

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПІДСИЛЕННЯ ФУНДАМЕНТУ МІЛКОГО ЗАКЛАДАННЯ КОРОТКИМИ ПАЛЯМИ У ПРОГРАМНОМУ КОМПЛЕКСІ PLAXIS 3D FOUNDATION

Вінницький національний технічний університет

Анотація

У роботі виконано математичне моделювання підсилення фундаменту мілкового закладання короткими палями у двох варіантах: підсилення у рівні підшоши існуючого фундаменту, підсилення від поверхні ґрунту. Для порівняння в обох варіантах розглянуті короткі та довгі палі. Для перевірки можливості визначення несучої здатності підсиленого фундаменту як умовного фундаменту мілкового закладання виконане математичне моделювання умовного фундаменту для обох варіантів конструктивного рішення. Проаналізовано отримані результати з порівнянням усіх варіантів.

Ключові слова: короткі палі, паля, підсилення, моделювання, ростверк.

Abstract

In the work is performed mathematical modeling strengthening the foundation of shallow laying with short piles in two version: strengthening at the level of the sole of the existing foundation, strengthening from the soil surface. For comparison, short and long piles are considered in both variant. To test the possibility of determining the bearing capacity of the strengthened foundation as a conditional foundation of shallow foundation, mathematical modeling of the conditional foundation for both variants of the design solution was performed. The obtained results are analyzed with a comparison of all options.

Keywords: short piles, pile, strengthening, modeling, grillage.

Вступ

На теперішній час сучасні комп'ютерні технології дають можливість виконувати складні математичні дослідження, розрахунки та моделювання для вирішенні задач з механіки ґрунтів.

Доволі популярним та вартим подальшого дослідження напружено-деформованого стану системи «паля-ростверк-основа» та «існуючий фундамент – палі підсилення - основа» є використання методів математичного моделювання на основі чисельних методів аналізу. Найпоширенішим із яких є метод скінченних елементів (МСЕ), який закладено в основу доволі сучасного програмного комплексу «Plaxis 3D Foundation» [1].

Не дивлячись на широке застосування пальових фундаментів і велику кількість досліджень, недостатньо вивченими є ряд факторів, що впливають на несучу здатність і осідання при їх роботі в різних ґрунтових умовах. Зокрема відомі з практики пропозиції щодо використання коротких паль підсилення не підкріплені жодними рекомендаціями стосовно методики їх розрахунку.

У даній роботі виконано математичне моделювання підсилення фундаментів короткими палями у двох різних варіантах, а саме підсилення з рівня підшоши існуючого фундаменту та підсилення з поверхні ґрунту, за допомогою програмного комплексу Plaxis.

При моделюванні передбачено дослідити підсилення фундаментів мілкового закладання з варіюванням кроку, довжини та розміщення паль, що дозволить з'ясувати доцільність використання коротких паль при підсиленні фундаментів.

Постановка задач та планування дослідження

Прийнятою початковою експериментальною моделлю є фундамент мілкового закладання висотою 300 мм, шириною 1 м, глибиною закладання 1 м та постійне навантаження, яке задаємо - 200 кН/м [2].

У першому варіанті виконуємо підсилення існуючого фундаменту короткими палями з головою у рівні підшви.

До розрахунку приймаємо такі параметри:

- тип палі – вдавлюванні з металевих труб;
- модель ґрунту – пружно-пластична модель Кулона-Мора;
- фундамент, що підсилюються – стрічковий мілкого закладання;
- палі довжиною 1,0 м з кроком 600 та 1200 мм;
- палі довжиною 5,0 м з кроком 600 та 1200 мм;
- діаметр палі 0,2 м;
- висота ростверку – 600 мм;
- ростверк – 2,6 м x 10 м;
- характеристики ґрунту: пісок дрібний, щільний $\gamma = 19,2 \text{ кН/м}^3$, $e = 0,59$, $c = 4 \text{ кПа}$, $\phi = 31^\circ$, $E = 28 \text{ МПа}$ [3].

Програма моделювання підсилення роботи фундаменту наведена у таблиці 1.

Таблиця 1 - Програма математичного моделювання підсилення роботи фундаменту у рівні підшви

| Група дослідів | Довжина та поперечний розмір палі | Крок палі |
|----------------|-----------------------------------|-----------|
| 1 | L = 1 м, d = 0,2 м | 600 мм |
| 2 | | 1200 мм |
| 3 | L = 5 м, d = 0,2 м | 600 мм |
| 4 | | 1200 мм |

У другому варіанті виконуємо підсилення існуючого фундаменту короткими палями без викопування траншей, заглиблюючи голову палі на 500 мм з метою улаштування ростверку. Такий спосіб доволі гарно мінімізує працю, витрачену на земляні роботи.

Параметри конструктивних та фізичних характеристик аналогічні попередньому варіанту.

У останньому етапі математичного моделювання виконаємо перевірку підсиленого фундаменту, як умовного, мілкого закладання з глибиною закладання в рівні нижніх кінців палі (відповідно 2,0 м та 6,0 м). При цьому ґрунто-пальовий масив моделюється як суцільний фундамент призматичної форми з питомою вагою, що дорівнює осередненому значенню питомої ваги бетону і ґрунту у складі умовного фундаменту. Ширина умовного фундаменту - 2,6 м.

У кожному з варіантів підсилення, за мету поставлено перевірити та порівняти чи збігатимуться результати випробувань та значення осідання при прикладанні однакового навантаження.

Виконання моделювання у програмному комплексі Plaxis 3D Foundation та аналіз отриманих результатів

Для чисельного моделювання сумісної роботи існуючого фундаменту і палі при його підсиленні було прийнято такі вихідні дані:

- палі підсилення (поперечний розмір $d=20 \text{ см}$, довжиною 1 та 5 м) з кроком $3d$ (34 шт.) та $6d$ (18 шт.) при варіанті підсилення фундаменту палями від рівня підшви (рис. 1), ростверк розмірами $2,6 \times 10 \text{ м}$;

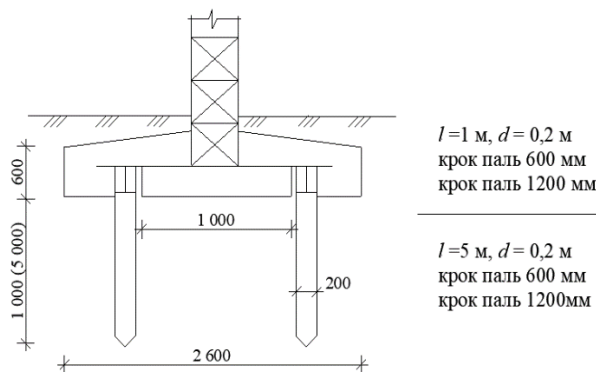


Рис. 1 – Модель підсилення фундаменту у рівні підшви

- палі підсилення (поперечний розмір $d=20$ см, довжиною 1 та 5 м) з кроком $3d$ (34 шт.) та $6d$ (18 шт.) при варіанті підсилення фундаменту палями з рівня поверхні ґрунту (рис. 2), ростверк розмірами $2,6 \times 10$ м;

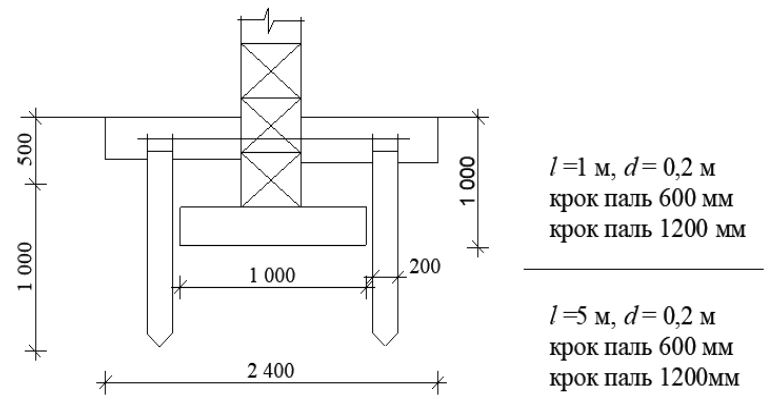


Рис. 2 - Модель підсилення фундаменту з рівня поверхні ґрунту

Моделі проєктованого фундаменту з кроком палей 600 мм та 1200 мм зображено відповідно на рис. 3 та 4.

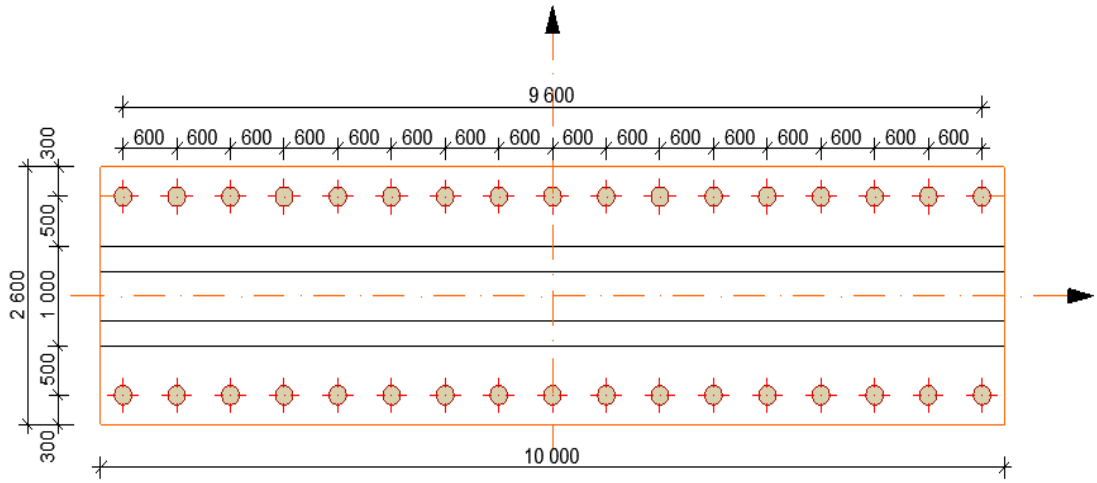


Рис. 3 – Модель фундаменту з розміщенням палей кроком 600 мм

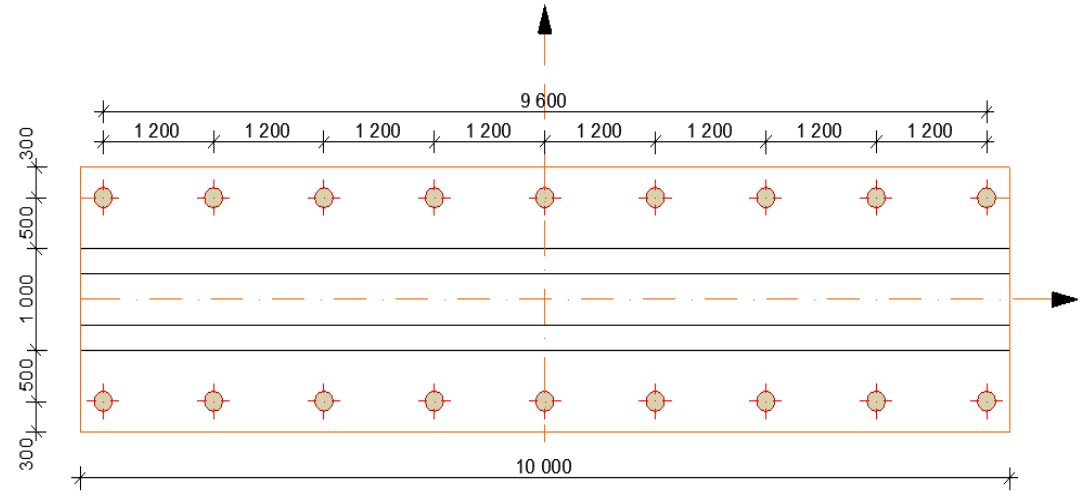


Рис. 4 – Модель фундаменту з розміщенням палей кроком 1200 мм

Механічна поведінка ґрунтів в даному програмному комплексі може бути змодельована за допомогою використання різних моделей ґрунту: модель Кулона-Мора; модель ґрунту, що ущільнюється; модель повзучості слабкого ґрунту (реологічна модель). Для розрахунку прийнято модель ґрунтів Кулона-Мора. Модель Кулона-Мора – пружно-пластична модель, що містить 5 основних параметрів: E і ν - параметри пружності ґрунту; c і φ - параметри міцності ґрунту та ψ - кут дилатансії [1].

При розрахунках з використанням моделі Кулона-Мора (як і для решти моделей), що реалізована в Plaxis, генеруються початкові горизонтальні напруження в ґрунті.

Моделювання поставлених задач у програмному комплексі Plaxis 3D Foundation було виконано у такій послідовності:

- моделювання ґрунтового масиву;
- моделювання існуючого фундаменту на відповідній глибині закладання ;
- моделювання ростверку та паль підсилення у відповідних координатах;
- вибір та задання ґрунтових умов: пісок дрібний, щільний з наступними характеристиками:

$\gamma = 19,2 \text{ кН/м}^3$; $e = 0,59$, $c = 4 \text{ кПа}$, $\varphi = 31^\circ$, $E = 28 \text{ МПа}$;

- прикладення навантаження;
- виконання побудови 3D моделей;
- перехід до розрахункової частини роботи.

При моделюванні були враховані наступні фази роботи:

- робота ґрунтової товщі без фундаменту (початкова фаза);
- влаштування стрічкового фундаменту мілкого закладання;
- робота стрічкового фундаменту мілкого закладання під дією вертикального навантаження до 200 кН/м.п. ;

- улаштування паль підсилення та об'єднання їх ростверком з існуючим фундаментом;

- сумісна робота існуючого фундаменту і паль при його підсиленні під дією вертикального навантаження, до досягнення заданої величини осідання (100 мм).

Наведемо моделі підсилення палями стрічкового фундаменту у варіанті закладання паль у рівні підшви, від поверхні ґрунту та методом умовного фундаменту на прикладі паль довжиною 1 м.

Модель підсиленого палями стрічкового фундаменту мілкого закладання в програмі Plaxis 3D Foundation при кроці 3d та 6d для паль підсилення довжиною 1 м, у варіанті закладання паль у рівні підшви приведена на рис. 5 та 6 відповідно.

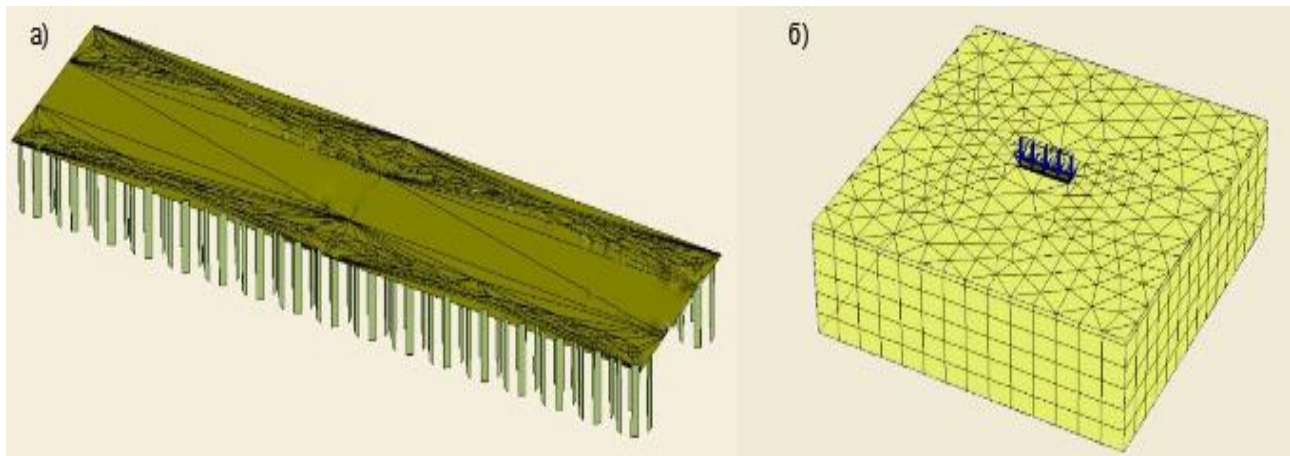


Рис. 5 – Розрахункова модель підсиленого палями фундаменту у варіанті закладання паль від рівня підшви при кроці паль 3d ($l=1 \text{ м}$) (а) та розташування моделі під дією вертикального навантаження в масиві ґрунту (б)

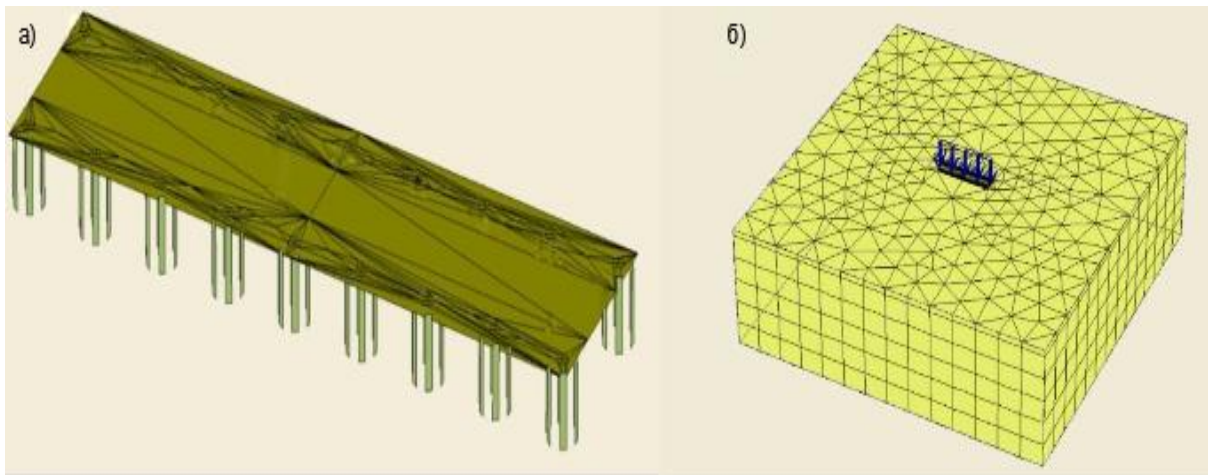


Рис. 6 – Розрахункова модель підсиленого палями фундаменту у варіанті закладання палей від рівня підшови при кроці палей $6d$ ($l=1$ м) (а) та розташування моделі під дією вертикального навантаження в масиві ґрунту (б)

Модель підсиленого палями стрічкового фундаменту мілко закладання при кроці $3d$ та $6d$ для палей підсилення довжиною 1 м, у варіанті закладання палей від поверхні ґрунту приведена на рис. 7 та 8 відповідно.

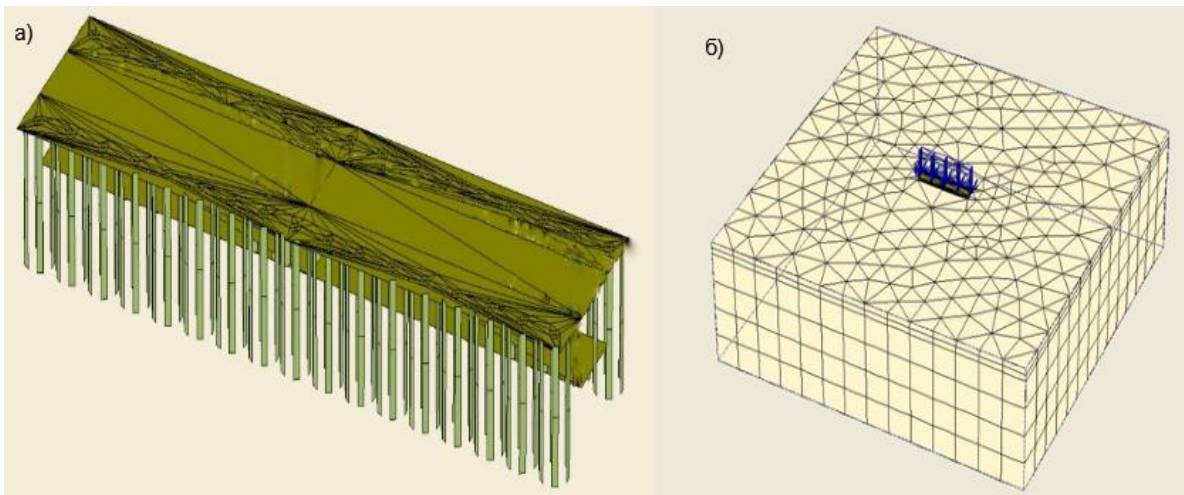


Рис. 7 – Розрахункова модель підсиленого палями фундаменту у варіанті закладання палей від поверхні ґрунту при кроці палей $3d$ ($l=1$ м) (а) та розташування моделі під дією вертикального навантаження в масиві ґрунту (б)

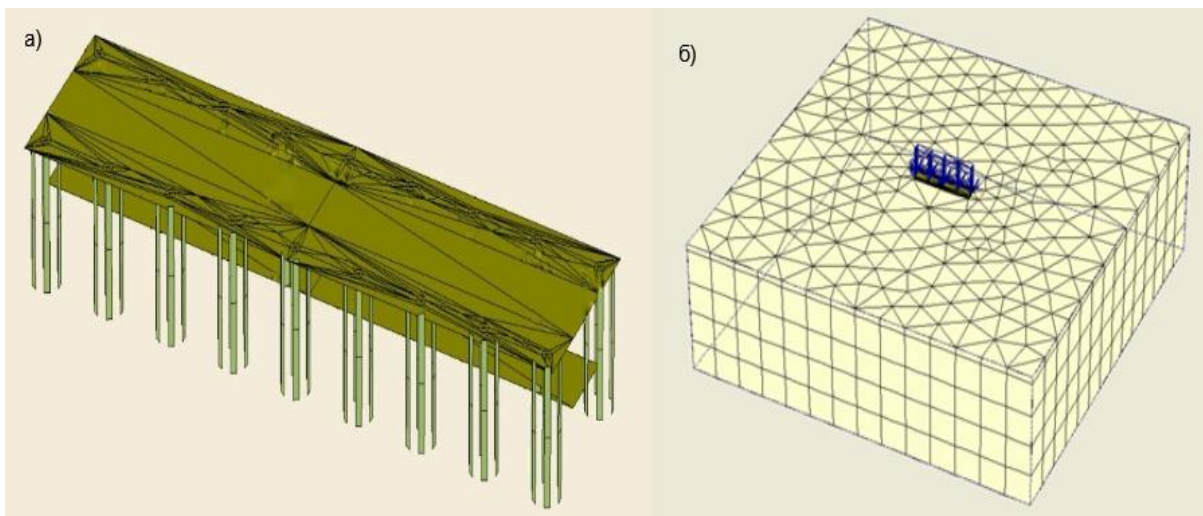


Рис. 8 – Розрахункова модель підсиленого палями фундаменту у варіанті закладання палей від поверхні ґрунту при кроці палей $6d$ ($l=1$ м) (а) та розташування моделі під дією вертикального навантаження в масиві ґрунту (б)

Модель підсиленого фундаменту у варіанті умовного довжиною 5 м приведено на рис. 9.

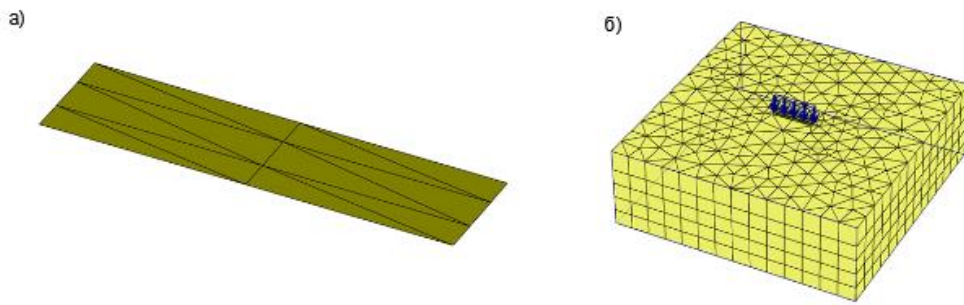


Рис. 9 – Розрахункова модель підсиленого фундаменту у варіанті умовного фундаменту довжиною 5 м

На рисунку 10 та 11 наведено приклад мозаїки деформацій ґрунтової основи для паль підсилення довжиною 1 та 5 м при поздовжньому кроці бд для двох варіантів підсилення та для моделювання підсиленого фундаменту як умовного.

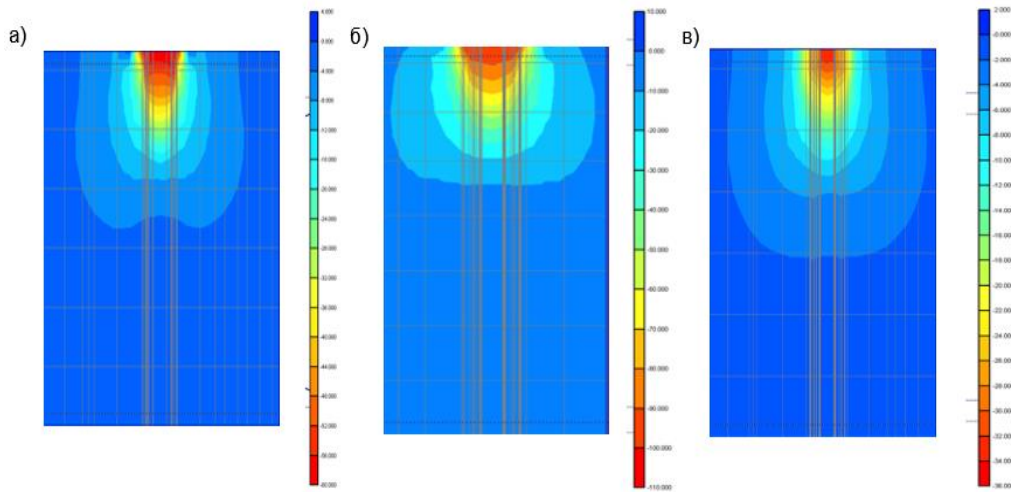


Рис. 10 – Мозаїки деформації ґрунту в основі підсиленого фундаменту паля 1 м: а) підсилення у рівні підшви; б) підсилення від поверхні; в) умовний фундамент

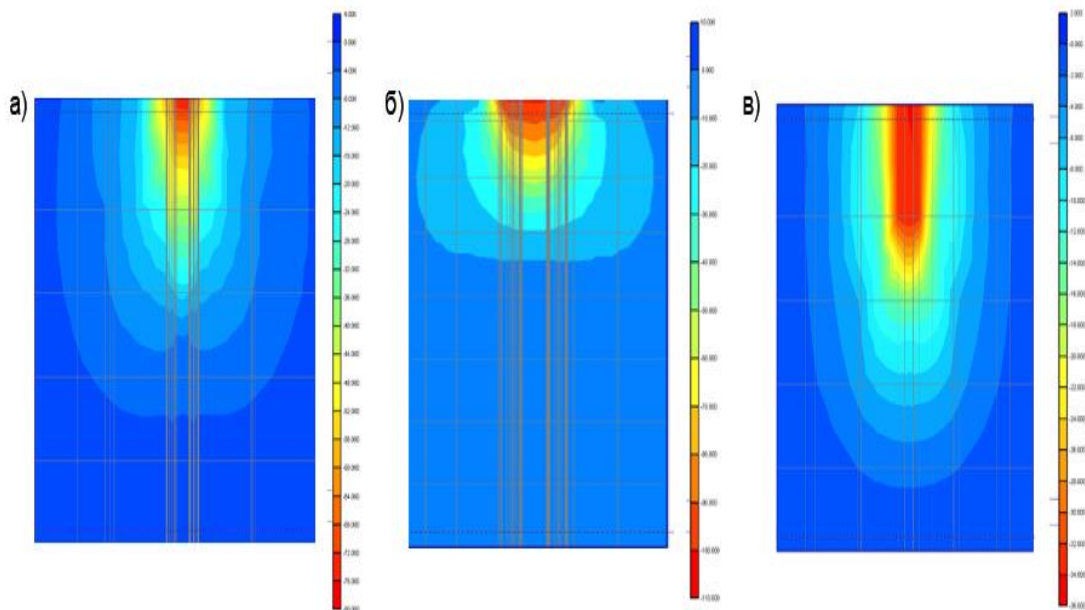


Рис. 11 – Мозаїки деформації ґрунту в основі підсиленого фундаменту паля 5 м: а) підсилення у рівні підшви; б) підсилення від поверхні; в) умовний фундамент

З мозаїк видно, що для коротких паль зона впливу напруженого стану для підсиленого палями фундаменту і умовного фундаменту практично однакові. Для більш довгих паль моделювання умовного фундаменту призводить до переміщення напруженої зони на значно більшу глибину. Таким чином підхід до розгляду пального фундаменту як умовного фундаменту мілкого закладання при підсиленні стрічкових фундаментів може бути прийнятним лише для варіанту коротких паль.

На рисунку 12 наведено мозаїки деформацій ґрунту в основі фундаменту при підсиленні палями довжиною 5 м від підшови з поздовжнім кроком 6d на різних етапах роботи: робота існуючого стрічкового фундаменту до підсилення (рис. 12, а); влаштування паль підсилення (рис. 12, б); об'єднання паль підсилення з існуючим фундаментом мілкого закладання (рис. 12, в); збільшення навантаження на підсилений палями фундамент (рис. 12, г).

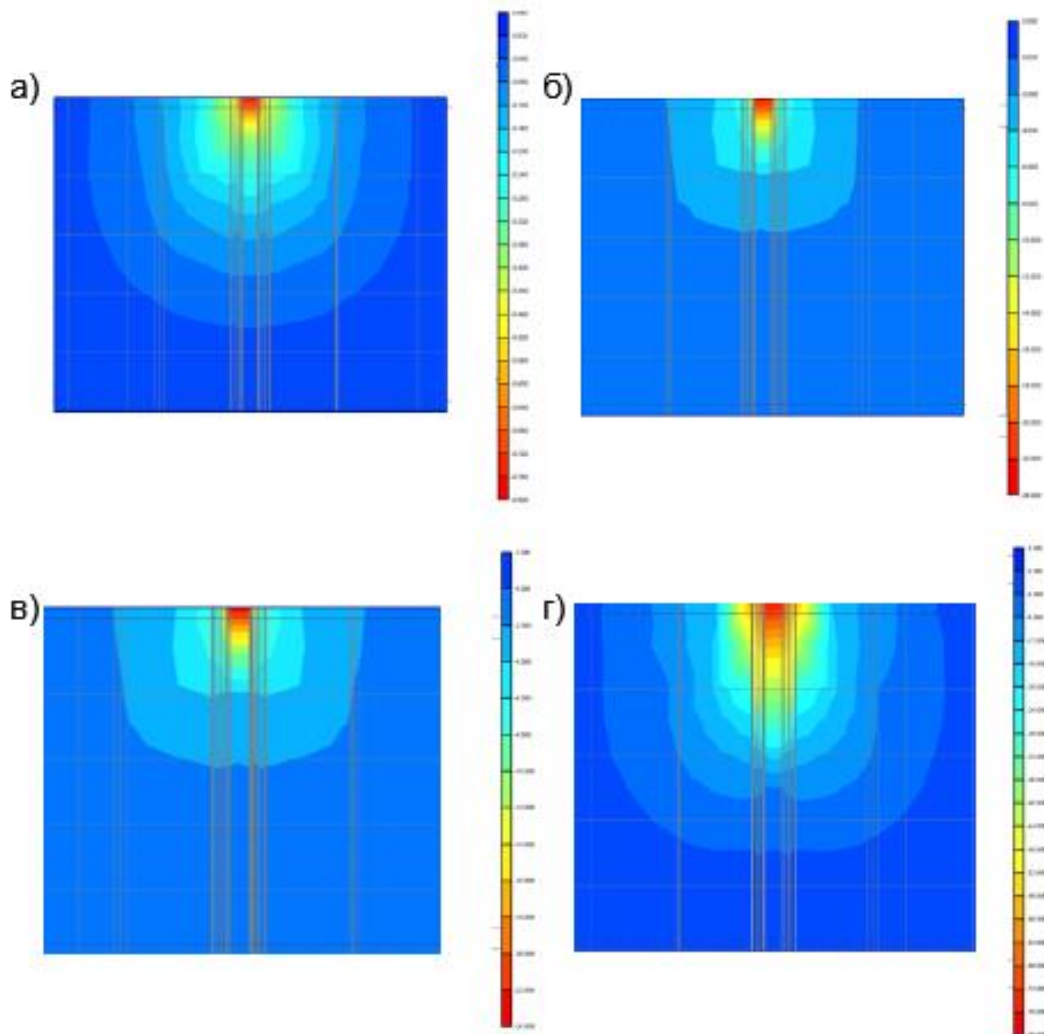


Рис. 12 - Мозаїки деформації ґрунту в основі фундаменту при підсиленні палями довжиною 5 м з поздовжнім кроком 6d на різних етапах роботи: а – існуючий фундамент до підсилення; б – влаштування паль підсилення; в – об'єднання паль підсилення з існуючим фундаментом; г – довантаження

Виконавши математичне моделювання підсилення стрічкового фундаменту у трьох варіантах в програмі Plaxis 3D Foundation, було отримано результати по залежностях осідання від навантаження при різних довжинах та кроці паль.

I - моделювання сумісної роботи існуючого фундаменту і паль при його підсиленні на однорідній піщаній основі при сталій відстані між рядами 600 мм палі довжиною 1 та 5 м.

На рисунку 13 наведено графіки залежності осідання – навантаження фундаменту до I стадії та після підсилення - II стадії при кроці паль 600 мм, довжиною паль 1 та 5 м. Крива осідання-навантаження для I стадії роботи фундаменту до підсилення для розглянутих випадків практично співпадає.

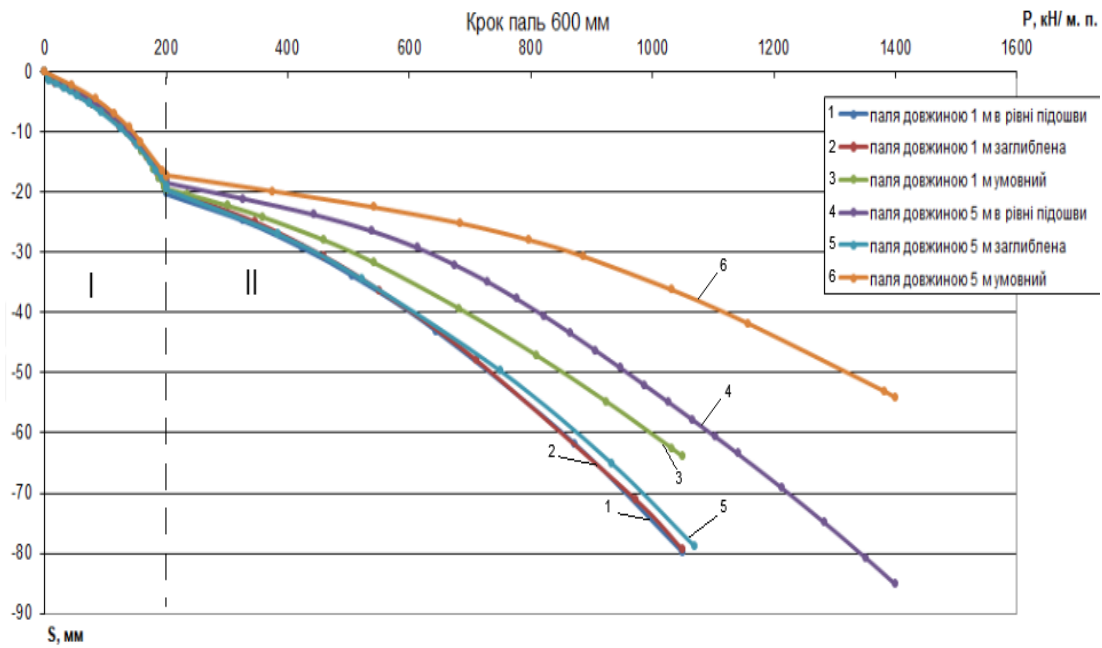


Рис. 13 – Графіки залежності осідання – навантаження фундаменту з кроком паль 600 мм:
 I стадія – робота фундаменту до підсилення; II стадія – робота підсиленого палями фундаменту

II - моделювання сумісної роботи існуючого фундаменту і паль при його підсиленні на однорідній піщаній основі при сталій відстані між рядами 1200 мм паль довжиною 1 та 5 м.

Характеристики піщаного ґрунту: пісок середньої крупності, $\gamma = 19,2 \text{ кН/м}^3$; $e = 0,59$, $c = 4 \text{ кПа}$, $\varphi = 31^\circ$, $E = 28 \text{ МПа}$.

На рисунку 14 наведено графіки залежності осідання – навантаження фундаменту - I стадія та після підсилення II – стадія при кроці паль 1200 мм, довжина паль 1 та 5 м.

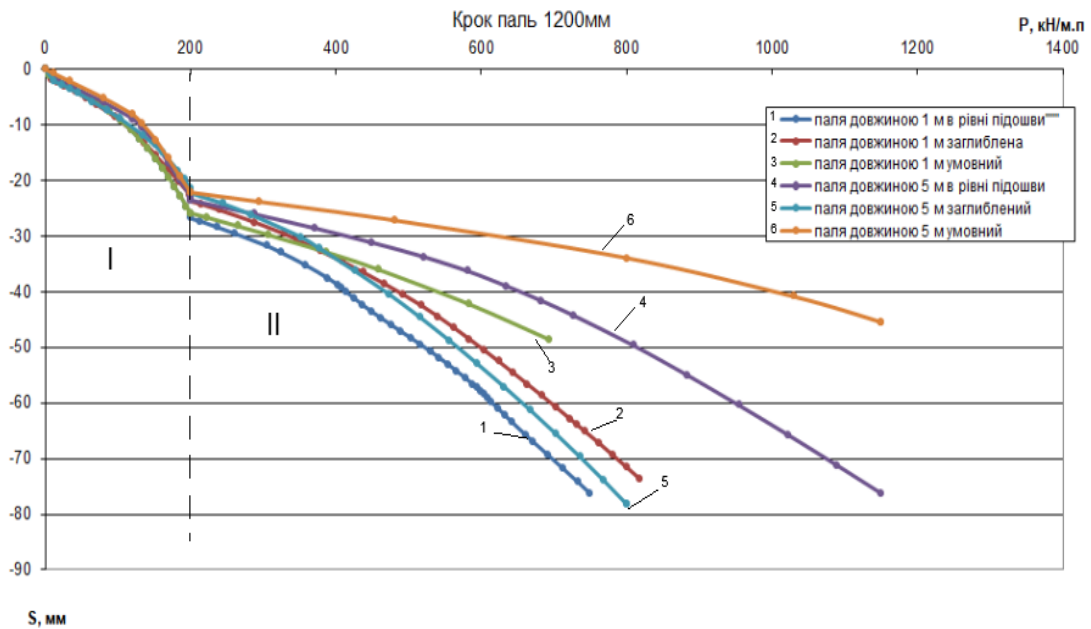


Рис. 14 – Графіки залежності осідання – навантаження фундаменту з кроком паль 1200 мм:
 I стадія – робота фундаменту до підсилення; II стадія – робота підсиленого палями фундаменту

З одержаних залежностей видно, що в випадку підсилення фундаменту короткими палями різниці в поведінці підсиленого фундаменту при улаштуванні їх від рівня підшви або від рівня поверхні ґрунту практично не спостерігається. При підсиленні ж більш довгими палями ця різниця є доволі суттєвою. Збільшення глибини закладання нижнього кінця палі при підсиленні від рівня

підшви призводить до покращення роботи фундаменту (при однакових осіданнях він може сприйняти більше навантаження).

Моделювання підсиленого фундаменту як умовного ґрунто-пального масиву показало, що перехід до проектування підсиленого фундаменту як до такого масиву може призвести до завищення очікувань і відповідно до ненадійного рішення. Слід при цьому відзначити, що найкраща збіжність між поведінкою підсиленого фундаменту та відповідного умовного фундаменту спостерігається для коротких паль при кроці 3d (600 мм).

Такий крок відповідає оптимальному кроку 0,6 м, одержаному за пропозиціями, висунутими у роботах Самородова А. В. [4].

За отриманими результатами було визначено та побудовано залежність несучої здатності фундаменту після підсилення, в залежності від виду конструктивного рішення варіанту підсилення і кроку паль.

У таблиці 2 та на рисунку 15 наведено залежність несучої здатності паль кроком 600 та 1200 мм, довжиною 1 та 5 м у варіанті підсилення від підшви, від поверхні та у вигляді умовного фундаменту при значенні осідання $s = 60$ мм.

Таблиця 2 - Несуча здатність підсиленого фундаменту за даними ПК Plaxis при $s=60$ мм

| | крок 600 мм | крок 1200 мм |
|------------------|-------------|--------------|
| 1 м від підшви | 860 | 610 |
| 1 м від поверхні | 860 | 700 |
| 1 м умовний | 1000 | - |
| 5 м від підшви | 1100 | 950 |
| 5 м від поверхні | 880 | 660 |
| 5 м умовний | 1500 | - |

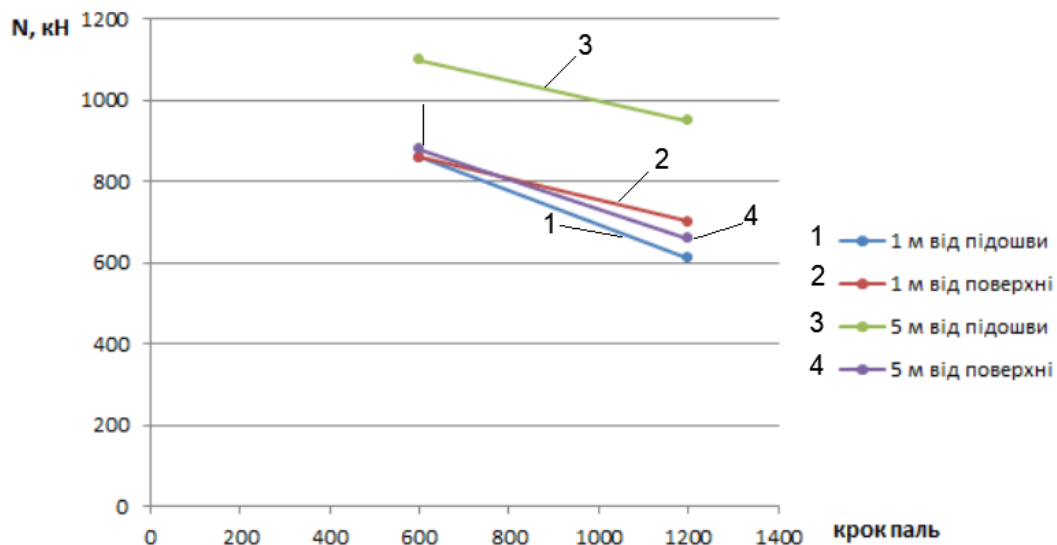


Рис. 15 – Графіки залежності несучої здатності підсиленого фундаменту при $s = 60$ мм від кроку паль

Дослідження показало, що збільшення кроку паль призводить до зменшення несучої здатності підсиленого фундаменту як для коротких, так і для довгих паль, а розгляд фундаментів як умовних масивів найбільш відповідає варіанту з кроком паль 3d (600 мм).

За результатами отриманих даних було виконано також порівняння несучої здатності підсиленого фундаменту, визначеної у ПК Plaxis, з несучою здатністю, визначеною за нормами проектування. При визначенні несучої здатності коротких паль при цьому використовувалась методика, запропонована в нормах [3] для коротких паль (п. Н.6). Несуча здатність підсиленого фундаменту визначалась за методикою, запропонованою у [5].

Для випадку підсилення фундаментів мілкого закладання буроін'єкційними палями із жорстким об'єднанням їх з існуючим фундаментом повинна виконуватись умова

$$\sum N^{\text{II}} \leq N_1^{\text{II}} + \frac{N_2^{\text{I}}}{\gamma_{f-\text{mt}}} \quad (1)$$

де $\sum N^{\text{II}}$ - сумарне розрахункове вертикальне навантаження для другої групи граничних станів на рівні підшви підсиленого фундаменту, кН.

Згідно з рекомендаціями норм [5] на палі має передаватись додаткове навантаження зверх того, що сприймає існуючий фундамент до підсилення.

Для непросідаючої основи

$$N_1^{\text{II}} = \sigma_{\text{mt}} \cdot A \quad (2)$$

де σ_{mt} - середня напруга, кПа, на підшві фундаменту при виконанні умови $\sigma_{\text{mt}} \leq R$.

У нашому випадку до навантаження, що сприймалось існуючим фундаментом мілкого закладання до підсилення (200 кН/м) додавалась несуча здатність паль підсилення. Для умовного фундаменту визначався розрахунковий опір під його підшвою, який був помножений на площу цієї підшви. Результати наведено у таблиці 3.

Таблиця 3 - Порівняння несучої здатності підсиленого фундаменту

| Крок паль | Тип підсилення | Несуча здатність фундаменту, кН | | |
|--------------|------------------|---------------------------------|--------------------------|--------------------------------------|
| | | За Plaxis при s = 60 мм | За ДБН | |
| | | | Несуча здатність палі | Несуча здатність підсиленого ф-ту |
| 3d (600 мм) | 1 м від підшви | 860 | 105 | 550 |
| | 1 м від поверхні | 860 | 105 | 550 |
| | 1 м умовний | 1000 | | 1098(R=462) |
| | 5 м від підшви | 1100 | 175 | 783 |
| | 5 м від поверхні | 880 | 168 | 760 |
| | 5 м умовний | 1500 | | 2590(R=1115) |
| 6d (1200 мм) | 1 м від підшви | 610 | 105 | 375 |
| | 1 м від поверхні | 700 | 105 | 375 |
| | 5 м від підшви | 950 | 175 | 492 |
| | 5 м від поверхні | 660 | 168 | 480 |

Як бачимо з таблиці, умовний фундамент для коротких паль адекватно характеризує підсилений пальовий фундамент, хоча і з деяким завищенням очікувань, а для довгих паль розрахунок підсиленого пального фундаменту як умовного за методикою норм стає неприйнятним.

Результати розрахунків також показали, що несуча здатність підсиленого фундаменту, одержана за моделювання в Plaxis, перевищує несучу здатність, підраховану за рекомендаціями норм. Отже, реалізація несучої здатності паль і ростверку новоствореного пального фундаменту при підсиленні покращує спільну роботу його елементів, для коротких паль у 1,5 рази, для більш довгих паль у 1,3-1,4 рази.

Порівняння несучої здатності підсиленого фундаменту при застосуванні коротких та довгих паль показує, що при збільшенні довжини паль у 5 разів, а їх несучої здатності як одиночних на 70% призводить до збільшення несучої здатності підсиленого фундаменту лише на 25-35%. Це вказує на те, що ефективність застосування коротких паль підсилення вища у порівнянні з довгими.

Висновки

1. Застосування коротких паль при підсиленні стрічкових фундаментів (довжина паль сумірна з шириною ростверка підсиленого фундаменту) є достатньо ефективним. Перехід від коротких до довгих паль, що мають на 70% більшу несучу здатність, збільшує несучу здатність підсилюваного фундаменту лише на 25-35%.

2. Найбільш оптимальним варіантом розміщення паль підсилення є розміщення їх з кроком, який відповідає розміру підшви умовного фундаменту навколо одиночної палі.

3. При використанні коротких паль підсилення для попередніх розрахунків можна розглядати новостворений пальовий фундамент як умовний фундамент мілкого закладання не тільки для визначення осідання, а і для визначення несучої здатності. Для довгих паль такий варіант є неприйнятним.

4. При використанні коротких паль варіанти підсилення з розміщенням голови палі в рівні підшви існуючого стрічкового фундаменту та з розміщенням голови палі безпосередньо під вимощенням призводять практично до однакового ефекту, тоді як для довгих паль варіант з розміщенням голови палі в рівні підшви існуючого стрічкового фундаменту дає значно кращий ефект.

5. При використанні коротких паль ефективно переходити до варіанту підсилення, коли немає потреби у відкопуванні траншей до рівня підшви існуючого фундаменту, з розміщенням ростверку новоствореного фундаменту в рівні вимощення або підлоги. Такий варіант виключає трудомісткі роботи з ручного відкопування траншей, а також дозволяє виконувати роботи з підсилення не малими захватками, а довільним чином. Загалом це дає можливість значно скоротити витрати праці, часу та коштів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Маєвська І. В., Блащук Н.В. Урахування роботи ростверку у складі стрічкових пальових та підсиленних палями фундаментів : монографія. Вінниця : ВНТУ, 2013. 183 с.

2. Маєвська І. В., Городнік Л. А. Планування експерименту дослідження підсилення фундаменту мілкого закладання короткими палями. *Інноваційні технології в будівництві*: тези міжнар. наук.-техн. конф. м. Вінниця, 10-12 лист. 2020 р. Вінниця, 2020. URL: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/itb/itb2020/paper/view/10847>.

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

4. Самородов А.В. Проектирование эффективных комбинированных свайных и плитных фундаментов многоэтажных зданий: монография. Харьков: «Типография Мадрид», 2017. 204 с.

5. ВБН В.2.1-1-97. Підсилення фундаментів будівель та споруд, побудованих на лесових грунтах, бурюін'єкційними палями. [Чинний від 1998-05-01]. К.: Укрмонтажспецбуд, 1997. 42 с. (Національні стандарти України).

Городнік Лілія Анатоліївна — студентка групи Б-20м, факультет будівництва теплоенергетики та газопостачання, Вінницький національний технічний університет, Вінниця; e-mail: lb.16b.zabashanska@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

Horodnik Liliia — Department of Building Heating and Gas Supply, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia. E-mail: lb.16b.zabashanska@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