

## РЕАЛІЗАЦІЯ НЕСУЧОЇ ЗДАТНОСТІ ЗАБИВНИХ ПАЛІ І РОСТВЕРКУ У СТОВПЧАСТОМУ ПАЛЬОВОМУ ФУНДАМЕНТІ

Вінницький національний технічний університет

### Анотація

Виконане планування експерименту з математичного моделювання роботи стовпчастого пальового фундаменту з забивних палей за допомогою програмного комплексу Plaxis. Передбачається дослідити реалізацію роботи ростверку і палей у складі пальового фундаменту у порівнянні з роботою одиночної палі і ростверку як фундаменту мілкового закладання в залежності від геометричних параметрів фундаменту і виду ґрунтів.

Виконаний I етап досліджень і проаналізовані його результати.

**Ключові слова:** стовпчастий паливий фундамент, ростверк, паля, перерозподіл, несуча здатність.

### Abstract

The planning of the experiment on mathematical modeling of the columnar pile foundation from driven piles with the help of the Plaxis software package was performed. It is supposed to investigate the implementation of the grillage and piles in the pile foundation in comparison with the work of a single pile and grillage as a foundation of shallow laying depending on the geometric parameters of the foundation and the type of soil.

The first stage of research was performed and its results were analyzed.

**Keywords:** columnar pile foundation, grillage, pile, redistribution, bearing capacity.

### Вступ

Великою кількістю дослідів встановлено, що у складі стовпчастого пальового фундаменту частина навантаження передається на палі, а частина – на ростверк, навантаження між палями розподіляється нервномірно [3-8]. Чинні на території України нормативні документи [1] рекомендують або взагалі не враховувати роботу ростверку, або враховувати роботу ростверку як реакцію ґрунтової основи під підошвою, але і такий підхід не дозволяє адекватно врахувати роботу ростверку у складі пальового фундаменту.

В результаті врахування роботи елементів пальового фундаменту відбувається зменшення вартості фундаменту в цілому. Ці обставини зумовлюють доцільність та актуальність подальшого дослідження напружено-деформованого стану пальового фундаменту та його складових частин при роботі з ґрунтовою основою.

Створення достовірної розрахункової моделі ґрунтової основи, що забезпечує достатню відповідність між результатами розрахунку і роботою натурних палей – все ще одна із найважливіших проблем фундаментобудування.

Одним з програмних комплексів, в якому можна реально змоделювати ґрунтове середовище навколо палей є Plaxis, який розроблений на основі методів скінченних елементів та умов просторової задачі.

У цій роботі поставлена задача дослідити напружено-деформований стан (НДС) кушового пальового фундаменту з забивних палей шляхом математичного моделювання систем паливий фундамент- основа за допомогою програмного комплексу Plaxis.

### Результати дослідження

Попередньо були проведені модельні дослідження сумісної роботи елементів стовпчастого пальового фундаменту з забивних палей з основою шляхом фізичного моделювання магістрантами кафедри БМГА ВНТУ О.М. Малишевим та С.О. Цимбалом [7, 8].

Для моделювання натурних палей довжиною 3 м, 4,5 м та 6 м з поперечним перерізом 30x30 см виготовлені дерев'яні моделі з поперечним перерізом 20x20 мм, довжиною 200, 300 і 400 мм. Кількість палей в куші прийнята сталою (9 штук). З метою варіювання кроком палей було виготовлено три моделі ростверків, що дозволяють приймати крок палей  $3d$ ,  $5d$  та  $7d$ , де  $d$  – розмір поперечника палей. Моделі ростверків були виготовлені з залізобетону.

Авторами дослідження була проаналізована частка ростверку у загальному навантаженні на фундамент в залежності від довжини і кроку паль (рис. 1). Показано, що частка навантаження, яка сприймається плитою ростверку сягає до 50% від загального навантаження на паливий фундамент. Навантаження, яке сприймає ростверк залежить від довжини паль і осової відстані між палями. Із збільшенням відносної довжини паль ( $l/d$ ) несуча здатність ростверку зменшується, оскільки палі великої довжини сприймають більше навантаження за рахунок великої площі бокової поверхні. Із збільшенням осової відстані між палями несуча здатність ростверку збільшується, оскільки площа плити ростверку також збільшується.

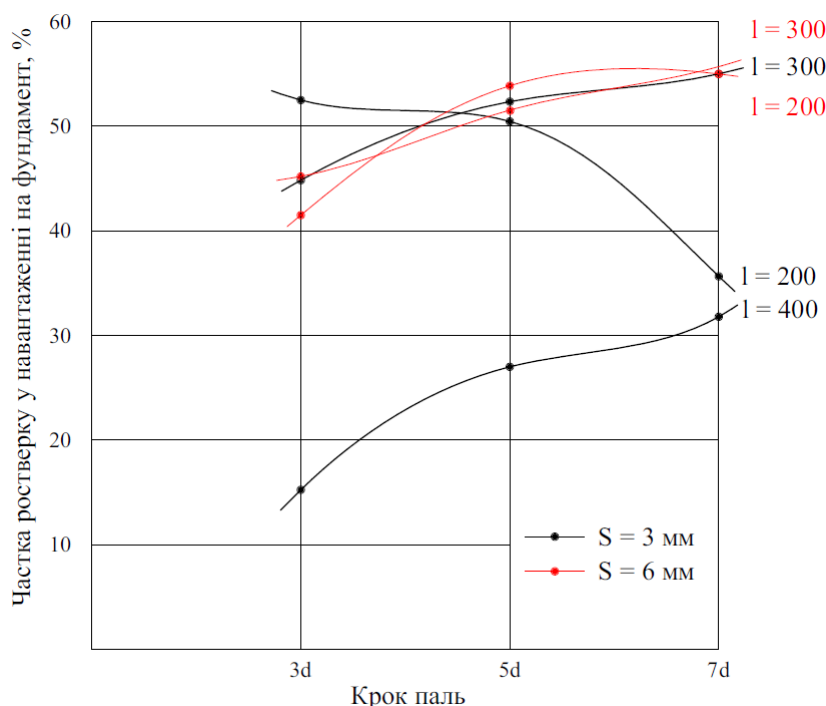


Рисунок 1 – Графік залежності частки ростверку – кроку паль при осіданні 3 мм, 6 мм та довжині паль 200 мм, 300 мм і 400 мм [7, 8]

Для продовження дослідження автором даної роботи була проаналізована реалізації несучої здатності палі у складі фундаменту у порівнянні з навантаженням, яке сприймає одиночна паля, а також залежність тиску під подошвою ростверку у складі стовпчастого паливого фундаменту від довжини і кроку паль. Результати такого аналізу наведені у таблиці 1 та на рис. 2, 3.

Таблиця 1 – Результати експериментальних фізичних випробувань моделей стовпчастих паливих фундаментів

Осідання, мм	Крок паль	Приведена довжина паль, (l/d)	Навантаження на модель фундаменту, кН	Навантаження, яке сприймають палі, кН	Несуча здатність одиночної палі при	Ступінь реалізації несучої здатності палі	Навантаження, яке сприймає	Тиск під подошвою ростверку, кПа	Частка ростверку, %
S = 2	3d	10	5,50	2,07	0,3	0,77	3,43	94,2	62,36
		15	6,00	2,40	0,3	0,89	3,60	98,9	60,00
		20	11,60	8,64	0,35	2,74	2,96	81,3	25,52
	5d	10	8,00	4,05	0,3	1,5	3,95	49,1	49,38
		15	9,50	4,23	0,3	1,57	5,27	65,5	55,47
		20	15,00	9,26	0,35	2,94	5,74	71,3	38,27
	7d	10	9,00	5,63	0,3	2,09	3,37	20,5	37,44
		15	11,00	4,58	0,3	1,70	6,42	39,0	58,36
		20	21,00	11,90	0,35	3,78	9,10	55,3	43,33

Продовження таблиці 1

Осідання, мм	Крок палів	Приведена довжина палів, (l/d)	Навантаження на модель фундаменту, кН	Навантаження, яке сприймають палі, кН	Несуча здатність одиночної палі при	Ступінь реалізації несучої здатності палів	Навантаження, яке сприймає фундамент	Тиск під підошвою ростверку, кПа	Частка ростверку, %
S = 3	3d	10	7,00	3,30	0,46	0,8	3,70	101,6	52,86
		15	8,00	4,35	0,49	0,99	3,65	100,2	45,63
		20	14,00	11,90	0,52	2,54	2,10	57,7	15,00
	5d	10	11,00	5,40	0,46	1,30	5,60	69,6	50,91
		15	11,50	5,32	0,49	1,21	6,18	76,8	53,74
		20	18,00	13,04	0,52	2,78	4,96	61,6	27,56
	7d	10	12,00	7,65	0,46	1,85	4,35	26,4	36,25
		15	13,00	5,78	0,49	1,31	7,22	43,9	55,50
		20	25,00	17,10	0,52	3,65	7,90	48,0	31,60
S = 4,5	3d	10	8,50	4,42	0,52	0,94	4,08	112,1	48,00
		15	9,50	5,20	0,53	1,09	4,30	118,1	45,26
	5d	10	13,00	6,07	0,52	1,30	6,93	86,1	53,31
		15	14,00	6,75	0,53	1,41	7,25	90,1	51,79
	7d	10	15,00	7,65	0,52	1,63	7,35	44,7	49,00
		15	15,00	5,18	0,53	1,09	9,82	59,7	65,47
S = 6,0	3d	10	9,50	5,47	0,55	1,105	4,03	110,7	42,42
		15	11,00	6,00	0,59	1,13	5,00	137,3	45,45
	5d	10	15,00	6,90	0,55	1,39	8,10	100,6	54,00
		15	15,00	7,20	0,59	1,36	7,80	96,9	52,00
	7d	10	17,00	7,65	0,55	1,55	9,35	56,8	55,00
		15	-	-	0,59	-	-	-	-
S=10,0	3d	10	11,50	7,20	0,56	1,43	4,30	118,1	37,39
		15	13,00	6,67	0,70	1,06	6,33	173,9	48,69
S=15,0	3d	10	13,00	8,17	0,56	1,62	4,83	132,7	37,15
		15	14,50	7,38	0,71	1,15	7,12	195,6	49,10

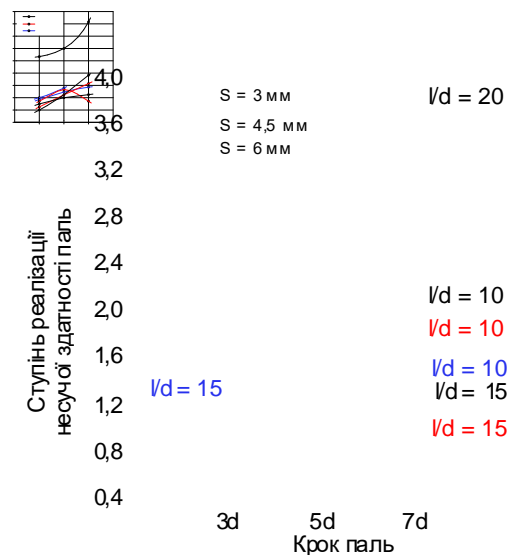


Рис. 2 – Залежність ступеню реалізації несучої здатності палі у складі фундаменту у порівнянні з навантаженням, яке сприймає одиночна палія

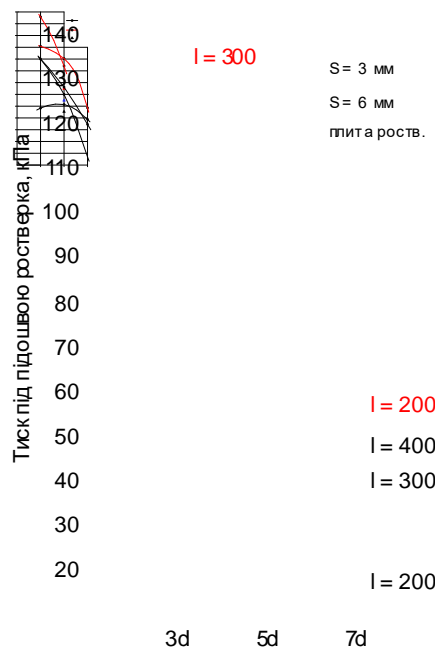


Рис. 3 – Залежність тиску під подошвою ростверку у складі стовпчастого пальового фундаменту від довжини і кроку паль

З рисунків видно, що реалізація несучої здатності паль у складі фундаменту підвищується із збільшенням кроку паль. З рисунків також видно, що при більшій довжині несуча здатність паль реалізується менше.

Тиск під подошвою ростверку із збільшенням кроку паль зменшується, але він перевищує тиск, який сприймає плита ростверку як фундамент мілкого закладання, тобто ростверк також реалізує себе краще у складі пальового фундаменту.

В подальшому на підставі результатів математичного моделювання планується дослідити реалізацію роботи ростверку і паль у складі пальового фундаменту у порівнянні з роботою одиночної палі і ростверку як фундаменту мілкого закладання в залежності від геометричних параметрів фундаменту і виду ґрунтів.

*Програма моделювання НДС системи «фундамент – палі - основа» для стовпчастого пальового фундаменту.*

Результатами експериментальних досліджень впливу низького ростверку на роботу пальового фундаменту різних авторів, а також даними фізичного моделювання роботи пальового фундаменту та паль на маломасштабних моделях встановлено, що факторами, які впливають на розподіл навантаження між елементами пальового фундаменту, є:

- довжина паль ( $l_i$ ), м;
- розмір поперечного перерізу палі (d), м;
- відстань між палями ( $a_i, b_i$ ), м;
- кількість паль у кущі (n);
- фізико-механічні характеристики ґрунту;
- спосіб влаштування паль.

Для розв'язання поставленої задачі необхідно виконати моделювання методом скінчених елементів сумісної роботи ростверку і паль з ґрунтовою основою та окремо роботи палі і ростверку як фундаменту мілкого закладання у програмному комплексі «Plaxis 3D Foundation».

Програма визначення навантаження, яке сприймається окремими елементами у складі стовпчастого пальового фундаменту передбачає:

- створення розрахункової схеми пальового фундаменту під колону з коригуванням довжини і кроку паль;
- прикладання навантаження до розрахункової схеми стовпчастого пальового фундаменту;
- побудова графіків для визначення навантаження, яке сприймає плита ростверку.

При чисельно-математичному моделюванні поведінки плити ростверку і паль під навантаженням були прийняті такі параметри:

- модель ґрунту – пружно-пластична модель Кулона-Мора;
- модель пальового фундаменту під колону – ростверк товщиною 0,5 м та 1,0 м і палі поперечного перерізу 0,3 м x 0,3 м;
- палі довжиною 3,0 м з кроком 3d, 5d і 7d;
- палі довжиною 6,0 м з кроком 3d, 5d і 7d;
- палі довжиною 9,0 м з кроком 3d, 5d і 7d;
- палі довжиною 12,0 м з кроком 3d, 5d і 7d;
- величина навантаження, яка сприймається плитою ростверку, розраховується як добуток реактивного опору ґрунту, який знаходиться під подошвою ростверку, на площу ростверку (без врахування площі паль);
- величина навантаження, яка сприймається палями, розраховується як різниця загального навантаження на стовпчастий паловий фундамент і величини навантаження, яка сприймається плитою ростверку.

Модельні 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. 2. Характеристики піщаного ґрунту: пісок дрібний,  $\gamma = 18,6$  кН/м<sup>3</sup>,  $e = 0,67$ ,  $c = 2$  кПа,  $\varphi = 32^\circ$ ,  $E = 28$  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. 2. Характеристики глинистого ґрунту: суглинок,  $\gamma = 18,7$  кН/м<sup>3</sup>,  $c = 23$  кПа,  $\varphi = 21^\circ$ ,  $\nu = 0,35$ ,  $E = 14$  МПа;

III - 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 1000 мм, програму моделювання наведено в табл. 2. Характеристики глинистого ґрунту: суглинок,  $\gamma = 18,7$  кН/м<sup>3</sup>,  $c = 23$  кПа,  $\varphi = 21^\circ$ ,  $\nu = 0,35$ ,  $E = 14$  МПа;

Таблиця 2 – Програма моделювання сумісної роботи ростверку і паль стовпчастого пальового фундаменту для підгруп I – III (додатково варіюються вид ґрунту і жорсткість ростверку)

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

IV - моделювання сумісної роботи фундаменту і паль зі сталим кроком 3d, довжиною 6 м в однакових ґрунтових умовах та різною кількістю паль. Характеристики однорідного ґрунту: глинистий,  $\gamma = 16,7$  кН/м<sup>3</sup>,  $c = 28$  кПа,  $\varphi = 28^\circ$ ,  $E = 19$  МПа.

Програму моделювання наведено в табл. 3.

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

VI – моделювання роботи ростверку як фундаменту мілкового закладання в різних ґрунтових умовах підгруп I – II.

Таблиця 3 – Програма моделювання сумісної роботи ростверку і паль для підгрупи IV

Група дослідів	Довжина та поперечний розмір паль	Крок і кількість паль (n)	Ґрунтові умови
1	L=6 м, d=0,3 м	3d, 9 шт	$\gamma = 16,7 \text{ кН/м}^3$ , $c = 28 \text{ кПа}$ , $\varphi = 28^\circ$ , $E = 19 \text{ МПа}$
2	L=6 м, d=0,3 м	3d, 16 шт	
3	L=6 м, d=0,3 м	3d, 25 шт	

Результати моделювання НДС системи «фундамент – палі - основа» для стовпчастого пального фундаменту для підгрупи I.

При моделюванні роботи пального фундаменту були враховані наступні фази роботи:

- робота ґрунтової товщі без фундаментів (початкова фаза);
- влаштування стовпчастого пального фундаменту;
- робота стовпчастого пального фундаменту під дією вертикального навантаження.

Величина навантаження на моделі збільшувалась до тих пір, поки деформації знаходились в межах допустимих значень.

При чисельно-математичному моделюванні визначення частки ростверку і паль у навантаженні на стовпчастий паливий фундамент використовувалися повномасштабні моделі. При кількості паль 9 шт. (підгрупи I – III), кроці паль 3d ростверк мав габаритні розміри в плані 2,4 м x 2,4 м; при кроці паль 5d – 3,6 м x 3,6 м; при кроці паль 7d – 4,8 м x 4,8 м.

На рис. 4 для прикладу наведені розрахункові моделі стовпчастого пального фундаменту та ґрунтового масиву.

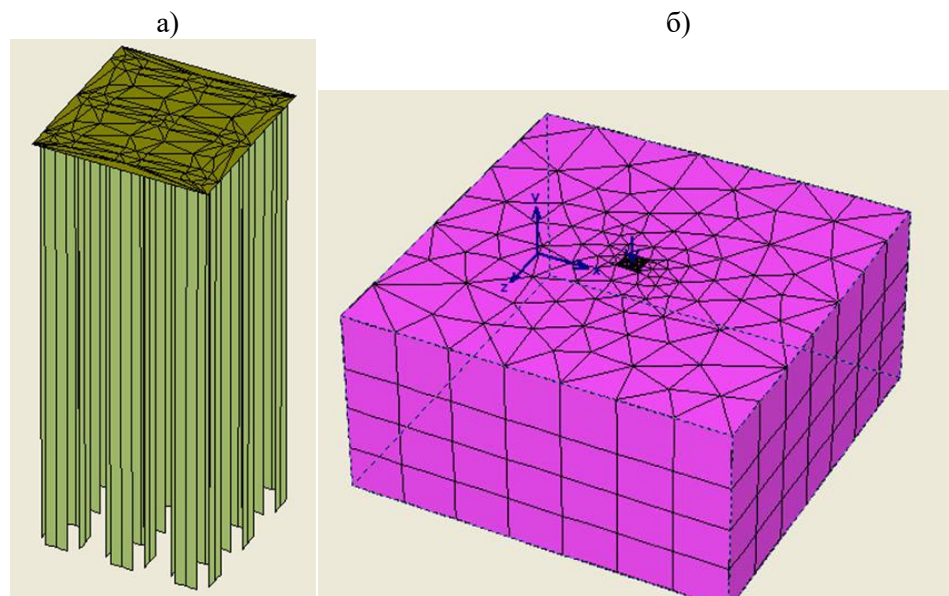


Рис. 4 – Розрахункові моделі стовпчастого пального фундаменту:  
а) паливий фундамент з ростверком 2,4 м x 2,4 м, палі довжиною 6 м; б) ґрунтовий масив

На рис. 5 – 7 наведено графіки залежності навантаження – осідання пального фундаменту з кроками паль 3d, 5d і 7d. На рис. 8, 9 наведено графіки залежності навантаження – осідання для одиночних паль та плит ростверків як фундаментів мілкового закладання.

На рис. 10 наведено графік залежності несучої здатності стовпчастого пального фундаменту в цілому при довжині паль 3 м, 6 м, 9 м, 12 м. Величина несучої здатності наведена при осіданні фундаменту 40 мм.

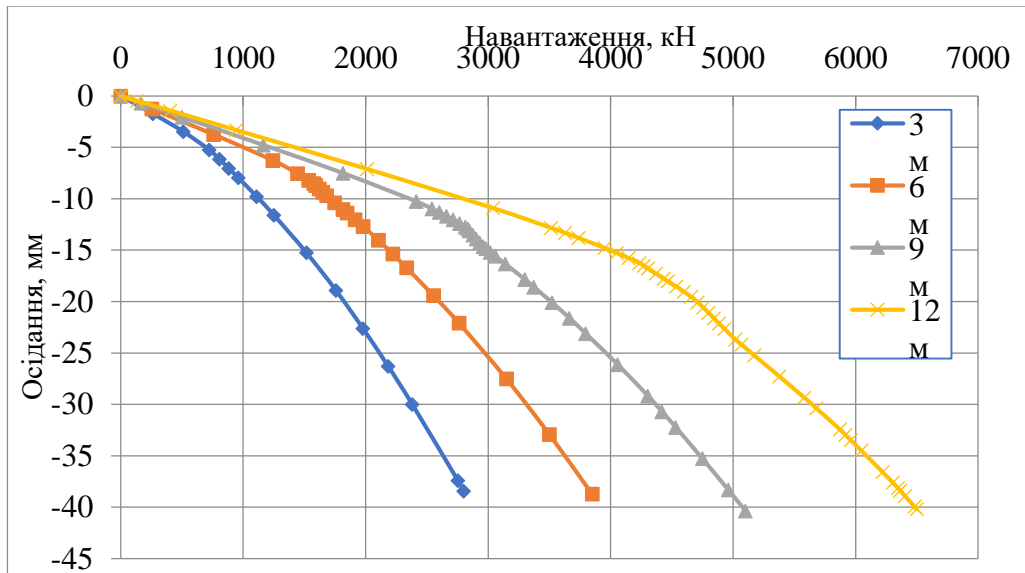


Рис. 5 – Графік залежності навантаження – осідання при кроці паль 3d

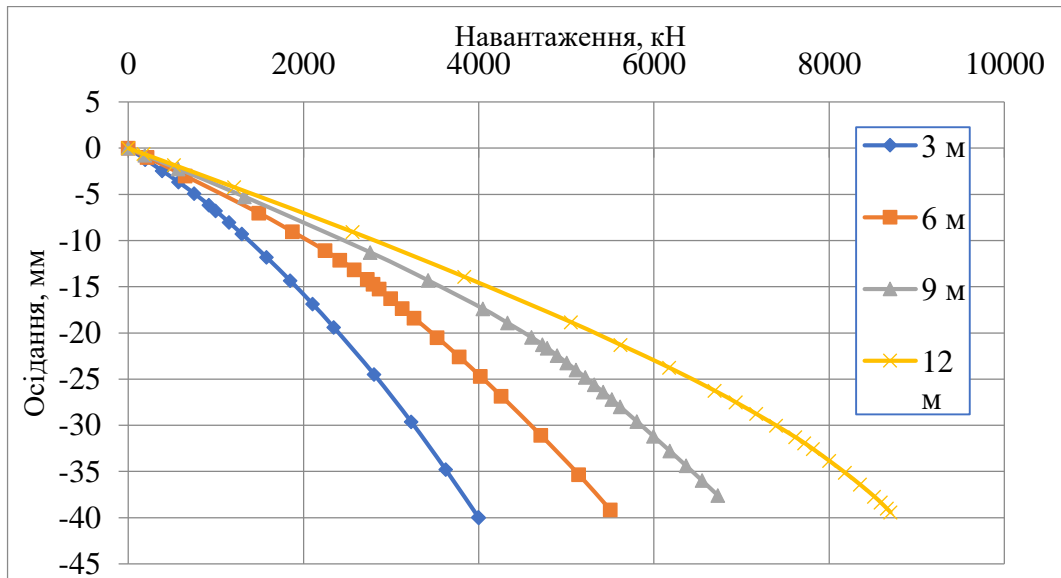


Рис. 6 – Графік залежності навантаження – осідання при кроці паль 5d

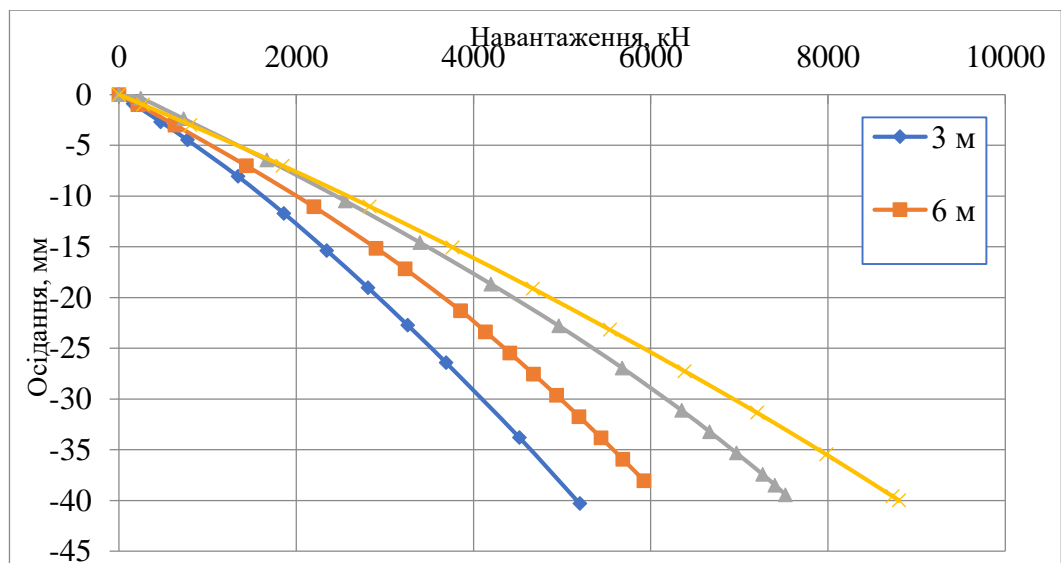


Рис. 7 – Графік залежності навантаження – осідання при кроці паль 7d

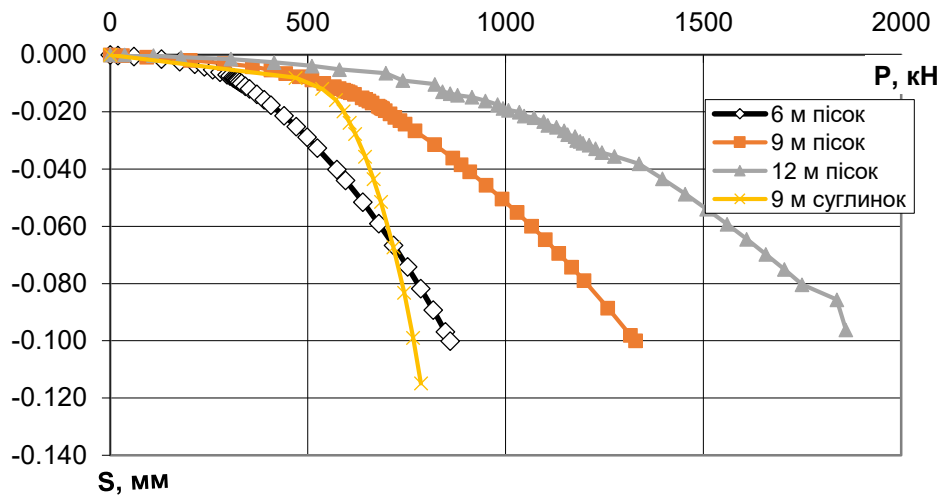


Рис. 8 – Графік залежності осідання – навантаження для одиночних паль різної довжини в різних ґрунтових умовах

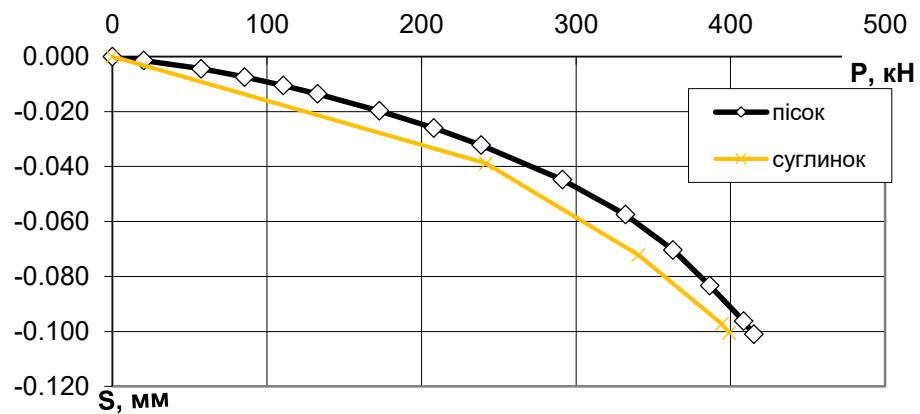


Рис. 9 – Графік залежності осідання – навантаження для ростверків як фундаментів мілкового закладання в різних ґрунтових умовах

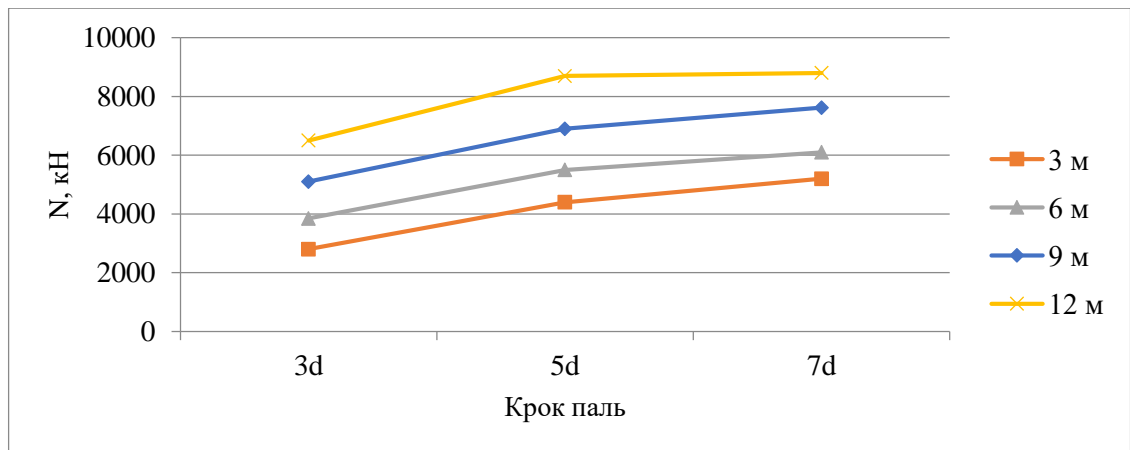


Рис. 10 – Графік залежності несучої здатності стовпчастого пальового фундаменту – крок паль (палі забивні, ґрунт – пісок)

Результати моделювання наведено в таблиці 4. Несуча здатність одиночної палі визначена при осіданні 0,2 від осідання куща, тобто  $0,2 \cdot 40 = 8$  мм.

Тиск під підшвою ростверка, як фундаменту мілкового закладання при осіданні  $s = 40$  мм (рис. 9), складає 170 кПа.



Таблиця 4 – Результати моделювання стовпчастого пального фундаменту за підгрупою I (9 палів, влаштованих без виймання ґрунту, товщина рост-верку 500 мм, ґрунт однорідний – пісок дрібний)

Крок палів і розміри рост-верку, м	L = 3 м Несуча здатність одиночної палі					L = 6 м Несуча здатність одиночної палі P=300 кН					L = 9 м Несуча здатність одиночної палі P=500 кН					L = 12 м Несуча здатність одиночної палі P=700 кН				
	N, кН	$\frac{N_p}{P_p}$ $\frac{кН}{кПа}$	L/b <sub>p</sub>	%	Середнє навант. на палю, кН	N, кН	$\frac{N_p}{P_p}$ $\frac{кН}{кПа}$	L/b <sub>p</sub>	%	Середнє навант. на палю, кН	N, кН	$\frac{N_p}{P_p}$ $\frac{кН}{кПа}$	L/b <sub>p</sub>	%	Середнє навант. на палю, кН	N, кН	$\frac{N_p}{P_p}$ $\frac{кН}{кПа}$	L/b <sub>p</sub>	%	Середнє навант. на палю, кН
	3d 2,4 x 2,4 A <sub>p</sub> =4,95	2800	$\frac{148,5}{30}$	1,25	5,3	294,6	3850	$\frac{232,65}{47}$	2,5	6,0	$\frac{401,9}{1,34}$	5100	$\frac{260,37}{52,6}$	3,75	5,1	$\frac{537,7}{1,08}$	6500	$\frac{255,42}{51,6}$	5	3,9
5d 3,6 x 3,6 A <sub>p</sub> =12,15	4400	$\frac{895,5}{73,7}$	0,83	20,4	389,4	5500	$\frac{1047,3}{86,2}$	1,67	19,0	$\frac{494,7}{1,65}$	6900	$\frac{1132,3}{893,2}$	2,5	16,4	$\frac{640,8}{1,28}$	8700	$\frac{1225,9}{100,9}$	3,33	14,1	$\frac{830,5}{1,19}$
7d 4,8 x 4,8 A <sub>p</sub> =22,23	5200	$\frac{2194,1}{98,7}$	0,625	42,2	334,4	6100	$\frac{2623,1}{118}$	1,25	43,0	$\frac{386,3}{1,29}$	7620	$\frac{2911,7}{131}$	1,875	38,7	$\frac{523,2}{1,05}$	8800	$\frac{2848,1}{128,1}$	2,5	32,4	$\frac{661,3}{0,95}$

На рис. 11 наведений графік залежності частки плити ростверку у навантаженні на фундамент від кроку паль при довжині паль 3 м, 6 м, 9 м, 12 м.

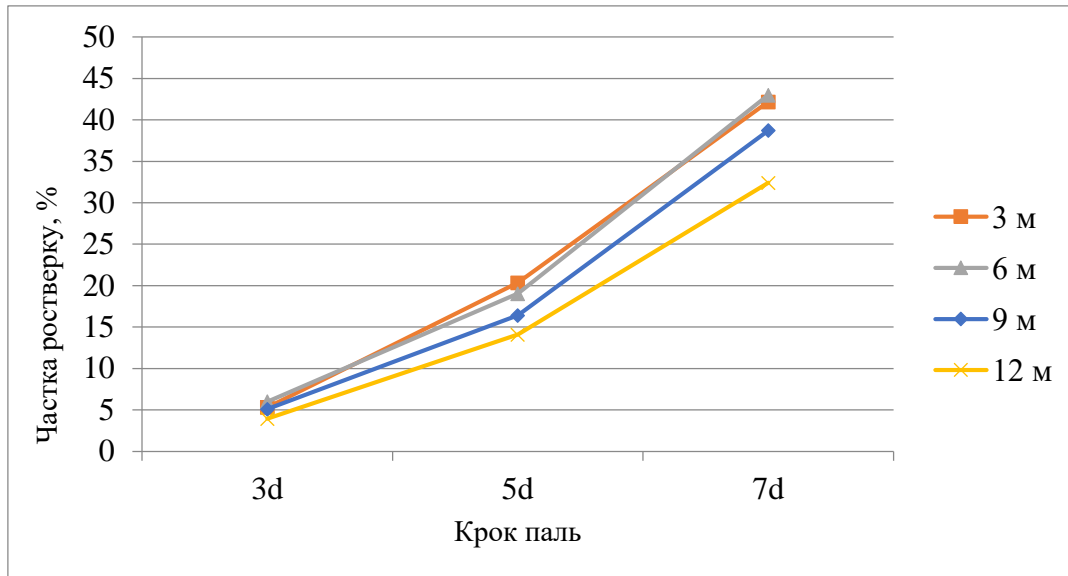


Рис. 11 – Графік залежності частки ростверку у навантаженні на стовпчастий пальовий фундамент від кроку паль

**За результатами чисельно-математичного моделювання, наведеними у табл. 4 та на рис. 11 можна зробити такі висновки.**

- частка ростверку залежить від довжини паль та осьової відстані між палями. При палях більшої довжини частка ростверку у навантаженні на фундамент знижується, оскільки площа по боковій поверхні паль досягає значної величини, тобто більшу частку навантаження сприймають палі. А при палях меншої довжини – навпаки збільшується.

- при збільшенні осьової відстані між палями частка ростверку у навантаженні на фундамент збільшується, оскільки площа плити ростверку збільшилась. А при мінімальній осьовій відстані між палями – зменшується.

- При малому кроці паль фундамент працює з основою як єдиний масив (умовний фундамент), при збільшенні відстані між палями ґрунт під подошвою ростверку в міжпальовому просторі краще реалізує свою несучу здатність.

- ступінь реалізації несучої здатності палі у складі пального фундаменту залежить від відносної довжини і кроку паль. Реалізація несучої здатності паль у складі фундаменту підвищується із збільшенням їх відносної довжини до 20, а далі починає знижуватись. Крок паль впливає на реалізацію несучої здатності палі неоднозначно. Найкращу реалізацію несучої здатності паль спостерігаємо при кроці 5d.

- реактивний опір основи під подошвою ростверка, як фундамента мілкового закладання 170 кПа. Навантаження, що припадає на ростверк пального фундаменту менше у порівнянні з навантаженням на ростверк, як фундамент мілкового закладання (табл. 4).

#### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Основи та фундаменти споруд: ДБН В.2.1-10-2009 зі зміною №1 та №2. - [Чинний від 2012-07-01]. – К.: Мінрегіонбуд України, 2009. – 161 с. – (Національні стандарти України).

3. Рекомендации по расчету свайных фундаментов с несущими ростверками: Р 5.01.015.05 – [Срок действия: с 1.01.2006 г. по 1.01.2011 г.]. – Минск: Научно-проектно-производственное республиканское унитарное предприятие «СТРОЙТЕХНОРМ», 2005. – 24с.

4. Маєвська І. В. Вплив виду ґрунту на сумісну роботу паль і ростверку в куцшовому пальному фундаменті / І. В. Маєвська, Н. В. Блащук, К. А. Чобанова // Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві. – 2013. – №2(15). – С.40-47.

5. Бартоломей А. А. Прогноз осадок свайных фундаментов / А. А. Бартоломей, И. М. Омельчак, Б. С. Юшков – М., Стройиздат, 1994. – 377 с. – Библиогр.: с. 374.
6. Цимбал С.Й., Карцева С.Л. Методика розрахунку пальових фундаментів з урахуванням роботи ростверку // Основи і фундаменти. – К.: КНУБА, 2004. – Вип. 28, с. 121-130.
7. Малишев О.М. Сумісна робота паль і ростверку у стовпчастому пальовому фундаменті/ О.М. Малишев, С.О. Цимбал, І.В. Маєвська, Н.В. Блащук // Тези регіональної науково-практичної інтернет-конференції студентів, аспірантів та молодих науковців ВНТУ, м. Вінниця, ВНТУ, 2017 р. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/mn/mn2018/paper/viewFile/3694/31033103>.
8. Блащук Н.В. Маєвська І.В., Попович М.М. Перерозподіл зусиль між елементами стовпчастого пальового фундаменту/„Сучасні технології, матеріали та конструкції в будівництві”, н/т збірник ВНТУ, Вінниця. – 2018. – №1(24). – С.36-44.

**Кримняк Ярослав Миколайович** — студент групи Б-19м, факультет будівництва теплоенергетики та газопостачання, Вінницький національний технічний університет, Вінниця; **E-mail:**

Науковий керівник: **Маєвська Ірина Вікторівна** — канд. техн. наук, доцент кафедри промислового та цивільного будівництва, Вінницький національний технічний університет. E-mail: [irina.mayevskaja@gmail.com](mailto:irina.mayevskaja@gmail.com) [maevska@vntu.edu.ua](mailto:maevska@vntu.edu.ua)

**Krumnyak Yaroslav Mykolayovych** — Department of Building Heating and Gas Supply, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia.

Supervisor: **Irina V. Mayevska** — Cand. Sc. (Eng), Assistant Professor of Building Heating and Gas Supply, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia.