

## Оцінка впливу просторової жорсткості ростверку на напружено-деформований стан пальових фундаментів будинку

Вероніка Жук<sup>1</sup>, Олександра Альошкіна<sup>2</sup>, Олександр П'ятков<sup>3</sup>

Київський національний університет будівництва і архітектури

31, просп. Повітрофлотський, Київ, Україна, 03037

<sup>1</sup>zhuk.vv@knuba.edu.ua, orcid.org/ 0000-0002-1114-3192

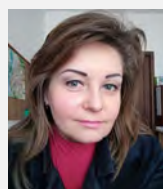
<sup>2</sup>aloshkina\_os@knuba.edu.ua

<sup>3</sup>av.pyatkov@gmail.com, orcid.org/ 0000-0001-8797-151X

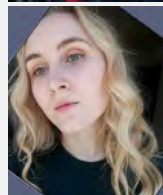
DOI: 10.32347/0475-1132.46.2023.73-87

**Анотація.** Забезпечення громадян житлом є однією з актуальних проблем в Україні. Обмежена кількість поверхів дозволяє використовувати таке архітектурно-планувальне рішення для кварталів відкритого типу (внутрішні території при такому плануванні залишаються більш відкритими, прозорими та створюють відчуття вільного простору). Задля вирішення цієї проблеми насамперед необхідно приймати конструктивно- та економічно-доцільні рішення на стадії проектування. Головною задачею проектувальника є розробка конструкцій для безпечної та ефективної роботи споруди. Ці фактори залежать від розробки конструктивної схеми будівлі та коректності розрахунку. Розвиток сучасних технологій та наявність різноманітних програмних комплексів дозволяють виконати такі розрахунки та реалізувати врахування взаємодії елементів системи «основа-фундамент-надземні конструкції», що є обов'язковим для сучасного проектування.

Комп'ютерне моделювання за допомогою різноманітних програмних комплексів дозволяє відслідковувати формування напружено-деформованого стану в несучих конструкціях споруди залежно від деформаційних властивостей ґрунтової основи на будівельному майданчику, а також залежно від зміни параметрів конструкцій самого будинку. Усебічний аналіз вихідних даних, аналіз інженерно-геологічних умов майданчика, врахування планувально-конструктивної схеми будинку, а також виконання комплексного числового дослідження напружено-деформованого стану елементів будівлі дозволяє відслідковувати вплив зміни параметрів фундаментів на перерозподіл деформацій та напружень у всіх конструктивних елементах споруди. Отже, виконання комп'ютерного моделювання дає змогу обрати раціональний тип фундаментів, що буде відповідати не тільки вимогам по



**Вероніка Жук**  
доцент кафедри  
геотехніки  
к.т.н., доц.



**Олександра Альошкіна**  
магістр кафедри  
геотехніки



**Олександр П'ятков**  
доцент кафедри  
геотехніки  
к.т.н., доц.

надійності, але й буде економічно ефективним одночасно.

У роботі представлено результати порівняння варіантів суцільного плитного та стрічкового ростверку фундаментів будинку на напружено-деформований стан фундаментних конструкцій. Проведене дослідження підтверджує, що перехід від стрічкового варіанту ростверків на плитний спричиняє зміну характеру деформування будинку. Показано, що використання варіативного проектування фундаментів, дає можливість запроєктувати надійний та одночасно економічно ефективний варіант фундаментів. За результатами дослідження було обґрунтовано вибір раціонального варіанту фундаментних конструкцій.

**Ключові слова.** Числове моделювання, напружено-деформований стан, ростверк, паловий фундамент, жорсткість фундаменту.

## ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Числове моделювання з використанням сучасних засобів автоматизації розрахунків дозволяє отримати дані напружено-деформованого стану (НДС) в несучих конструкціях будинку, а отже, є можливість досліджувати зміну НДС елементів системи «грунтова основа – фундамент – надземна частина будинку» залежно від зміни параметрів будь-яких елементів цієї системи.

Виконання комп'ютерного моделювання із застосуванням варіативних розрахунків забезпечує можливість пошуку раціонального варіанту фундаментів, який відповідатиме не тільки вимогам по надійності, але й буде при цьому економічно ефективним.

## АНАЛІЗ ПОПЕРЕДНІХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Авторами публікації [2] проведено дослідження різних варіантів розташування паль для вибору ефективного. Проведений розрахунок пального поля, розробленого за традиційною схемою «регулярна сітка» із заданим кроком, проведений аналіз роботи паль в різних зонах. Виявлено, що найбільш завантаженими палями є периферійні. Отримано, що палове поле сприймає ~89% від загального навантаження. При застосуванні раціонального розташування паль було зменшено їх кількість на 18% (шляхом збільшення кількості паль в периферійній зоні та зменшення їх кількості у середній). При розташуванні паль за регулярною сіткою, вони не потрапляють під несучі конструкції споруди, що спричиняло зростання згинальних моментів у плитному ростверку.

Авторами дослідження [7] встановлено, що несуча здатність одиночної палі та палі у куці змінюється протягом часу. При випробуванні через 6 днів після забивання, несуча здатність палі у куці виявилася на 12% меншою порівняно із одиночною. Але при випробуванні через 30 діб ситуація змінилась, несуча здатність палі у куці стала більшою на 8% за несучу здатність одиночної палі. Зафіксовано закономірності передачі навантаження в групах паль з різною кількістю:

найбільш завантаженими виявилися кутові палі, а найменш – центральні.

Авторами статті [1] було проведено числове моделювання двох висотних будинків та аналіз напружень і деформацій фундаментної плити. Зафіксовано, що найбільші осідання спостерігається в зоні ядра жорсткості будинку та біля паркінгу. На думку авторів на розподілення навантаження впливає етапність будівництва. Максимальні значення згинальних моментів виявлені під ядром жорсткості та основними несучими конструкціями. Але для їх сприйняття не потрібні значна кількість арматури, бо раціональне розташування паль допомагає уникнути цього.

В публікації [3] були наведені рекомендації щодо моделювання елементів системи «основа– фундамент – будівля» в умовах нерівномірних деформацій просідання лесових ґрунтів при водонасиченні. Була запропонована методика варіаційних розрахунків. НДС ґрунтової основи та несучих конструкцій каркасної будівлі чуттєво реагує на вплив кожного з елементів системи: власна жорсткість будівлі, конструкція та жорсткість фундаментів, потужність просідаючої товщі, положення зони замочування та її розміри, властивості лесового ґрунту тощо.

Дослідження [4] присвячено різним варіантам моделювання фундаментної плити: 1 - двовимірними елементами оболонки, 2 – двовимірними елементами товстої оболонки, 3 - об'ємними скінченими елементами (СЕ), використано метод МСЕ з врахуванням характеристик бетону. Різниця між варіантами #1 та #2 є незначною для значень згинальних моментів та їх розподілу по плиті, але є відчутною для розподілу поперечних сил. Метод з використанням об'ємних СЕ дозволяє описати роботу фундаментної плити, яка найбільш наближена до реальної. Автори стверджують, що для будівель не підвищеної відповідальності можна використовувати двовимірні СЕ, але для більш складних задач використання тривимірних СЕ є необхідним, так як це дозволяє більш точно аналізувати НДС споруди та досліджувати розповсюдження деформацій як в площині, так і в товщині плити.

Врахування різних типів нелінійності в системі «основа– фундамент – надземна конструкція» є важливою складовою розрахунку [5]. Популярною є пружна модель ґрунтової основи (з роботи виключаються пластичні деформації ґрунту), але така модель дає значну похибку в розрахунках. Існує 4 типи нелінійності: фізична, геометрична, конструктивна та генетична. Ефективним методом їх врахування є побудова розрахункової моделі з використанням об'ємних фізично-нелінійних СЕ. Однак моделювання ґрунтового масиву в ПК «ЛІРА-САПР-2013» не дає можливості врахувати водонасичення ґрунтів, та об'ємні СЕ не враховують пористість та вологість ґрунту. Також важливим є врахування етапності зведення будинку. Автори пропонують виконати це за допомогою програми «Монтаж».

Важливим етапом в проектуванні є вибір моделі деформованого ґрунтового середовища. Авторами дослідження [6] було розглянуто два варіанти моделювання взаємодії фундаменту з основою: одновузловим скінченим елементом СЕ-51, що має тільки вертикальну жорсткість та пружним об'ємним скінченим елементом. Виявлено, що результати за цими двома варіантами значно відрізняються. При використанні спрощеної моделі деформованого середовища деформативність ґрунту значно зменшена, що впливає на зменшення згинальних моментів в плитному ростверку.

## МЕТА РОБОТИ

Метою дослідження є пошук раціональних параметрів фундаментів будинку за результатами дослідження впливу просторової жорсткості пальового фундаменту на НДС фундаментних конструкцій.

Об'єкт дослідження - взаємодія конструкцій фундаменту з основою та надземними конструкціями в залежності від розмірів ростверку, габаритів та розташування паль.

Предмет дослідження - напружено-деформований стан фундаментів будинку.

Задачі, що були поставлені для досягнення мети:

- оцінка впливу просторової жорсткості пальового фундаменту на величину осідання фундаментів будинку.
- дослідження зміни внутрішніх зусиль у ростверку залежно від товщини ростверку та розташування паль.
- аналіз перерозподілу навантажень на палі при різних конфігураціях пальового фундаменту.

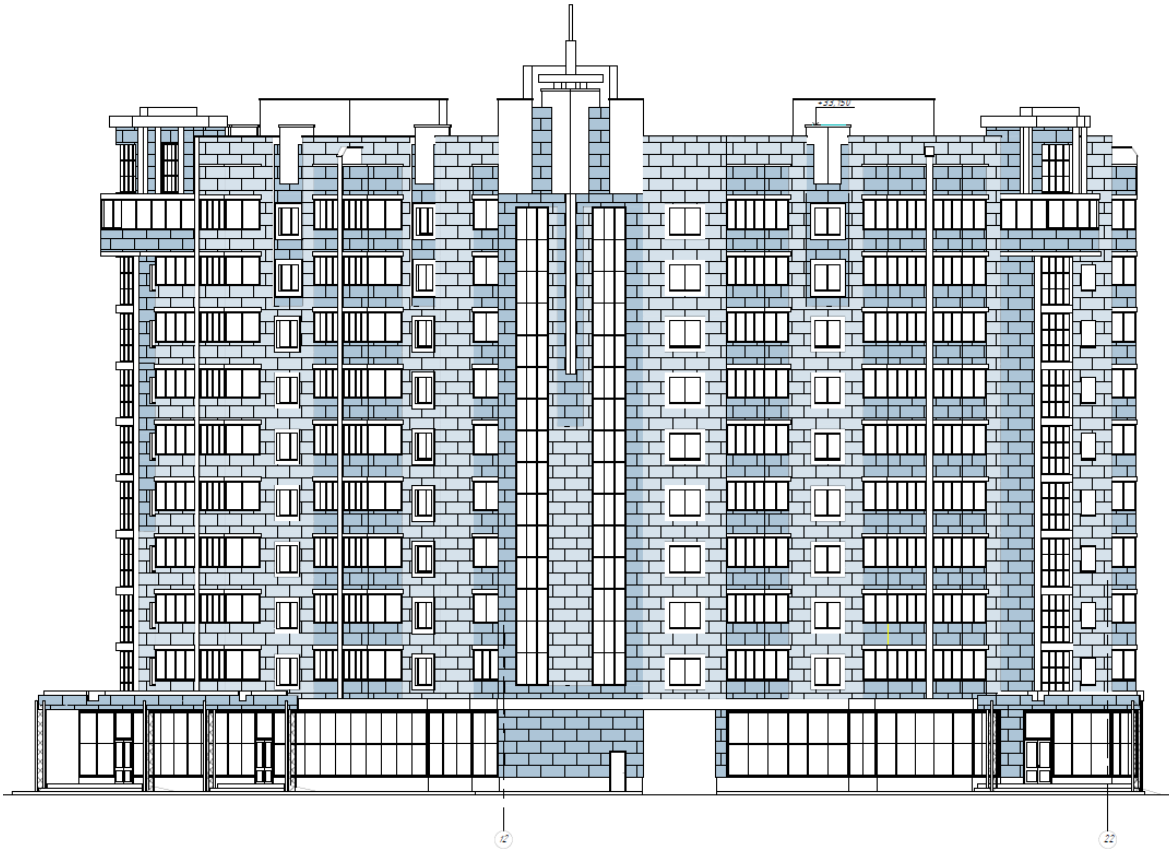
## ОСНОВНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ

Дослідження було виконано на прикладі 10-ти поверхової будівлі з торгівельними приміщеннями на першому поверсі (рис. 1) в м. Ірпінь. Конструктивна схема будинку – безкаркасна стінова з поздовжніми та поперечними несучими стінами з цегли. Вибір об'ємно-планувального рішення, поверховості будівлі, оформлення фасадів обумовлений сформованою структурою кварталу, необхідністю забезпечення нормативної інсоляції, благоустрою та транспортною доступністю. Просторова жорсткість споруди забезпечується горизонтальними дисками жорсткості, що створюються плитами перекриття, залізобетонними поясами, а також вертикальним ядром жорсткості, що являє собою сходово-ліфтовий вузол.

Розрахунок системи «основа – фундамент - надземні конструкції» проводився за допомогою методу скінчених елементів у програмному комплексі «ЛІРА-САПР-2016», що забезпечило можливість відслідковувати зміни в напружено-деформованому стані всієї споруди при зміні будь-якого компоненту системи. Ґрунтові умови були задані за допомогою модуля «ЛІРА-ҐРУНТ».

В геологічній будові майданчика будівництва (рис. 2) до розвіданої глибини 23,6 м було виділено 6 інженерно-геологічних елементів (ІГЕ), характеристики яких наведено у табл. 1. Гідрогеологічні умови ділянки будівництва характеризуються наявністю водоносного горизонту, який зустрічається на глибині 5,5...5,6 м, в межах абсолютних відміток 94,3...94,2 м. Живлення водоносного горизонту відбувається за рахунок інфільтрації атмосферних опадів.

a)



b)

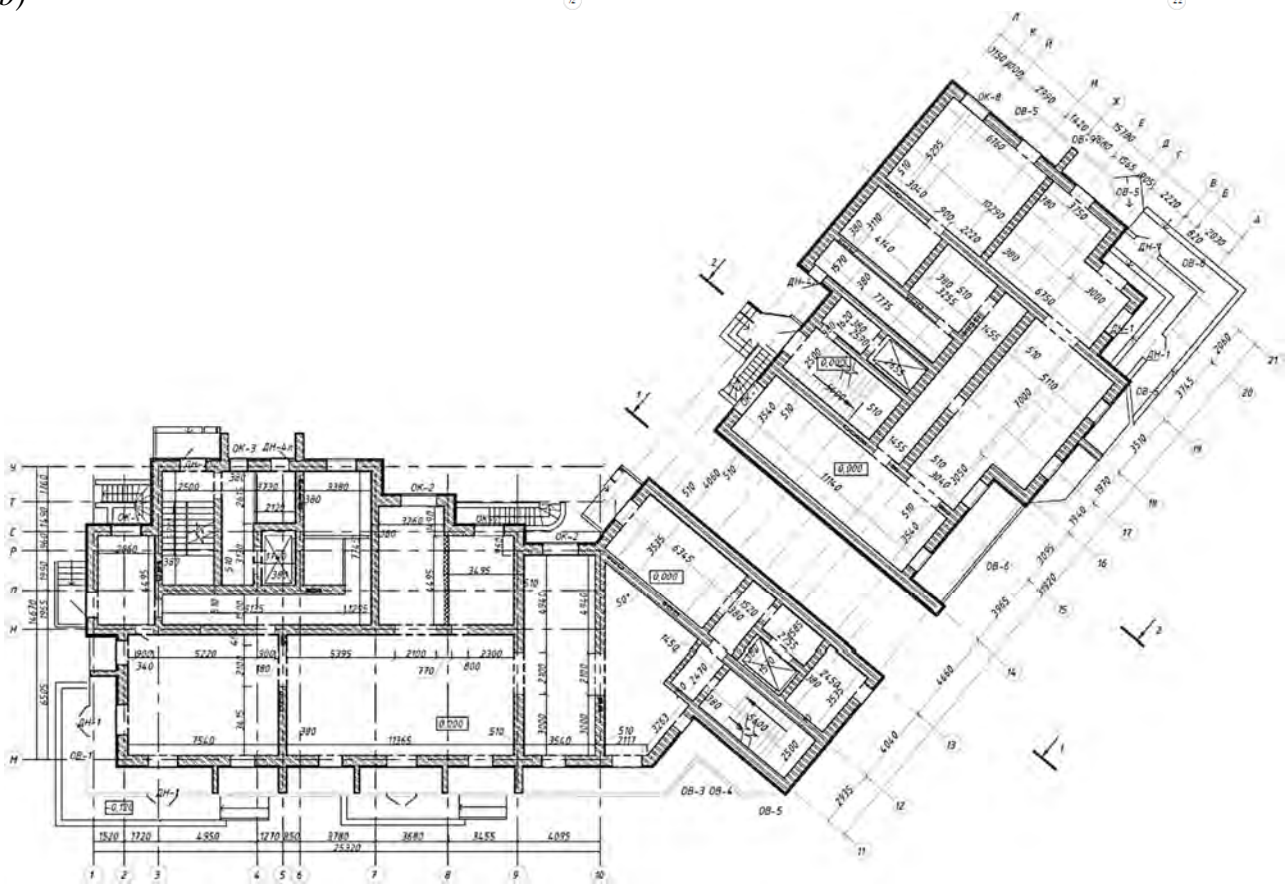


Рис.1 Архітектурно-планувальне рішення будинку: *a* -фасад, *b* – план 1-го поверху.  
 Fig.1 Architectural planning decision of the building: *a* – façade; *b* – 1st floor plan.

Пальовий фундамент будинку запроєктовано із буроін'єкційних паль діаметром 420 мм довжиною 9 м. Несучим шаром паль обрано ПГЕ-6 (рис. 2). Несуча здатність одиначної палі по ґрунту  $F_d=1053,7$  кН. Розрахункова необхідна кількість паль під будинок - 159 паль.

Виконане дослідження було присвячено аналізу впливу просторової жорсткості ростверку пальового фундаменту на напружено-деформований стан фундаментних конструкцій будинку.

Побудову конструктивної схеми було реалізовано з використанням 3D-системи архітектурного проектування «Сапфір-2016» (рис. 3-а), а статичний розрахунок виконано

для скінчено-елементної моделі (рис. 3-б) у програмному комплексі «ЛІРА-САПР-2016».

Розрахунки НДС системи «основа-фундамент-надземні конструкції» були проведені для двох типів ростверку - стрічкового та суцільного плитного ростверку під весь будинок. Для кожного з цих варіантів було досліджено вплив товщини ростверку на внутрішні зусилля в ньому. Задля того, щоб більш точно можна було дослідити вплив

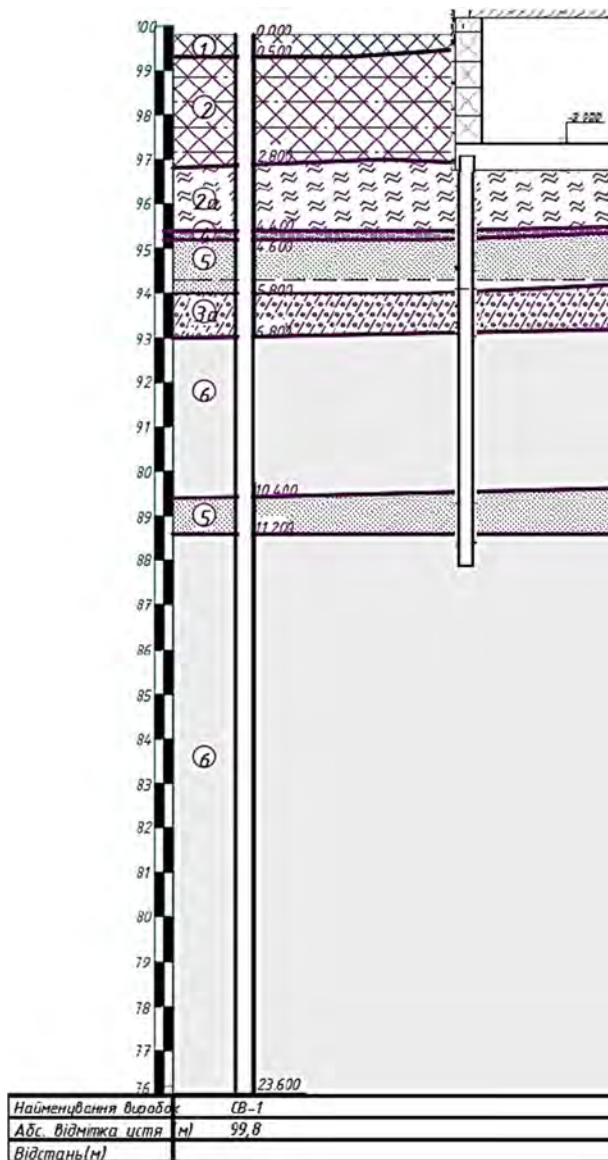
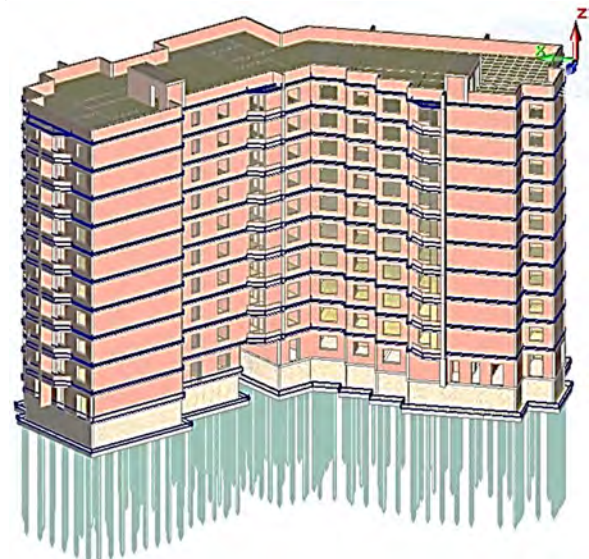


Рис.2 Інженерно-геологічний розріз  
Fig.2 Geological conditions of the construction site



b)

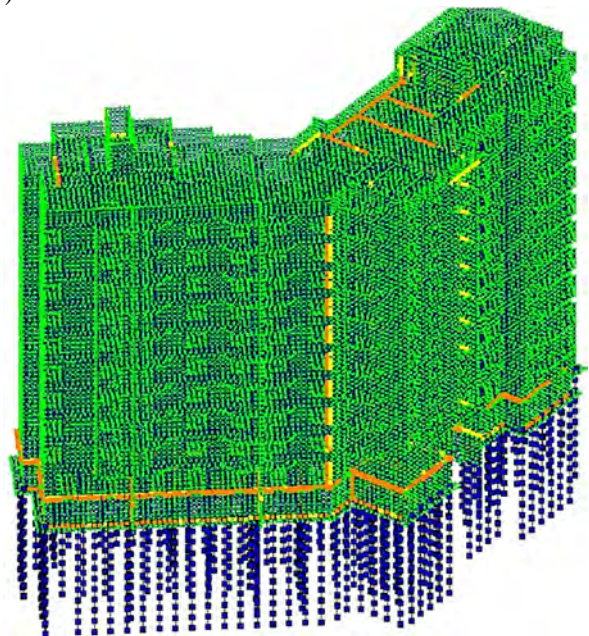


Рис.3 Розрахункова модель будинку: а – конструктивна модель; б – скінчено-елементна модель.

Fig.3 Calculation model of the building: a – structural model; b – finite element model.

Табл. 1. Фізичні характеристики ґрунтів будівельного майданчика  
Table 1. Physical characteristics of soils of the construction site

	Повне найменування ґрунту	Глибина закладання підшови шару	Щільність ґрунту (г/см <sup>3</sup> )		Питома вага ґрунту		Природна, W	Число пластичності I <sub>p</sub>	Показник текучості II	Коефіцієнт пористості, e	Питома зчеплення с, кПа	Кут внутрішнього тертя φ, град	Модуль деформації, Е, мПа	Розрахунковий опір R, кПа
			природна, ρ	скелету, ρ <sub>d</sub>	природна, γ	скелету, γ <sub>d</sub>								
1	Насипний ґрунт-злежаний, пісок дрібний, маловологі, з включенням будівельного сміття, сірий	0.5	1.680		16.481		0.100	-	-	-				
2	Намивний пісок дрібний, середньої щільності, маловологі, кварцовий, жовто-сірий	2.3	1.680	1.541	16.481	15.120	0.090	-	-	0.715	0.98	29.00	21.00	300.00
2a	Намивний пісок дрібний, щільний, маловологі, кварцовий, жовто-сірий	1.6	1.940	1.748	19.031	17.145	0.110	-	-	0.513	4.90	37.00	42.00	400.00
4	Пісок пилуватий, середньої щільності, кварцовий, місцями з прошарками супіски, від вологого до водонас., світло-сірий	0.2	1.790	1.517	17.560	14.881	0.180	-	-	0.750	1.96	26.00	11.00	150.00
4w			1.940				0.280			0.750	1.96	26.00	11.00	100.00
5	Пісок дрібний, середньої щільності, від маловологого до насиченого водою, кварцовий, світло-сірий	1.2	1.800	1.593	17.658	15.627	0.130	-	-	0.670	1.96	31.00	26.00	150.00
5w			1.990	1.592	19.522	15.618	0.250			0.670	1.96	31.00	26.00	100.00
3a	Супісок пластичний, слабозаторфована, темно-сіра	1.0	1.880	1.435	18.443	14.078	0.310	0.060	0.730	0.858	7.85	18.00	7.00	213.50
6	Пісок дрібний, щільний, насичений водою, кварцовий, світло-сірий	3.6	1.990	1.809	19.522	17.747	0.100	-	-	0.464	5.88	38.00	48.00	300.00
6w			2.140	1.814	20.993	17.791	0.180			0.464	5.88	38.00	48.00	300.00
5	Пісок дрібний, середньої щільності, від маловологого до насиченого водою, кварцовий, світло-сірий	0.8	1.800	1.593	17.658	15.627	0.130	-	-	0.670	1.960	31.0	26.0	150.0
6	Пісок дрібний, щільний, насичений водою, кварцовий, світло-сірий	12.6	1.990	1.809	19.522	17.747	0.100	-	-	0.464	5.880	38.0	48.0	300.0

конфігурації ростверку на перерозподіл зусиль в палях, було прийнято рішення розташування паль в плані розглядати максимально близьким. Загальна кількість паль під будинок, при цьому склала 211 та 196 для плитного та стрічкового варіантів ростверків відповідно. Товщина ростверку для стрічкового та плитного варіантів для дослідження впливу просторової жорсткості приймалася 500 мм та 800 мм.

Для аналізу результатів розрахунків було призначено характерні зони (рис. 4), для яких виконувалося дослідження впливу зміни параметрів фундаментних конструкцій на перерозподіл НДС. Призначення зон обґрунтовано їх локалізацією: крайні кутові

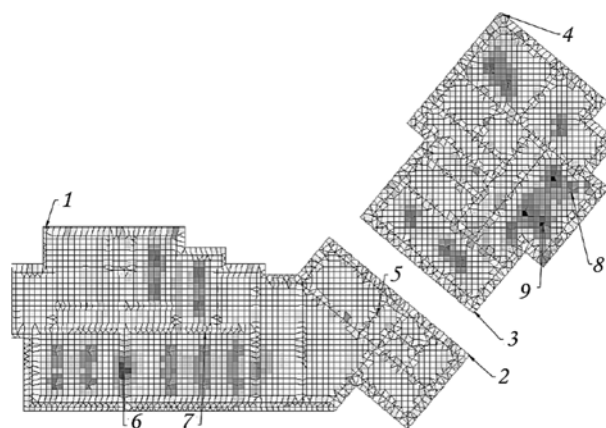


Рис.4 Характерні зони для аналізу результатів розрахунків.

Fig.4 Characteristic zones for problem-solving analysis.

точки ростверку, розташування під геометричним центром будівлі та центром ваги (зони 1...5), а також формуванням ділянок-концентраторів напружень (зони 6...9).

За результатами числового моделювання для варіанту пальового фундаменту будинку з плитним ростверком товщиною 500 мм очікується утворення зони з максимальним значенням згинальних моментів  $M_x$  у ростверку в осях «5»-«М-Н», значення зусилля при цьому складає  $M_x=160 \text{ кН}\cdot\text{м}$  (рис. 6-а). Зона з максимальним значенням згинальних моментів  $M_y$  в ростверку утворилася в осях «7-8»-«Н», значення якого за результатами розрахунків очікується рівним  $M_y=192 \text{ кН}\cdot\text{м}$  (рис. 7-а). Зони максимальних деформацій для цієї варіації фундаментних конструкцій утворилися у кутовій частині секцій будинку, а саме  $S=9 \text{ мм}$  в осях «21»-«А» та  $S=14 \text{ мм}$  в осях «13»-«А» (рис. 5-а). Розподіл зусиль в оголовках паль в цьому випадку показав, що мінімальне значення становить  $N=606 \text{ кН}$ , а максимальне -  $N=955 \text{ кН}$  (рис. 8-а).

При збільшенні товщини плитного ростверку до 800 мм за результатами комп'ютерної симуляції очікується незначний перерозподіл напружень в ростверку пальового фундаменту: утворення зони з максимальним значенням згинальних моментів не змінило локалізацію, а значення зусилля при цьому склало  $M_x=238 \text{ кН}\cdot\text{м}$  (рис. 6-а) та  $M_y=191 \text{ кН}\cdot\text{м}$  (рис. 7-а). Характер деформування фундаментних конструкцій будинку зберігає свою тенденцію, значення осідання ростверку практично не змінюються (рис. 5-а). Перерозподіл зусиль в оголовках паль у випадку збільшення товщини ростверку показав, що мінімальне значення очікується рівним  $N=634 \text{ кН}$ , а максимальне -  $N=949 \text{ кН}$  (рис. 8-а).

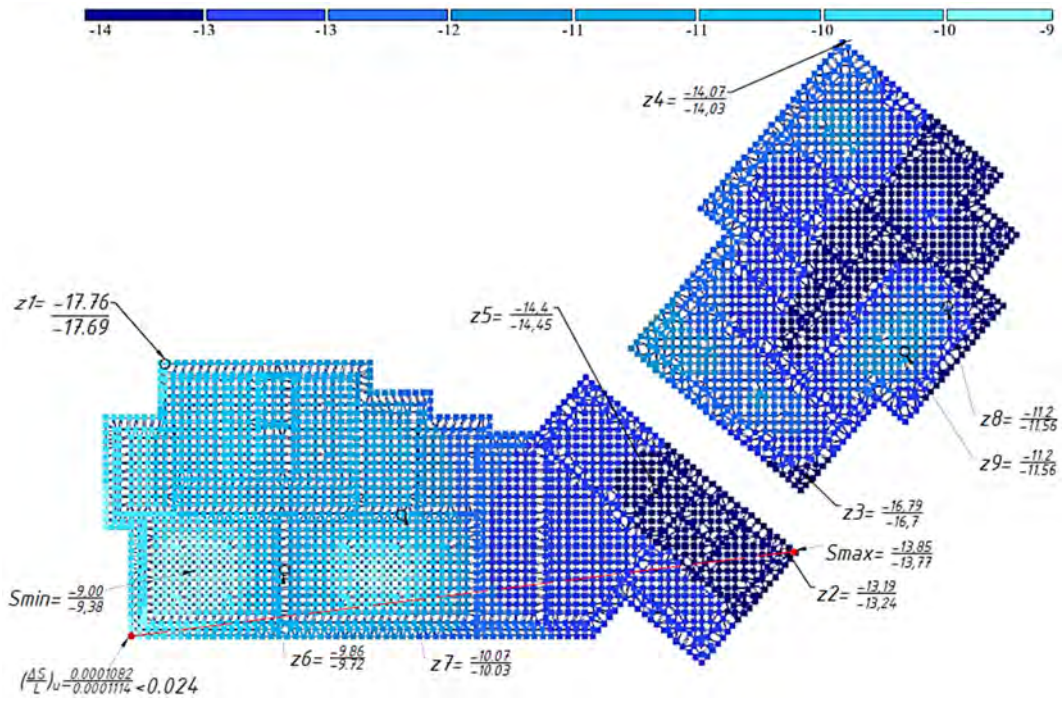
Результати імітаційного моделювання для варіанту пальового фундаменту зі стрічковим ростверком товщиною 500 мм показали, що утворення зони з максимальним значенням згинальних моментів в ростверку очікується в осях «21»-«В» і складає  $M_x=127 \text{ кН}\cdot\text{м}$  (рис. 6-б). Максимальне значення згинальних моментів в ростверку  $M_y=110 \text{ кН}\cdot\text{м}$  зафіксовано в осях «18-19»-

«Е» (рис. 7-б). Зона максимальних деформацій для цієї варіації фундаментних конструкцій утворилася в зоні примикання секцій будинку, а саме  $S=10 \text{ мм}$  в осях «13»-«А» та  $S=16 \text{ мм}$  в осях «14»-«А» (рис. 5-б). Перерозподіл навантаження на оголовки паль для випадку стрічкового ростверку показав, що за даними числового моделювання мінімальне значення становить  $N=629 \text{ кН}$ , а максимальне -  $N=997 \text{ кН}$  (рис. 8-б).

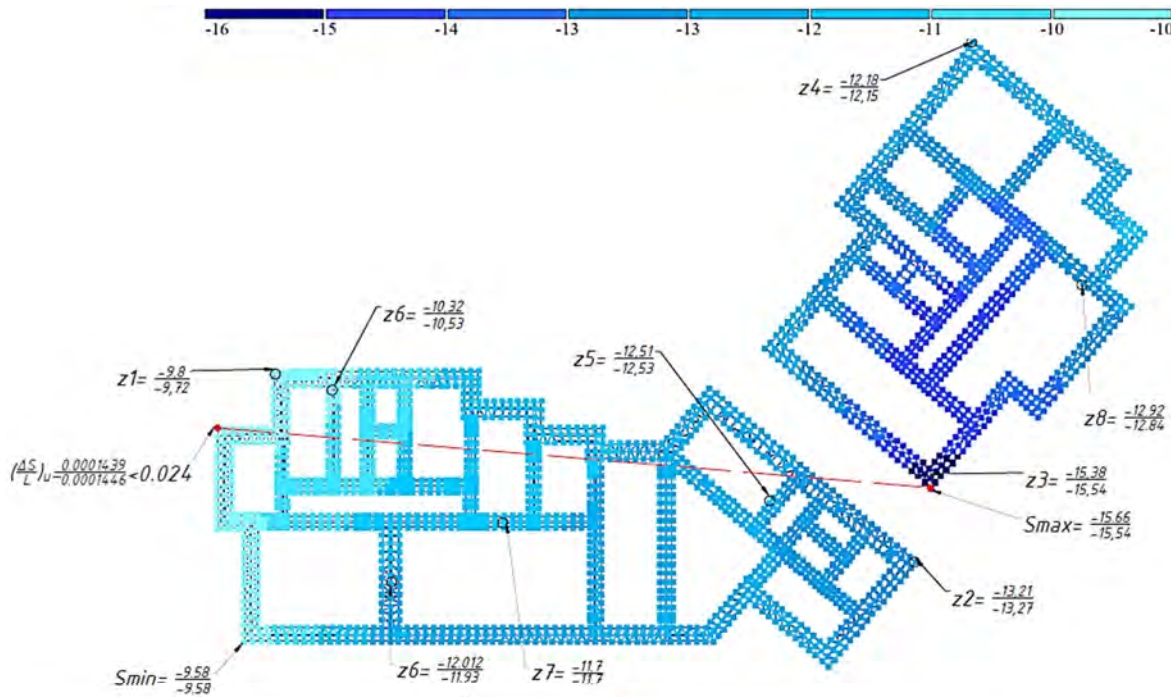
Розглядаючи варіант збільшення товщини стрічкового ростверку пальового фундаменту до 800 мм, результати комп'ютерного розрахунку виявили зміну розподілу напружень в ростверку пальового фундаменту: утворення зони з максимальним значенням згинальних моментів зберегло свою локалізацію, при цьому значення зусиль склало  $M_x=265 \text{ кН}\cdot\text{м}$  (рис. 6-б),  $M_y=201 \text{ кН}\cdot\text{м}$  (рис. 7-б). Характер деформування фундаментних конструкцій будинку зберігає свою тенденцію, значення осідання ростверку змінюються не суттєво (рис. 5-б). Навантаження на оголовки паль у випадку збільшення товщини стрічкового ростверку зберегло тенденцію розподілу та своє значення, мінімальне значення склало  $N=630 \text{ кН}$ , а максимальне -  $N=996 \text{ кН}$  (рис. 8-б).

Отже, за результатами комп'ютерних розрахунків для варіанту плитного ростверку товщиною 500 мм екстремальні значення згинальних зусиль у ростверку складають  $M_x=160 \text{ кН}\cdot\text{м}$  та  $M_y=192 \text{ кН}\cdot\text{м}$ , а при збільшенні товщини плитного ростверку їх величини змінилися до  $M_x=238 \text{ кН}\cdot\text{м}$  та  $M_y=191 \text{ кН}\cdot\text{м}$ . Для варіанту стрічкового ростверку пальового фундаменту будинку екстремальні значення згинальних моментів у ростверку початково, при товщині стрічкового ростверку 500 мм, складають  $M_x=127 \text{ кН}\cdot\text{м}$  та  $M_y=110 \text{ кН}\cdot\text{м}$ , а при збільшенні товщини ростверку величини моментів збільшилися до  $M_x=265 \text{ кН}\cdot\text{м}$  та  $M_y=201 \text{ кН}\cdot\text{м}$ . Можна зробити висновок, що стрічковий ростверк пальового фундаменту будинку більш активно реагує на зміну його товщини (мова йде про його напружений стан), що пояснюється зміною його власної просторової жорсткості.

a)



b)



c)

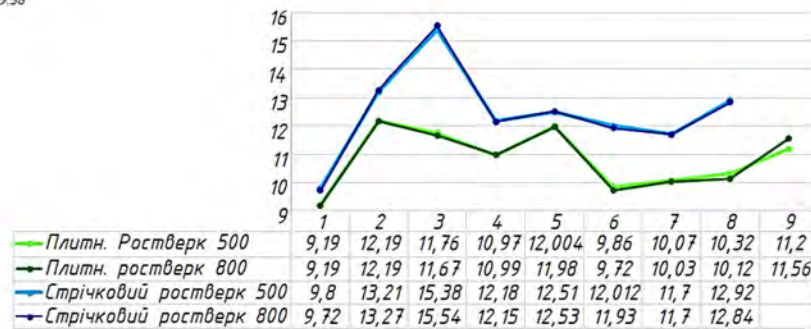
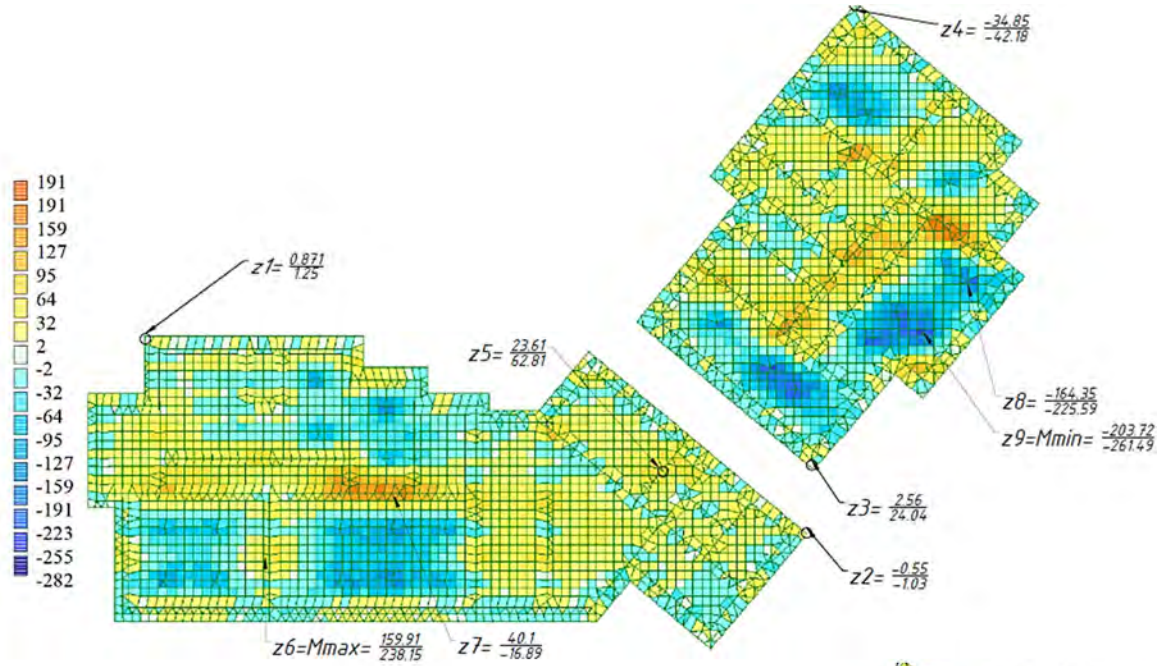


Рис.5 Осідання  $S$ , мм ростверку пальового фундаменту (товщиною 500/800 мм):  $a$  – варіант плитного ростверку;  $b$  – варіант стрічкового ростверку;  $c$  – порівняння результатів.

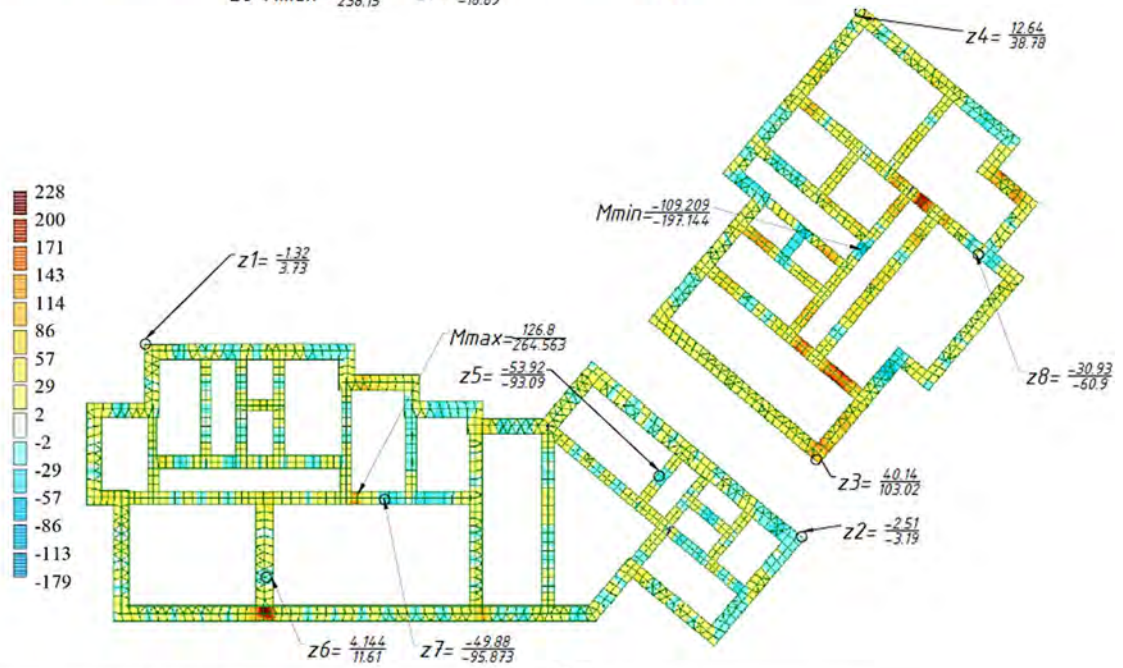
Fig.5 Settlement of pile caps  $S$ , mm (500/800 mm cap height):  $a$  – raft pile cap;  $b$  – strip pile cap;  $c$  – results comparison for characteristic zones.



a)



b)



c)

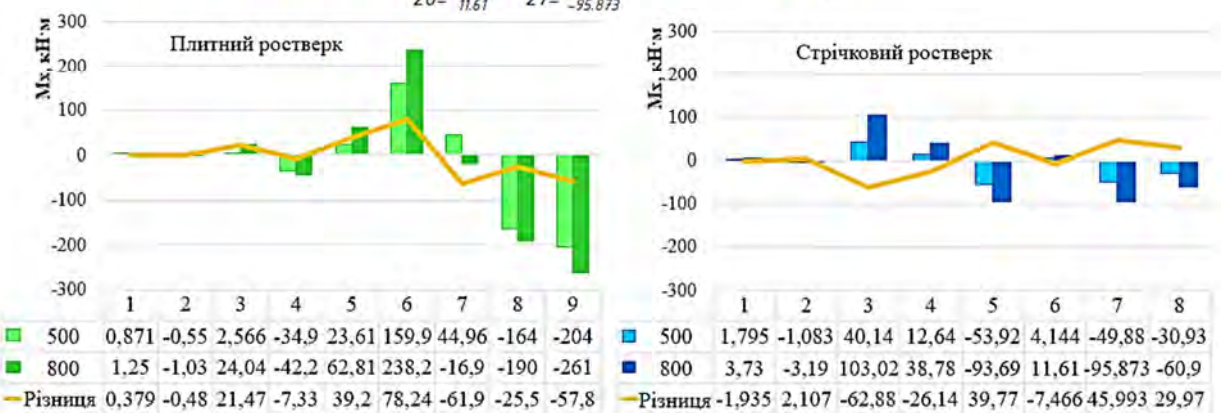


Рис.6 Згинальні моменти  $M_x, кН\cdot м$  у ростверку пального фундаменту (товщиною 500/800 мм):  
 a – варіант плитного ростверку; b – варіант стрічкового ростверку; c – порівняння результатів.  
 Fig.6 Bending moment in pile caps  $M_x, кН\cdot м$  (500/800 mm cap height): a – raft pile cap; b – strip pile cap; c – results comparison for characteristic zones.

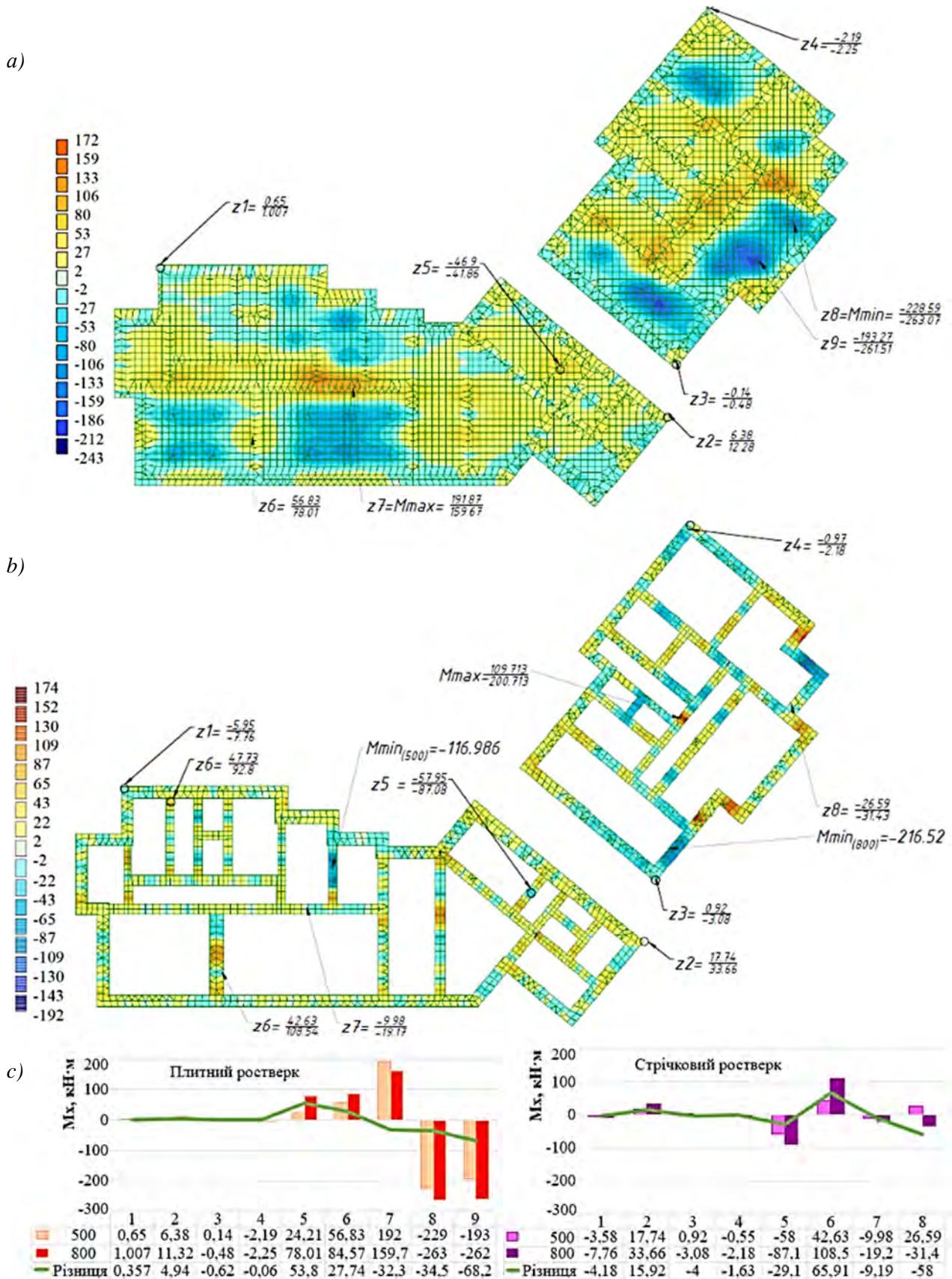
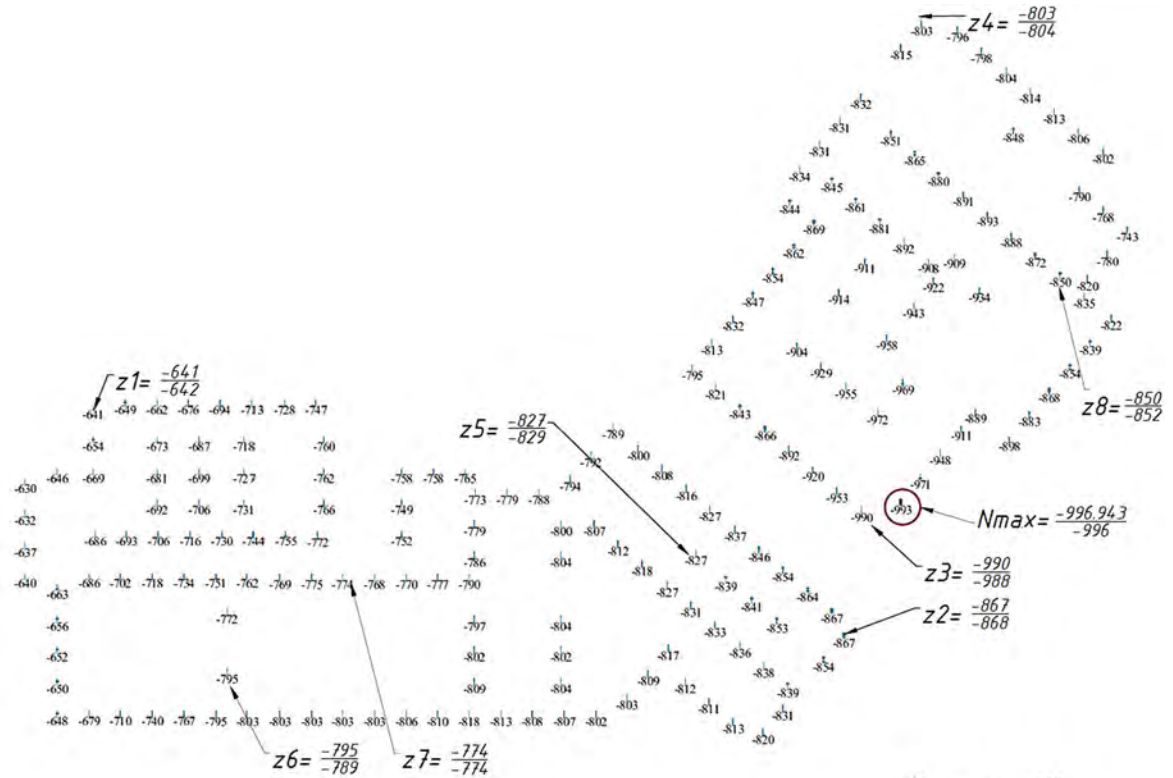
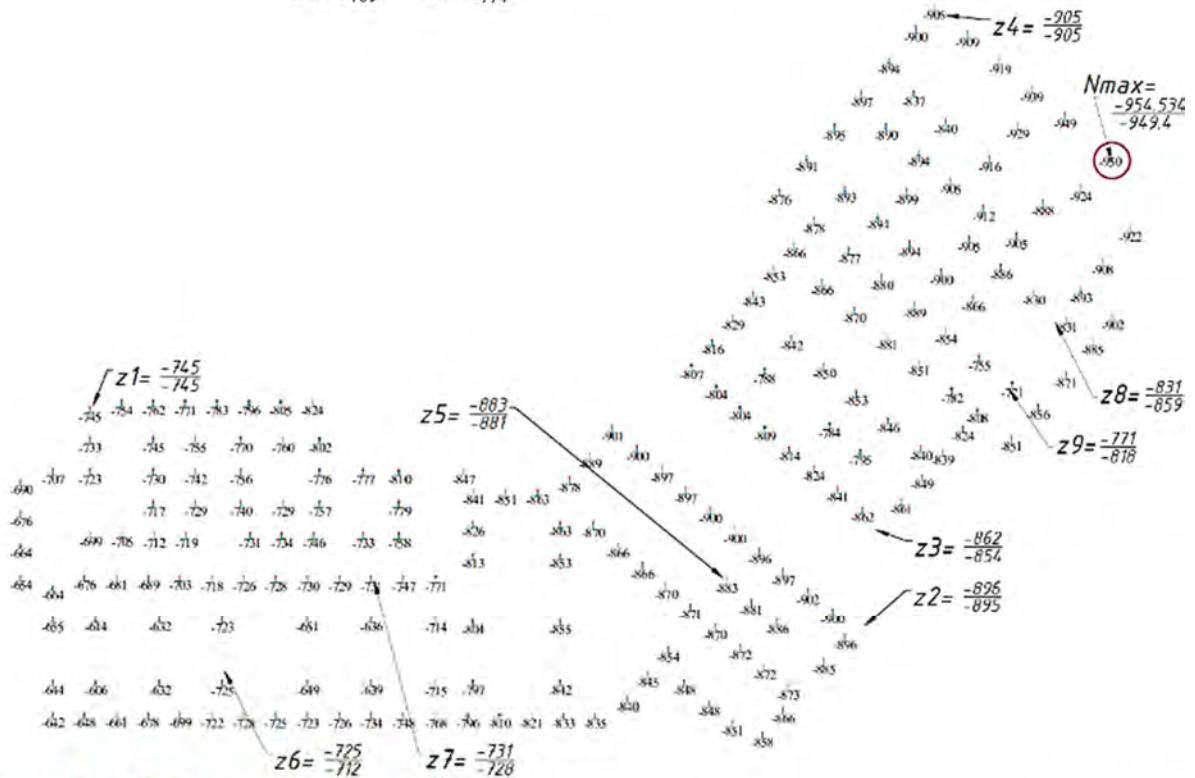


Рис.7 Згинальні моменти  $M_x$ , кН·м у ростверку пальового фундаменту (товщиною 500/800 мм):  
 a – варіант плитного ростверку; b – варіант стрічкового ростверку; c – порівняння результатів.  
 Fig.7 Bending moment in pile caps  $M_x$ , kN·m (500/800 mm cap height): a – raft pile cap; b – strip pile cap; c – results comparison for characteristic zones.

a)



b)



c)



Рис.8 Зусилля в палях  $N$ ,  $kN$  (ростверк товщиною 500/800 мм):  $a$  – варіант плитного ростверку;  $b$  – варіант стрічкового ростверку;  $c$  – порівняння результатів.

Fig.8 Internal forces  $N$  in piles,  $kN$  (500/800 mm pile cap height):  $a$  – raft pile cap;  $b$  – strip pile cap;  $c$  – results comparison for characteristic zones.

Досліджуючи обрані характерні зони (рис. 4), що були призначені для аналізу результатів, ми бачимо, що для плитного типу ростверку при товщині плити 500 мм максимальне значення переміщень буде відбуватися в зоні #2, значення переміщення складе 12 мм. Найменше значення осідання з досліджуваних зон отримано в зоні #1, воно становить 9 мм. При цьому при збільшенні товщини плитного ростверку до 800 мм характер розподілу деформацій осідання ростверку залишається незмінним (рис. 5-с).

Аналізуючи розрахунок стрічкового типу ростверку при його товщині 500 мм, виявлено, що зона з максимальним значенням осідання (серед досліджуваних зон) змістилася в зону #3, значення переміщення при цьому складає 16 мм. Найменше значення осідання з досліджуваних зон за результатами комп'ютерного моделювання прогнозуємо в зоні #1, воно становить 10 мм. При збільшенні товщини стрічкового ростверку до 800 мм характер розподілу вертикальних переміщень ростверку залишається незмінним (рис. 5-с).

Порівнюючи між собою варіанти пальового фундаменту з стрічковим та плитним ростверком, ми бачимо, що при плитному ростверку зона максимальних деформацій наявна в двох областях фундаменту: в осях «12-14»-«А-Г» та в осях «20-22»-«А-В». При переході до стрічкового ростверку зона концентрації осідань переміщується до області на перетині осей «15»-«А». При зміні типу ростверку пальового фундаменту з плитного на стрічковий за результатами моделювання прогнозується збільшення значення осідання в усіх характерних зонах (рис. 5-с), при цьому приріст складає для різних зон 10...40 %.

Стосовно внутрішніх зусиль у ростверку, то для варіанту плитного ростверку при збільшенні висоти ростверку з 500 мм до 800 мм зафіксовано найбільш відчутний приріст моменту  $M_x$  в зоні #6 - близько 40 % (рис. 6-с). Додатково потрібно звернути увагу на наявність зон, де зусилля може змінити знак на протилежний (зона #7). Зусилля  $M_y$  має іншу картину перерозподілу в ростверку. Найбільш відчутний приріст

зусилля очікується в зоні #9 – близько 35 % (рис. 7-с).

Для варіанту стрічкового ростверку пальового фундаменту розрахунки показали, що при збільшенні товщини ростверку приріст моменту  $M_x$  (рис. 6-с) очікується на 60 % (зона #3), а  $M_y$  (рис. 7-с) - на 55 % (зона #6). Також наявні зони, де зусилля може змінити знак на протилежний (зона #8).

Аналіз перерозподілу навантаження на палі показав, що враховуючи різницю у кількості паль у 7% для розглянутих варіантів пальових фундаментів (196 паль для варіанту із стрічковим ростверком та 211 паль із плитним), зменшення кількості паль призвело до збільшення максимального навантаження, що передається на палі з стрічковим ростверком на 5 %. При плитному ростверку зусилля з найбільшим значенням передаються на палі в зоні осей «12-14»-«А-Г» та «20-22»-«А-В». При переході до стрічкового ростверку зона концентрації зусиль зміщується до перетину осей «15»-«А». Аналізуючи ці дані разом з результатами дослідження осідань фундаменту ми бачимо закономірність, що найбільші зусилля відповідають зонам з найбільшим осіданням.

За результатами розрахунків зміна висоти ростверку не спричиняє суттєвого перерозподілу навантаження на палі (рис. 8-с). Для плитного ростверку найбільший приріст навантаження виявлено у зоні #8 та складає 4 %, для стрічкового ростверку ця різниця знаходиться в межах 1 % в зоні #6.

Порівняння стрічкового та плитного типу ростверків пальового фундаменту між собою показало, що плитний варіант ростверку дає більш рівномірний за характером розподіл деформацій осідання (рис. 5-а,б) з меншими за величиною вертикальними переміщеннями фундаменту будинку (рис. 5-с). При цьому згинальні моменти у ростверку пальового фундаменту будинку у досліджуваних зонах зазнали суттєвого перерозподілу (рис. 6-а,б, 7-а,б), зафіксовано різницю як за величиною, так і за зміною знаку на протилежний (рис. 6-с, 7-с) для плитного та стрічкового типу ростверку пальового фундаменту.

Навантаження на оголовки паль за даними числового моделювання у досліджуваних зонах має різницю, що не перевищує 15 %, при цьому спостерігається як збільшення, так і зменшення величини навантаження на палі при порівнянні стрічкового та плитного типу ростверків (рис. 8-с), що пояснюється зміною просторової жорсткості фундаменту та перерозподілом навантаження між сусідніми палями. Максимальне та мінімальне навантаження на палі зафіксовано більшим на 5 % для стрічкового варіанту ростверків, що спричинено відмінністю у кількості паль в межах 7 % для розглянутих варіантів пальового фундаменту будинку.

### ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ

- Підтверджено, що розрахунки з використанням числового моделювання дають можливість відслідковувати перерозподіл напружень і деформацій у фундаментних конструкціях при варіантному проектуванні для пошуку найбільш надійного та вигідного варіанту фундаментів будинку.
- Розглянуто варіантне проектування пальових фундаментів будинку з стрічковим та плитним ростверком різної товщини. Виконано оцінку впливу просторової жорсткості фундаменту на формування НДС фундаментних конструкцій.
- Отримано, що збільшення товщини ростверку для розглянутих варіантів фундаментів будинку, принципово не змінює характер деформацій осідання фундаментів. При цьому відбувається незначний перерозподіл навантажень на палі. У досліджуваних зонах зафіксовано збільшення поздовжнього зусилля до 50 кН, що не перевищує 5 % від початкової величини.
- Отримано, що зміна геометричних характеристик фундаментних конструкцій будинку, а саме збільшення висоти, впливає на підвищення жорсткості, що в свою чергу зменшує прогин фундаменту. Відносна різниця осідання для плитного ростверку зменшилася на 5 %, а для стрічкового до 1 % .Але, слід зауважити, що змінивши висоту ростверку на 60% ми досягли зменшення максимального осідання на 2 %, що не є економічно ефективним.
- Встановлено, що найбільший вплив від зміни товщини ростверку пальового фундаменту відбувається на внутрішні зусилля у ростверку, а саме: для стрічкового варіанту ростверків пальового фундаменту величина  $M_x$  збільшилася до 2 разів (зона #4),  $M_y$  збільшилася до 4 разів (зона #3); для варіанту плитного ростверку величина  $M_x$  збільшилася до 9 разів (зона #3),  $M_y$  збільшилася до 2,5 разів (зона #5).
- Максимальний згинальний момент зріс на 50 % для плитного ростверку та у 2 рази відповідно для стрічкового. У деяких зонах спостерігається зміна знаку зусиль на протилежний. При цьому вплив товщини ростверку на перерозподіл згинальних моментів більш відчутний в ростверку стрічкового типу.
- Продемонстровано, що перехід від стрічкового варіанту ростверків на плитний спричиняє зміну характеру деформування будинку, при цьому у досліджуваних зонах зміна величини осідання ростверку не перевила 5 мм.
- Виявлено при порівнянні стрічкового і плитного варіантів ростверків пальового фундаменту будинку, що перерозподіл вертикальних зусиль у палях може складати від 5 % (зона #8) до 15% (зона #3).
- Доведено, що застосування плитного ростверку дає більш рівномірний характер розподілу осідання фундаментів, при цьому збільшення його висоти не є економічно ефективним.
- Запропоновано, за результатами техніко-економічного порівняння в якості основного варіанту фундаментів обрати варіант пальового фундаменту з плитним ростверком товщиною 500 мм.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Бойко І.П. Дослідження напружено-деформованого стану фундаментів з палями різної довжини багатопверхових будинків у м. Київ / І.П. Бойко, О.В. Пятков, В.Л. Підлуцький // *Зб. наук. праць (Галузеве машинобуд., буд-во)*. – П.: ПолтНТУ. – 2013. – Вип.3(2). – С.40-48.
2. Бойко І.П. Дослідження перерозподілу зусиль у фундаменті при різних варіантах розташування палей / І.П. Бойко, В.Л. Підлуцький // *Основи і фундаменти: Міжвідомчий науково-технічний збірник*. – К.: КНУБА. – 2015. – Вип.37. – С.64-73.
3. Жук В.В. Про покращення розрахункових схем каркасних будівель на просідаючих ґрунтах / В.В. Жук, М.В. Корнієнко // *Світ геотехніки: Науково-технічний журнал*. – Запоріжжя.: ТОВ «НВК «Інтер-М». – 2013. – Вип.2(38). – С.2-7.
4. Максименко В.П. Дослідження напружено-деформованого стану фундаментної плити на основі тривимірної моделі / В.П. Максименко, П.В. Войтенко // *Сучасне промислове та цивільне будівництво*. – Макіївка: Донбас. нац. акад. буд-ва і архіт.. – 2011. – Вип.7(4). – С.193-203.
5. Михайловський Д.В. Моделювання пального фундаменту з використанням об'ємних фізично-нелінійних скінчених елементів ґрунту / Д.В. Михайловський, Д.Н. Матющенко, А.О. Смоленський // *Нові технології в будівництві*. – Київ. – 2015. – Вип.29. – С.44-53.
6. Носенко В. Вплив моделі ґрунтової основи та палей на напружено-деформований стан фундаменту і несучих конструкцій висотного будинку / Віктор Носенко, Остап Кашоїда // *Conference Proceedings of International scientific-practical conference of young scientists «BUILD-MASTER-CLASS-2020»*. – Київ.: KNUCA. – 2020.– P.130-131.
7. Підлуцький В.Л. Вплив розташування та кількості палей на їх взаємодію у фундаменті / Василь Підлуцький, Сергій Бордунов // *Conference Proceedings of International scientific-practical conference of young scientists «BUILD-MASTER-CLASS-2020»*. – Київ.: KNUCA. – 2020.– P.124-125.

## REFERENCES

1. Boiko I.P., Piatkov O.V., Pidlutskiy V.L. (2013). *Doslidzhennia napruzhenodeformovanoho stanu fundamentiv z paliamy riznoi dovzhyny bahatopoverkhovykh budynkiv u m. Kyiv* [Investigation of the stress-strain state of foundations with piles of different lengths of multi-storey buildings in Kyiv]. *Zb. nauk. prats (Haluzeve mashynobud., bud-vo)*, P.: PoltNTU, 3(2), 40-48. (in Ukrainian)
2. Boiko I.P., Pidlutskiy V.L. (2015). *Doslidzhennia pererозpodilu zusyly u fundamenti pry riznykh variantakh roztaшuvannia pal* [Investigation of redistribution of forces in the foundation at different variants of pile arrangement]. *Osnovy i fundamenti: Mizhvidomchyi naukovotekhnichniy zbirnyk*, K.: KNUBA, 37, 64-73. (in Ukrainian)
3. Zhuk V.V., Korniienko M.V. (2013). *Pro pokrashchennia rozrakhunkovykh skhem karkasnykh budivel na prosidaiuchykh gruntakh* [On the improvement of calculation schemes of frame buildings on collapsible soils]. *Svit heotekhniky: Naukovotekhnichniy zhurnal*, Zaporizhzhia: TOV «NVK «Inter-M», 2(38), 2-7. (in Ukrainian)
4. Maksymenko V.P., Voitenko P.V. (2011). *Doslidzhennia napruzhenodeformovanoho stanu fundamentnoi plyty na osnovi tryvymirnoi modeli* [Study of the stress-strain state of a foundation slab based on a three-dimensional model]. *Cuchasne promyslove ta tsyvilne budivnytstvo*, Makiivka: Donbas. nats. akad. bud-va i ar-khit., 7(4), 193-203. (in Ukrainian)
5. Mykhailovskyi D.V., Matiushchenko D.N., Smolenskiy A.O. (2015). *Modeliuvannia palovoho fundamentu z vykorystanniam obiemnykh fizychno-neliniinykh skinchenykh elementiv hruntu* [Modeling of a pile foundation using volumetric physically nonlinear finite elements of soil]. *Novi tekhnologii v budivnytstvi*, Kyiv, 29, 44-53. (in Ukrainian)
6. Nosenko V., Kashoida O. (2020). *Vplyv modeli gruntovoi osnovy ta pal na napruzhenodeformovanyi stan fundamentu i nesuchykh konstruktzii vysotnoho budynku* [Influence of the soil base and pile model on the stress-strain state of the foundation and load-bearing structures of a high-rise building]. *Conference*

- Proceedings of International scientific-practical conference of young scientists «BUILD-MASTER-CLASS-2020»*, Kyiv: KNUCA, 130-131. (in Ukrainian)
7. Pidlutskyi V.L., Bordunov S. (2020). Vplyv roztashuvannia ta kilkosti pal na yikh vzaiemodiiu u fundamenti [Influence of the

location and number of piles on their interaction in the foundation]. ]. *Conference Proceedings of International scientific-practical conference of young scientists «BUILD-MASTER-CLASS-2020»*, Kyiv: KNUCA, 124-125. (in Ukrainian)

### Evaluation of the influence of the pile cap's spatial rigidity on the stress-strain state of pile foundations of the building

*Veronika Zhuk,  
Oleksandra Aloshkina,  
Oleksandr Piatkov*

**Summary.** Providing citizens with housing is one of the urgent problems in Ukraine. The limited number of floors allows the use of such an architectural and planning solution for open-type city blocks (internal areas with such planning remain more open and transparent, create a feeling of free space). In order to solve this problem, first of all, it is necessary to make structurally correct and economically reasonable solutions at the stage of building design, because 60...70% of the building price is the cost of structures and materials.

The main task of the designer is to develop structures for the safe and efficient operation of the building. These factors depend on the correctness of the development of the structural scheme of the building and the correctness of the calculation. The development of modern technologies and the availability of various calculation software complexes make it possible to perform such calculations. They make it possible to take into account the interaction of the elements of the "soil base – foundation - above-ground structures" system, which is mandatory for a modern level of design.

Computer modeling with the use of various software complexes allows us to monitor the formation

of the stress-strain state in the load-bearing structures of the building depending on the deformation properties of the soil base on the construction site, also depending on the change in the parameters of the structures of the building itself. A comprehensive analysis of the initial data, a detailed study and analysis of the engineering and geological conditions of the construction site, taking into account the planning and construction scheme of the building, as well as performing a complex numerical study of the stress-strain state of the building elements allows to monitor the influence of changes in the parameters of the foundations on the redistribution of deformations and stresses in all structural elements of the building. Therefore, performing computer simulation makes it possible to choose a rational type of foundations that will have not only reliability requirements, but will also be cost-effective at the same time.

This article presents the results of a comparison of the options of a raft pile cap and a strip pile cap of the foundations on the stress-strain state of the foundation structures. The conducted research confirms that the transition from the strip pile cap option to the raft pile cap option causes a change in the subsidence character of the building. It is shown that the use of variable design of foundations makes it possible to design a reliable and at the same time cost-effective option of foundations. Based on the results of the study, the choice of a rational option of foundations was substantiated.

**Key words.** Numerical simulation, stress-strain state, pile cap, pile foundation, foundation rigidity.