soil)

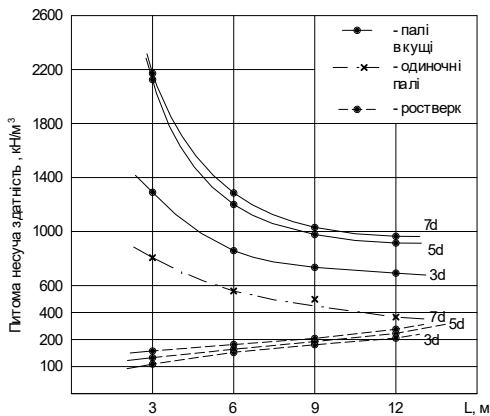


Рис. 14 – Залежність питомої несучої здатності палів і ростверку від довжини і кроку палів (палі бурові, ґрунт глинистий)

Fig. 14 – Dependence of the specific bearing capacity of piles and grating on the length and pitch of the piles (drilled piles, clayey soil)

Що стосується питомої несучої здатності ростверку, то вона практично не залежить від довжини палів і несуттєво збільшується із збільшенням їх кроку для забивних палів і практично не залежить від кроку і несуттєво збільшується із збільшенням довжини для бурових. Вид ґрунту не впливає на якісну картину розподілу питомої несучої здатності ростверка.

Отже, керівним фактором, який визначає ефективність роботи пального фунда-

менту, є довжина палів і короткі палі мають явну перевагу над довгими.

Аналіз дає підставу сподіватись, що заміна фундаменту з довгих палів з компактним ростверком на фундамент з коротких палів з більшими габаритами ростверку може бути ефективною.

Подальший аналіз ефективності такої заміни виконаний для фундаментів з забивних палів, оскільки для них така ефективність буде мінімальною.

Оскільки графіки на рис. 3 – 6 та 7 – 14 відображують несучу здатність елементів фундаменту при граничному значенні осідання 100 мм, то для коректного техніко-економічного порівняння конструктивних рішень були визначені значення несучої здатності одиночних палів за методикою норм [16], а також осідання палових фундаментів з забивних палів, запроєктованих з умови, що навантаження на куц дорівнює сумі несучих здатностей палів. Розглядався куц з 9 палів довжиною 12 м і ростверком з розмірами 2,4 × 2,4 м, а також куц з 9 палів довжиною 3 м з ростверком 4,8 × 4,8 м. Результати представлені у таблицях 2 та 3.

Таблиця 2 – Несуча здатність,  $F_d$ , одиночної палі, визначена за методикою норм, кН

Table 2 – Bearing capacity,  $F_d$ , of a single pile, determined by the norm method, kN

	L = 3 м	L = 6 м	L = 9 м	L = 12 м
Ґрунт - пісок	292	455	637	835
Ґрунт - суглинок	264	406	566	740

Таблиця 3 – Осідання пального куца, см, визначене за методом пошарового підсумовування як для умовного фундаменту мілкого закладання

Table 3 – Settlement of the pile bush, cm, determined by the method of layer-by-layer summation as for the conditional foundation of shallow laying

	9 палів довжиною 12 м з ростверком 2,4 × 2,4 м	9 палів довжиною 3 м з ростверком 4,8 × 4,8 м
Ґрунт - пісок	3,5	3,7
Ґрунт - суглинок	7,3	6,0

У таблиці 4 та на рис. 15 та 16 наведені навантаження на куц і сума зусиль в одиночних палях, одержані за результатами моделювання, але не для осідання 100 мм, а для осідання відповідно  $s = 3$  см для піщаного ґрунту і  $s = 5$  см для глинистого ґрунту, що буде відповідати параметрам пально-вих фундаментів, що запроектовані за нормами.

Таблиця 4 - Навантаження на пальовий фундамент і сума зусиль в одиночних палях за результатами моделювання

Table 4 - Load on the pile foundation and the sum of forces in single piles according to the simulation results

Довжина палі, м	Крок палі	Навантаження на фундамент, кН	Зусилля в одиночній палі, кН	Сума зусиль в одиночних палях, кН
<b>Забивні палі у піщаному ґрунті при <math>s = 3</math> см</b>				
3 м	3d	2400	231	2079
	5d	4050		
	7d	5300		
6 м	3d	3180	454	4086
	5d	5440		
	7d	6200		
9 м	3d	4500	722	6496
	5d	6830		
	7d	8000		
12 м	3d	5870	1060	9540
	5d	9050		
	7d	11760		
<b>Забивні палі у глинистому ґрунті при <math>s = 5</math> см</b>				
3 м	3d	2840	270	2430
	5d	4570		
	7d	5640		
6 м	3d	3930	425	3825
	5d	6000		
	7d	7100		
9 м	3d	5210	615	5530
	5d	7900		
	7d	9090		
12 м	3d	6900	850	7650
	5d	9750		
	7d	11200		

Бачимо, що зусилля в одиночних палях приблизно відповідають їх несучим здатностям, визначеним за нормами. Дані табл. 4

та рис. 15 та 16 показують, що і при реальних значеннях осідань групи палей навантаження на фундамент з палей довжиною 6 м при розмірах ростверку  $3,6 \times 3,6$  м (крок палей 5d) і фундамент з палей довжиною 3 м при розмірах ростверку  $4,8 \times 4,8$  м (крок палей 7d) наближається до навантаження на фундамент з забивних палей довжиною 12 м при розмірах ростверку  $2,4 \times 2,4$  м (крок палей 3d).

Отже, підтверджується висновок про те, що можна значно скоротити довжину палей за рахунок збільшення габаритів ростверку.

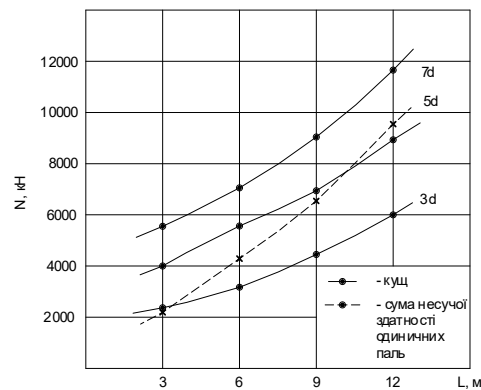


Рис. 15 – Залежність навантаження на пальовий фундамент і одиночні палі від довжини і кроку палей при  $s = 3$  см (палі забивні, ґрунт – пісок)  
Fig. 15 – Dependence of the load on the pile foundation and single piles on the length and pitch of the piles at  $s = 3$  cm (driven piles, soil - sand)

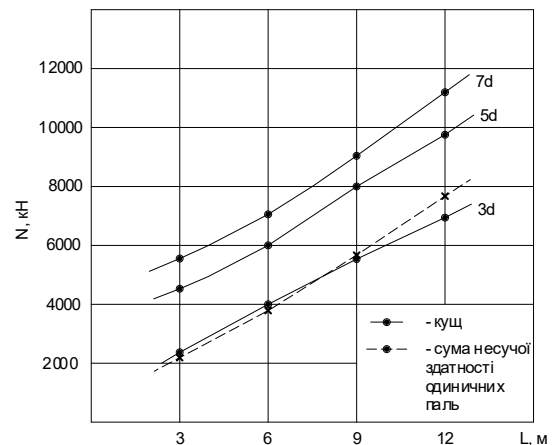


Рис. 16 – Залежність навантаження на пальовий фундамент і одиночні палі від довжини і кроку палей при  $s = 5$  см (палі забивні, ґрунт – суглинок)  
Fig. 16 – Dependence of the load on the pile foundation and single piles on the length and pitch of the piles at  $s = 5$  cm (driven piles, soil – loam)

Fig. 16 – Dependence of the load on the pile foundation and single piles on the length and pitch of the piles at  $s = 5$  cm (driven piles, soil – loam)



*Порівняльний аналіз вартості фундаментів з довгих та коротких палей*

Для порівняння вартості були обрані три варіанти конструктивного рішення фундаменту при однаковій несучій здатності.

Варіант 1 – фундамент з палей довжиною 12 м при розмірах ростверку 2,4 × 2,4 м (рис. 17).

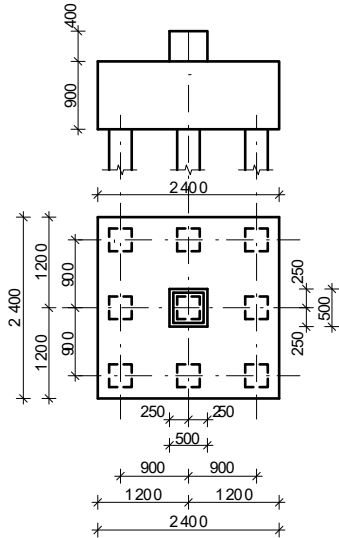


Рис. 17 – Конструктивне рішення фундаменту за варіантом 1

Fig. 17 – Structural solution of the foundation according to option 1

Варіант 2 – фундамент з палей довжиною 6 м при розмірах ростверку 3,6 × 3,6 м (рис. 18).

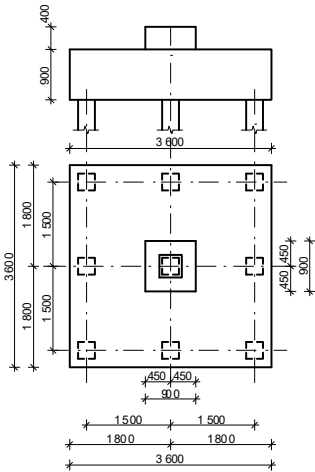


Рис. 18 – Конструктивне рішення фундаменту за варіантом 2

Fig. 18 – Structural solution of the foundation according to option 2

Варіант 3 – фундамент з палей довжиною 3 м при розмірах ростверку 4,8 × 4,8 м (рис. 19).

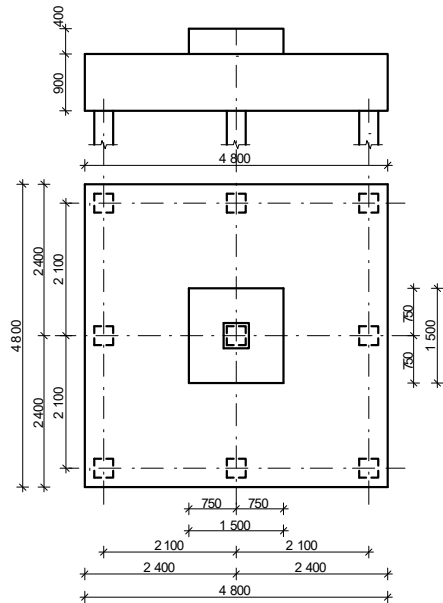


Рис. 19 – Конструктивне рішення фундаменту за варіантом 3

Fig. 19 – Structural solution of the foundation according to option 3

Був виконаний розрахунок міцності тіла для всіх трьох варіантів з підбиранням потрібної кількості арматури. Зрозуміло, що варіант 1 має значний об'єм палей, але незначні витрати бетону і арматури ростверка, а варіанти 2 та 3 мають зменшений об'єм палей, але значні витрати матеріалів на ростверк. Результати розрахунків наведені у таблиці 5 та на рис. 20.

Таблиця 5 – Результати розрахунку витрат матеріалів на улаштування палевих фундаментів  
Table 5 – Results of the calculation of the costs of materials for the arrangement of pile foundations

Витрати матеріалів	Варіант 1	Варіант 2	Варіант 3
Об'єм бетону палей, м <sup>3</sup>	9,72	4,86	2,43
Об'єм бетону ростверка, м <sup>3</sup>	5,29	12,0	21,64
Вага арматури, кг	175	398	564

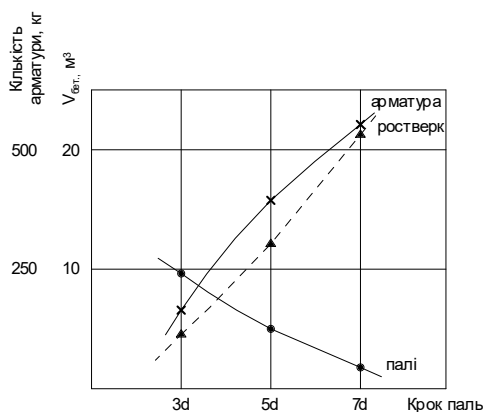


Рис. 20 – Залежність витрат матеріалів від кроку палі у ростверку

Fig. 20 – Dependence of material consumption on the pitch of the piles in the grid

Як бачимо, сумарні витрати бетону і арматури при переході від довгих палі із стандартним кроком 3d до коротких палі з підвищеним кроком в цілому збільшуються за рахунок зростання об'єму ростверку і збільшення згинального моменту у тілі ростверка від реакцій палі і тиску під ростверком (більше плече сил).

Але відомо, що готові палі заводського виготовлення є найбільш дорогою конструкцією у перерахуванні на 1 м<sup>3</sup> у порівнянні з іншими збірними та монолітними елементами.

Для аналізу економічної доцільності запропонованих варіантів конструктивного рішення були складені кошториси для трьох запропонованих варіантів. Результати розрахунку кошторисної вартості наведені у таблиці 7 та на рис.21.

Таблиця 7 – Результати розрахунку кошторисної вартості улаштування палевих фундаментів

Table 7 – Results of the calculation of the estimated cost of pile foundations

Кошторисна вартість	Варіант 1	Варіант 2	Варіант 3
Вартість улаштування палі, тис. грн.	126,47	59,69	25,81
Вартість улаштування ростверка, тис. грн.	15,64	35,47	63,85
Вартість арматури, тис. грн.	4,92	11,19	15,86
Загальна кошторисна вартість	152,09	113,43	112,96

рисна вартість, тис. грн.			
Загальна кошторисна вартість, %	135	100,4	100

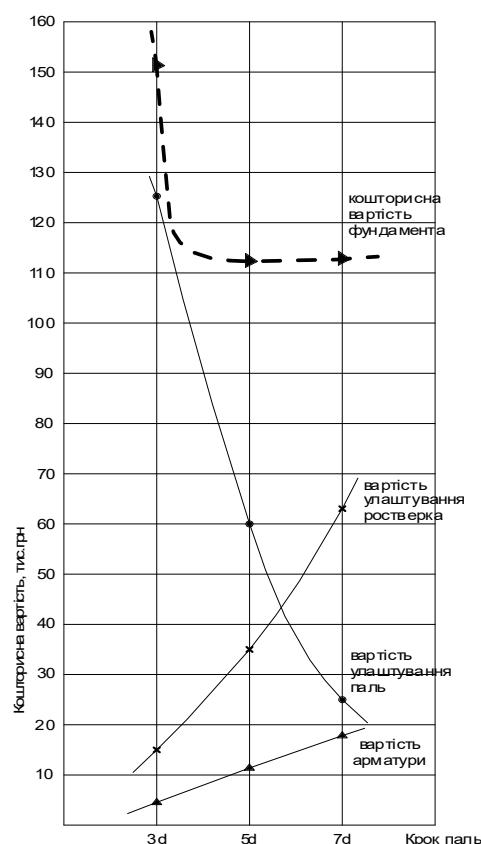


Рис. 21 – Залежність кошторисної вартості від кроку палі у ростверку

Fig. 21 – Dependence of the estimated cost on the pitch of the piles in the grid

## ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ

1. Реалізація несучої здатності палі у кущовому палевому фундаменті зростає при зменшенні довжини палі і збільшенні їх кроку.

2. Реалізація роботи ростверка також покращується при збільшенні відстані між палями.

3. Ефект кращої реалізації коротких палі у складі куща з бурових палі вищий за відповідний ефект для куща з забивних палі.

4. Вид ґрунту практично не впливає на характер перерозподілу зусиль між елементами стовпчастого палевого фундаменту.

5. За рахунок кращої реалізації роботи елементів палевого фундаменту для палі

малої довжини з великим кроком можна досягти однакової несучої здатності з фундаментом з паль великої довжини при традиційному мінімальному кроці 3d.

Не дивлячись на значне зростання об'єму бетону ростверку і кількості арматури при збільшенні кроку паль економія коштів на вартості забивних паль забезпечує економічний ефект від використання кущів з коротких паль з широкими ростверками до 35%.

## ЛІТЕРАТУРА

- Burland J.B. Behavior of Foundation and Structures / J.B. Burland, B.B. Broms, V. Demello // *Proc. 9th. ICSMFE*. Tokyo, – 1977. – P. 495–546.
- Hanna T.H. Model Studies of Foundations Groups in Sand / T.H. Hanna // *Géotechnique. Volume 13 Issue 4*. 1963. P. 334-351.
- Whitaker T. Experiments with model piles in groups / T. Whitaker // *Geotechnic*. London, England. Vol. 7. № 4. – 1977. – P.147–167.
- Katzenbach R. Piled raft foundation: interaction between piles and raft / R.Katzenbach, U.Arslan, C.Moorman, O.Reul// *Darmstadt Geotech*. Darmstadt Univ. Technol. 4 (1). – 1998. – P. 279-296.
- Poulos H.G. Pile Foundation Analysis and Design / H.G.Poulos, E.H.Davis // *New York: John Wiley and Sons*, – 1980. – 394 p.
- Randolph M.F. Design method for pile groups and piled rafts / M.F.Randolph // *13<sup>th</sup> International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*. New Delhi, India, – 1994. – Vol. 5. – P. 61-82.
- Nguyen D.D.C. Design method of piled-raft foundations under vertical load considering interaction effects / D.D.C.Nguyen, S.B. Jo, D.S.Kim // *Computers and Geotechnics*. – 2013. – Vol.47. – P.16-27.
- Elwakil A.Z. Experimental and numerical study of piled raft system / A.Z.Elwakil, W.R. Az-zam// *Alexandria Engineering Journal*. – 2016. Volume 55, Issue 1. – P. 547-560.
- Fekadu Melese Improved Performance of Raft Foundation Using Detached Pile Columns in Loose Subsoil Conditions. *Advances in Civil Engineering*. 2022. 18 p.
- Блащук Н.В. Перерозподіл зусиль між елементами стовпчастого пальового фундаменту / Н.В.Блащук, І.В.Маєвська, М.М. Попович // *Сучасні технології, матеріали та конструкції в будівництві*. – 2018. №1(24). – С.36-44.
- Маєвська І.В. Особливості роботи пальових кущів з коротких паль за даними числового моделювання / І.В.Маєвська, Н.В.Блащук, Ю.О. Кременська// *Основи та фундаменти: Науково-технічний збірник*. – К.: КНУБА. – 2021. – Вип. 43. – С. 30-39.
- Маєвська І.В. Різниця в роботі коротких і довгих паль у складі стовпчастого пальового фундаменту за результатами фізичного моделювання / І.В. Маєвська, М.М. Попович, Ю.О.Кременська // *Сучасні технології, матеріали та конструкції в будівництві*. Вінниця: ВНТУ. – 2022. №2(33). – С. 108-118.
- Кримняк Я.М. Реалізація несучої здатності забивних паль і ростверку у стовпчастому пальовому фундаменті / Я.М. Кримняк, І.В. Маєвська // *Інноваційні технології в будівництві*. – Вінниця, 2020. – URL: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/itb/itb2020/paper/view/10890> (дата звернення 28.06.2024).
- Колібаба В.В. Робота бурових паль і ростверку у складі стовпчастого пальового фундаменту / В.В.Колібаба, І.В.Маєвська // *Молодь в науці: дослідження, проблеми, перспективи (МН-2021)*. – Вінниця, – 2021 URL: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/mn/mn2021/paper/view/11114> (дата звернення 28.06.2024).
- Маєвська І.В. Робота паль і ростверку у складі стовпчастих пальових фундаментів / І.В. Маєвська, Н.В. Блащук // *Монографія*. Вінниця : ВНТУ, – 2023. – 182 с.
- Основи та фундаменти споруд. Зміна № 1: ДБН В.2.1–10–2009. – [Чинний від 2011–07–01]. – К.: Мінрегіонбуд України, 2011. – 55с.
- Abdolrezayi A. Comparative three-dimensional finite element analysis of piled raft foundations / A. Abdolrezayi, N. Khayat // *Computational Engineering and Physical Modeling*. 2021. P 19-36.
- Саміленко В.В. Практична доцільність переходу від довгих до коротких паль у стовпчастих пальових фундаментах / В.В. Саміленко, О.Ю.Шмундяк, І.В.Маєвська // *Енергоефективність в галузях економіки України – 2023*. – Вінниця, – 2023. URL: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/egeu/egeu2023/paper/view/19121> (дата звернення 28.06.2024).

## REFERENCES

1. Burland J.B., Broms B.B., Demello V. (1977). Behavior of Foundation and Structures. *Proc. 9th. ICSMFE*. Tokyo. P. 495–546.
2. Hanna T.H. (1963). Model Studies of Foundations Groups in Sand. *Géotechnique. Volume 13 Issue 4*. P. 334-351.
3. Whitaker T. (1977). Experiments with model piles in groups. *Geotechnic*. London, England. Vol. 7. № 4. P.147–167.
4. Katzenbach R., Arslan U., Moorman C., Reul O. (1998). Piled raft foundation: interaction between piles and raft. *Darmstadt Geotech*. Darmstadt Univ. Technol. 4 (1). P. 279-296.
5. Poulos H.G., Davis E.H. (1980). Pile Foundation Analysis and Design. *New York: John Wiley and Sons*. 394 p.
6. Randolph M. F. (1994). Design method for pile groups and piled rafts. *13<sup>th</sup> International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*. New Delhi, India, Vol. 5. P. 61-82.
7. Nguyen D.D.C., Jo S.B., Kim D.S. (2013). Design method of piled-raft foundations under vertical load considering interaction effects. *Computers and Geotechnics*. Vol. 47. P.16-27.
8. Elwakil A.Z., Azzam W.R. (2016). Experimental and numerical study of piled raft system. *Alexandria Engineering Journal*. Volume 55, Issue 1. P. 547-560.
9. Fekadu Melese Improved Performance of Raft Foundation Using Detached Pile Columns in Loose Subsoil Conditions. (2022). *Advances in Civil Engineering*. 18 p.
10. Blashchuk N.V., Maievska I.V., Popovych M.M. (2018). Pererozpodil zusyl mizh elementamy stovpchastoho palovoho fundamentu [Redistribution of forces between the elements of the columnar pile foundation]. *Suchasni tekhnologii, materialy ta konstruksii v budivnytstvi*. №1(24). p.36-44 (in Ukrainian).
11. Maievska I.V., Blashchuk N.V., Kreminska Yu. O. (2021). Osoblyvosti roboty palovykh kushchiv z korotkykh pal za danymy chyslovoho modeliuvannia [Features of pile groups from short piles according to numerical modeling]. *Osnovy ta fundamenty: Naukovo-tekhnichnyi zbirnyk*. K.: KNUBA. Vyp. 43. S.30-39 (in Ukrainian).
12. Maievska I.V., Popovych M.M., Kreminska Yu.O. (2022). Riznytsia v roboti korotkykh i dovhykh pal u skladi stovpchastoho palovoho fundamentu za rezultatamy fizychnoho modeliuvannia [Difference in the performance of short and long piles in a columnar pile foundation based on the results of physical modeling]. *Suchasni tekhnologii, materialy ta konstruksii v budivnytstvi*. №2(33). S. 108-118.
13. Krymniak Ya.M., Maievska I.V. (2020). Realizatsiia nesuchoi zdatnosti zabyvnykh pal i rostverku u stovpchastomu palovomu fundamenti [Realization of the bearing capacity of driven piles and grillage in a columnar pile foundation]. *Innovatsiini tekhnologii v budivnytstvi*. Vinnytsia. – URL: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/itb/itb2020/paper/view/10890> (data zvernennia 28.06.2024).
14. Kolibaba V.V., Maievska I.V. (2021). Robota burovykh pal i rostverku u skladi stovpchastoho palovoho fundamentu [Operation of drilled piles and grillage as part of a columnar pile foundation]. *Molod v nauksi: dosli-dzhennia, problemy, perspektyvy (MN-2021)*. Vinnytsia. URL: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/mn/mn2021/paper/view/11114> (data zvernennia 28.06.2024).
15. Maievska I.V., Blashchuk N.V. (2023). Robota pal i rostverku u skladi stovpchastykh palovykh fundamentiv [Operation of piles and grillage as part of columnar pile foundations]. *Monohrafiia*. Vinnytsia: VNTU, 182 s.
16. Osnovy ta fundamenty sporud. Zmina 1: DBN V.2.1–10–2009. (2011). Kyiv: Minregionbud Ukrainy, 55 (in Ukrainian).
17. Abdolrezayi A., Khayat N. (2021). Comparative three - dimensional finite element analysis of piled raft foundations. *Computational Engineering and Physical Modeling*. P 19-36.
18. Samilenko V.V., Shmundiak O.Yu., Maievska I.V. (2023). Praktychna dotsilnist perekhodu vid dovhykh do korotkykh pal u stovpchastykh palovykh fundamentakh [Practical feasibility of transition from long to short piles in columnar pile foundations]. *Enerhoefektyvnist v haluziakh ekonomiky Ukrainy–2023*. Vinnytsia, 2023. URL: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/egeu/egeu2023/paper/view/19121> (data zvernennia 28.06.2024).

**Analysis of the effectiveness of the use of short piles as part of a columnar pile foundation**

*Irina MAEVSKA,  
Natalya BLASHCHUK,  
Oleksandr SHMUNDYAK*

**Summary.** The realization of the operation of the grid and piles as a part of the columnar pile foundation, depending on the length of the piles, the method of arranging the piles, the distance between the piles and the type of soil with a constant number of piles, has been studied. The degree of implementation of the load-bearing capacity of the piles and the degree of implementation of the grid work as part of the pile foundation were analyzed. To solve the tasks set in this work, mathematical modeling by the finite element method of the joint operation of the pile foundation elements with the soil base and the separate operation of the pile and grid as a shallow foundation was performed in the "Plaxis 3D Foundation" software complex.

It was established that the implementation of the load-bearing capacity of piles in the composition of the foundation with a large distance between the piles is much better. The length of the piles also affects the degree of their implementation. When the length increases, the bearing capacity of the piles is realized less. The greatest implementation of the load-bearing capacity of piles in the composition of the foundation is observed for short piles. The realization of the pressure under the sole of the grid with an increase in the pitch of the piles also improves, the realization of the load-bearing capacity of the grid is from 8 to 50%, which allows to raise the load-bearing capacity of the foundation. For sandy and clay soils, the nature of the redistribution of forces between the elements of the columnar pile foundation is similar. For foundations made of drilled piles, the degree of realization of pressure under the sole of the grate, as well as the degree of realization of the load-bearing capacity of the piles, is higher than for foundations made of driven piles. The guiding factor is the length of the piles.

The economic efficiency of the transition in homogeneous soils from a bush made of long piles with a standard minimum step to a bush made of short piles with an increased distance between the piles was investigated. By taking into account the joint operation of piles and grid, a bush made of short piles with larger dimensions of the grid provides the same bearing capacity as a bush made of long piles with a compact grid.

Despite the significant increase in the volume of concrete grating and the number of fittings with an increase in the pitch of the piles, cost savings on the cost of piles provide an economic effect of using bushes from short piles with wide gratings up to 35%.

**Key words.** Columnar pile foundation, grillage, driving pile, drilling pile, redistribution of loads, degree of implementation of bearing capacity, estimated cost, economic feasibility.