

*І.П. Бойко, д.т.н., професор  
О.В. Пятков, к.т.н., доцент  
В.Л. Підлуцький, асистент*

*Київський національний університет будівництва та архітектури*

## **ДОСЛІДЖЕННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ФУНДАМЕНТІВ З ПАЛЯМИ РІЗНОЇ ДОВЖИНИ БАГАТОПОВЕРХОВИХ БУДИНКІВ У М. КИЇВ**

*Наведено дослідження формування напружено-деформованого стану фундаментних конструкцій залежно від варіанта влаштування фундаменту, прийнятої довжини паль та їх розташування в межах ростверку на реальному об'єкті м. Київ. За допомогою чисельного моделювання показано особливості перерозподілу зусиль у фундаментних конструкціях.*

**Ключові слова:** чисельне моделювання, паловий фундамент, розташування паль, палі різної довжини.

*И.П. Бойко, д.т.н., профессор  
А.В. Пятков, к.т.н., доцент  
В.Л. Подлуцкий, ассистент*

*Киевский национальный университет строительства и архитектуры*

## **ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ФУНДАМЕНТОВ СО СВАЯМИ РАЗНОЙ ДЛИНЫ МНОГОЭТАЖНЫХ ЗДАНИЙ В г. КИЕВ**

*Приведены исследования формирования напряженно-деформированного состояния фундаментных конструкций в зависимости от варианта устройства фундамента, принятой длины свай и их расположения в пределах ростверка на реальном объекте г. Киев. С помощью численного моделирования показаны особенности перераспределения усилий в фундаментных конструкциях.*

**Ключевые слова:** численное моделирование, свайный фундамент, расположение свай, сваи разной длины.

*I.P. Boyko, PhD, Prof.  
O.V. Pyatkov, PhD  
V.L. Pidlutskiy, Assistant*

*Kyiv National University of Construction and Architecture*

## **RESEARCH STRESS-STRAIN STATE FOUNDATION WITH PILES OF DIFFERENT LENGTHS RISE BUILDINGS IN KIEV**

*The show research the formation of the stress-strain state of foundation structures depending on the device variant foundation adopted length of piles and their location within the grillage on the real object of Kiev. Through numerical simulation shows the features of redistribution efforts in foundation construction.*

**Keywords:** numerical simulation, pile foundation, location of piles, piles of different lengths.

**Вступ.** Проектування палових фундаментів багатоповерхових будинків супроводжується розміщенням необхідної кількості паль у межах фундаменту. Такий процес вимагає чіткого уявлення про зони фундаменту,

відповідно до яких визначається робота паль [1, 2, 6]. Кутові, периферійні та середні палі у фундаменті при однакових геометричних та фізичних параметрах працюють по-різному, а тому вимагають особливого підходу до визначення їх місця розташування. А це насамперед визначається фактичним навантаженням, яке передається на палі від надземних конструкцій, та опором паль по ґрунту. Навантаження на палі від надземних конструкцій перерозподіляється не однаково, на що впливає багато чинників.

**Огляд останніх джерел досліджень і публікацій.** Відомо багато випадків, коли палі у фундаменті розташовують по регулярній сітці, незважаючи на роботу паль у різних зонах фундаменту та помилково вважаючи, що об'єднуюча фундаментна плита рівномірно розподіляє між ними навантаження від надземних конструкцій. Але досвід проектування показує, що це не так. Наприклад, А.О. Бартоломей у своїх роботах відмічає, що при навантаженні на групу паль, яке близьке до граничного, кутові палі сприймають приблизно на 20% більше, ніж середні палі крайнього ряду, і на 50% більше, ніж центральні палі. Цей факт пояснює тим, що біля бокової поверхні кутових паль сили тертя набагато більші, ніж біля інших паль фундаменту. Дослідженням розташування паль та розподілу між ними навантаження займалися багато вчених, серед яких А.О. Бартоломей, І.П. Бойко, В.М. Голубков, Б.І. Далматов, А.В. Пилягин, Р. Катценбах та інші [1 – 7].

**Виділення не розв'язаних раніше частин загальної проблеми.** Дослідження роботи паль у фундаменті вимагає особливих підходів, тому виникає необхідність пошуку раціонального положення паль у плані, навіть з можливим улаштуванням їх різної довжини для коригування та вирівнювання внутрішніх зусиль у фундаментних і надземних конструкціях. Детальний аналіз напружено-деформованого стану (НДС) фундаментних конструкцій дає змогу запроєктувати надійні та економічні рішення фундаментів.

**Мета** досліджень полягає в тому, щоб на прикладі реального багатоповерхового будинку в м. Київ показати особливості формування НДС фундаментних конструкцій залежно від прийнятих варіантів фундаментів та від геометричних розмірів фундаментних конструкцій, а також їх розташування за допомогою чисельного моделювання.

**Постановка завдання.** На території будівельного майданчика було запропоновано побудувати два будинки, один з яких складається з трьох секцій (рис. 1). На першому і другому поверсі розташовано нежитлові (офісні та технічні) приміщення, автопаркінг у підземній частині.

Житловий будинок № 1 запроєктований односекційним з габаритними розмірами в осях – 35,4×36,0 м. Житловий будинок № 2 запроєктований трисекційним з габаритними розмірами в осях: 1-ша і 3-тя секція – 33,9×21,3 м; 2-га секція – 40,2×21,3 м. Висота житлового поверха – 3,0 м. Основною несучою конструкцією є монолітний залізобетонний просторовий безригельний каркас за рамно-зв'язувальною схемою.



Рис. 1. Загальний вигляд багатоповерхових будинків на майданчику будівництва

Відповідно до інженерно-геологічних вишукувань, в геоморфологічному відношенні описуваний майданчик розташований у межах лівобережної першої надзаплавної тераси р. Дніпро. Рельєф майданчика рівнинний. Абсолютні відмітки поверхні знаходяться в межах 99,0 – 103,0 м. Геологічну будову розвідано на глибину до 45 м. Ґрунтові води наявні на глибинах 2,7 – 4,2 м. (рис. 2). Фізико-механічні характеристики ґрунтів згідно з інженерно-геологічними вишукуваннями наведено в табл. 1.

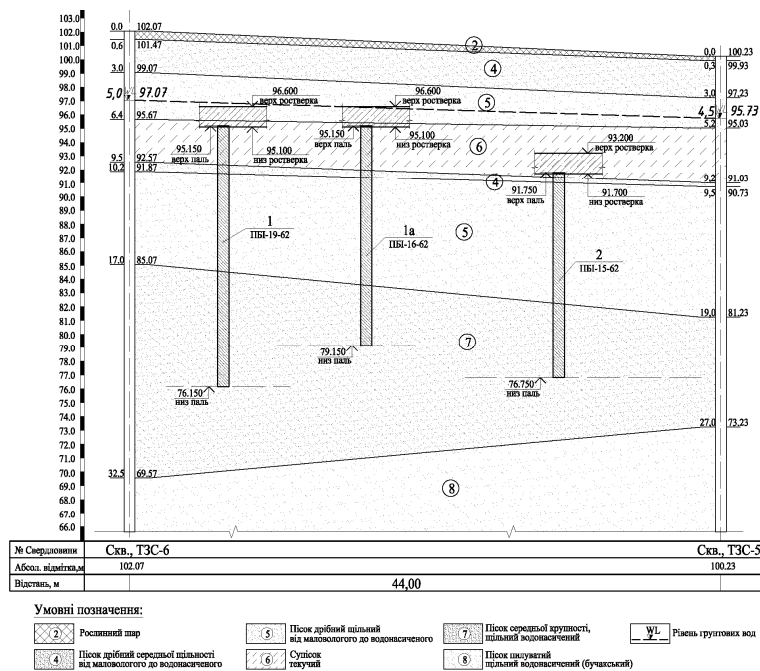


Рис. 2. Характерний інженерно-геологічний розріз майданчика будівництва й посадка фундаментів остаточного варіанта для будинку № 1 (1, 1a) та будинку № 2 (2)

Відповідно до проектних рішень у будинку №1 запропоновано влаштувати один підземний поверх, а в будинку №2 – два. Тому позначки верху фундаментів обох будинків різняться, що добре видно на рис. 2. У цьому випадку під подошвою фундаментної плити будинку №1 залягає супісок текучий (ІГЕ-6), який є сильно стисливим та не може використовуватися як основа. Для цього будинку питання застосування пальових фундаментів не виникало, а тільки стояло завдання оптимізувати попередні проектні рішення та прийняти раціональний варіант пальових фундаментів. До попередніх рішень фундаментів будинку №2 стояли такі вимоги. Оскільки верх фундаментів будинку №2 залягає нижче за верх фундаментів будинку №1 та прорізає слабкий шар ІГЕ-6 завдяки влаштуванню додаткового поверху, то постало питання щодо влаштування взагалі плитного фундаменту, тому що під подошвою фундаментної плити знаходиться пісок дрібний щільний (ІГЕ-5), який можна використати як основу.

**Основний матеріал і результати.** Для розв'язання поставлених завдань було розроблено скінченноелементні моделі багатопверхових будинків №1 та №2. Розрахункова схема включала в себе всі реальні геометричні розміри несучих конструкцій каркасів будинків, було враховано навантаження від розташованих поряд паркінгів, крайові умови визначалися наявністю підпірних стін і достатніми розмірами ґрунтового масиву за її межами. Габарити ґрунтового масиву також було досліджено за умови, що різниця між попередніми та наступними розрахунками знаходиться в межах 1 – 2%. Скінченноелементні моделі досліджуваних будинків наведено на рис. 3.

**Таблиця 1. Фізико-механічні властивості ґрунтів експериментального майданчика №2 за даними інженерно-геологічних вишукувань**

№ ІГЕ	Щільність ґрунту, г/см <sup>3</sup>	Природна вологість, д.о.	Коефіцієнт пористості, д.о.	Кут внутрішнього тертя, градуси	Питоме зчеплення, кПа	Модуль деформації, МПа
	$\rho$	$W$	$e$	$\varphi$	$c$	$E$
2	1,60	-	-	-	-	-
4	1,75	0,09	0,64	32	2	28
5	2,04	0,21	0,57	36	4	36
6	1,97	0,23	0,69	22	9	5
7	2,10	0,19	0,50	37	5	45
8	1,90	0,30	0,45	36	8	39

Для перевірки можливості влаштування плитного фундаменту для будинку №2 було виконано детальні дослідження та розрахунки. Так, аналіз результатів розрахунків двох варіантів фундаментів влаштування будинку на плитному й пальовому фундаментах показав такі відмінності. При використанні плитного фундаменту при діючому навантаженні у цих

грунтових умовах виникає осідання будинку до 20 см, яке має також і нерівномірний характер у бік паркінгу. Такі величини деформацій перевищують вимоги діючих норм. Якщо аналізувати значення згинальних моментів у фундаментній плиті, то виявляється, що вони становлять 3000 – 3400 кНм/м та виникають саме під несучими вертикальними елементами каркаса. Для забезпечення надійності й міцності цього перерізу фундаментної плити необхідне посилене армування.

При розгляді пальового фундаменту виявилось, що осідання фундаментної плити істотно зменшилося та становить 6,0 – 9,5 см, його значення перебуває в межах діючих норм. Згинальні моменти, які виникають у фундаментній плиті, також зменшилися на 26 – 33% і становлять 2000 – 2500 кНм/м, що є прийнятним з точки зору армування залізобетонних конструкцій. Тому, зважаючи на значні деформації та великі зусилля у фундаментній плиті при влаштуванні плитного фундаменту, було прийнято рішення влаштувати саме плитно-пальовий фундамент, але палями передбачити лише підсилення найбільш перевантажених зон фундаментної плити (під несучими конструкціями).

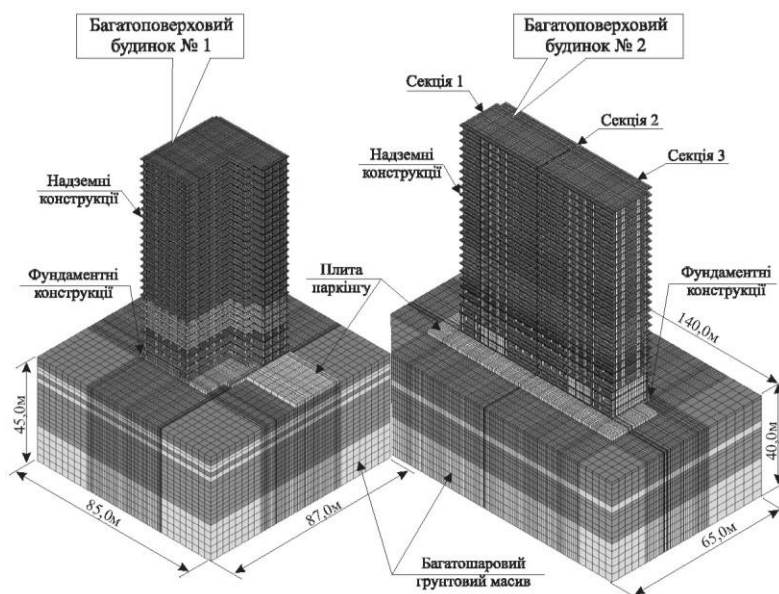


Рис. 3. Скінченноелементні моделі будинків № 1 та № 2

Попередні рішення фундаментів будинків були такими: запроектовано влаштувати буронабивні палі діаметром 620 мм і довжиною 26,0 м, основою для яких слугували піски ІГЕ-7 та ІГЕ-8, об'єднані суцільною фундаментною плитою висотою 1,5 м. Оскільки на будівельному майданчику було виконано багато точок статичного зондування ґрунтів, то стало можливим визначити несучу здатність палей різної довжини й прийняти оптимальний варіант довжини палей. Визначення несучої здатності палей за даними статичного зондування для буронабивних палей виконувалося за нормативними вимогами [9] як для забивних палей для зонду II типу (для бурових палей методика відсутня), лише при роботі бічної поверхні було враховано коефіцієнт умов роботи ґрунту на бічній поверхні

палі  $\gamma_{ef}$ , який приймався за таблицею Н.3.1 норм [8].

Остаточно було прийнято такі розміри паль: для будинку № 1 палі діаметром 620 мм довжиною 19,0 м, для будинку № 2 палі діаметром 620 мм довжиною 15,0 м. Тобто довжину паль було суттєво зменшено – на 7 м та на 11 м відповідно в будинку № 1 та № 2. У такому випадку основою для паль стали слугувати піски середньої крупності щільні – ІГЕ-7 (рис. 2). Також було запропоновано перейти з буронабивної технології влаштування паль на буроін'єкційну, що дозволило зменшити вартість будівельно-монтажних робіт. За результатами статичного зондування несуча здатність паль довжиною 15 м становила 2700 – 2950 кН (розрахункове навантаження відповідно 2160 – 2360 кН), а довжиною 19 м 2850 – 3085 кН (розрахункове навантаження відповідно 2280 – 2470 кН).

Для підтвердження прийнятої несучої здатності для паль довжиною 15 та 19 м було розроблено програму випробування статичним вдавлювальним навантаженням.

За результатами натурних випробувань дослідних паль було встановлено такі результати: для паль довжиною 15,0 м несуча здатність становить  $F_d=3750$  кН (розрахункове навантаження на палю  $N=3125$  кН); для паль довжиною 19,0 м –  $F_d=3000$  кН ( $N=2500$  кН). Додаткова довжина паль  $L=19,0$  м знаходиться в слабкому шарі ІГЕ-6, що негативно впливає на їх несучу здатність. Прогнозовані значення несучих здатностей паль було підтверджено. Графік залежності осідання палі від навантаження  $S=f(P)$  наведено на рис. 4.

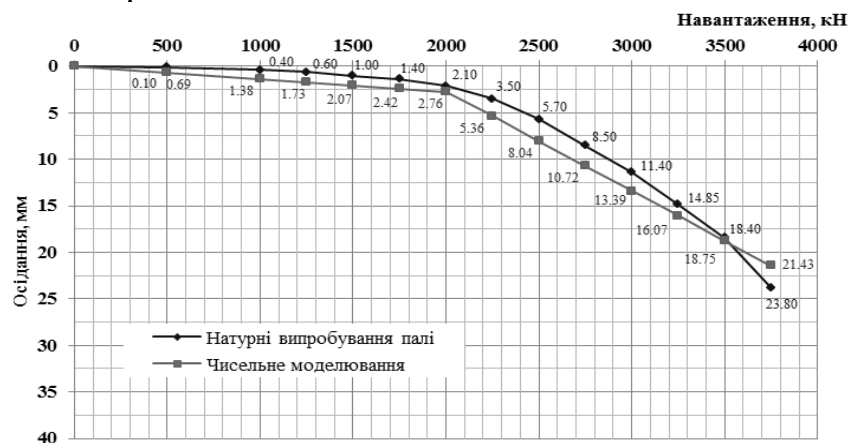


Рис. 4. Графік залежності осідання палі від навантаження (скінченноелементна модель досліджуваного будинку)

Для проведення розрахунку багатопверхових будинків № 1 та № 2 за розробленою розрахунковою схемою (рис. 3) необхідно коректно врахувати параметри ґрунтового середовища. Для цього було проведено ідентифікацію параметрів ґрунтів основи за головним показником – модулем загальної деформації ґрунтів ( $E$ ). Ідентифікацію такого параметра виконували на основі реальних випробувань дослідних паль шляхом проведення чисельного моделювання поступового навантаження палі, яке відповідає програмі випробування, та контролю значення модуля деформації ґрунтів на

кожному етапі навантаження палі, а також його уточнення й коригування для проведення розрахунків на наступному етапі навантаження. Графік осідання палі від навантаження за натурними випробуваннями та чисельним моделюванням наведено на рис. 4. Уточнені таким чином параметри ґрунтової основи прийнято у наступних розрахунках системи «основа – фундамент – надземні конструкції».

Осідання й згинальні моменти фундаментної плити будинку № 1 наведено на рис. 5. Як видно з рисунка, максимальні осідання формуються в зоні ядра жорсткості будинку зі зміщенням у бік паркінгу, тому що вага паркінгу створює додаткове привантаження на пальовий фундамент багатопверхового будинку № 1. Картина розподілу осідань фундаментних плит будинку № 2 має дещо інший характер: найбільше осідає середня секція будинку в зоні ядра жорсткості та дещо зміщена також у бік паркінгів. Секції 1 та 2 осідають у бік центральної секції з невеликим зміщенням у бік паркінгів. Це пояснюється тим, що секції будинку № 2 будували паралельно, тобто навантаження на основу зростали пропорційно. У розрахунках було враховано поетапне зведення конструкцій будинків.

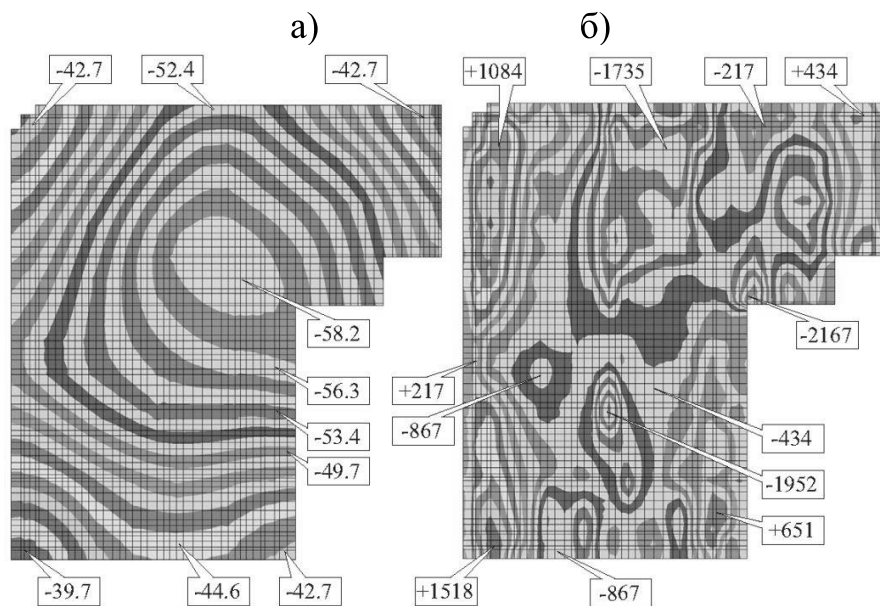


Рис. 5. Результати розрахунків багатопверхового будинку № 1: а) осідання фундаментної плити (мм); б) згинальні моменти у фундаментній плиті в напрямку X (кНм/м)

Щодо згинальних моментів бачимо, що максимальні їх значення виникають у зоні великих концентраторів напружень: у зоні ядра жорсткості та окремих вертикальних елементів. Якщо проаналізувати значення згинальних моментів, то видно, що для їх сприйняття не потрібно значного армування. Це досягнуто завдяки тому, що палі розташовувалися безпосередньо під несучими конструкціями будинку, враховуючи при цьому центри ваги надземних та фундаментних конструкцій.

У результаті виконаних досліджень було розроблено раціональне

розташування паль у межах фундаментів будинків № 1 і № 2. План пального поля будинку № 1 наведено на рис. 6. Загальна кількість паль будинку № 1 становить 276 шт., на плані пального поля будинку № 2 палі розташовано безпосередньо під несучими вертикальними конструкціями каркаса. Загальна кількість паль усього будинку № 2 по трьох секціях становить 536 шт.

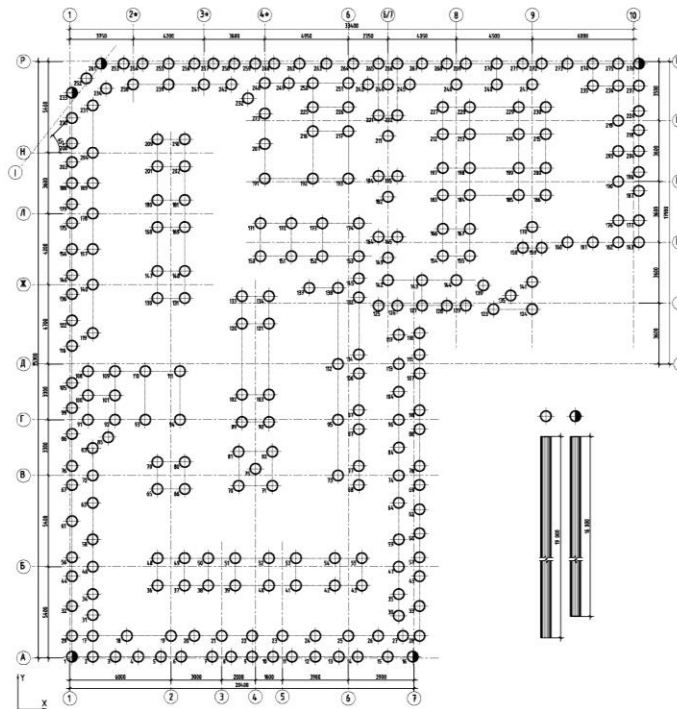


Рис. 6. План розташування паль будинку № 1 (довжина паль 19 м, а заштрихованих п'яти паль – 16 м)

Слід звернути увагу на те, що палі при їх натурному випробуванні статичним вдавлюючим навантаженням показали досить хороші результати та великі значення. Розрахункове навантаження на палю було прийняте за умови міцності поперечного перерізу палі, тому що несуча здатність палі по ґрунту перевищувала несучу здатність палі за матеріалом стовбура. Тому при проведенні розрахунків окремі периферійні палі в будинку № 1 отримали навантаження, яке перебільшує їх несучу здатність по матеріалу (що було спрогнозовано при їх випробуванні). У такому випадку було застосовано методикау зменшення довжини перевантажених паль. У результаті отримали палеве поле з палями довжиною 19 м у кількості 271 шт. та п'ять паль з довжиною 16 м (рис. 6). Посадку паль на геологію наведено на рис. 2 для багатоповерхового будинку №1 та №2, де наочно зображено абсолютне положення кожної з паль по висоті.

На сьогодні багатоповерхові будинки № 1 і № 2 побудовано та здано в експлуатацію.

**Висновки.** Виконані розрахунки й аналіз результатів дозволяють зробити такі загальні висновки:

1. Усебічне вивчення вихідної інформації, детальний аналіз



інженерно-геологічних умов, планувально-конструктивної схеми будинків, проектних рішень надземних та фундаментних конструкцій, а також виконання комплексних досліджень зміни НДС елементів системи «основа – фундамент – надземні конструкції» за допомогою методики чисельного моделювання дозволяють отримувати надійні й економічні рішення фундаментних конструкцій.

2. Підтверджено, що найефективнішими фундаментами для багатопверхових будинків є пальові, об'єднані фундаментною плитою, що працюють як єдине ціле. За наявності пальового фундаменту осідання фундаментної плити зменшилося вдвічі, а згинальні моменти – близько 35% в порівняно з плитним фундаментом.

3. Показано, що раціональне розташування паль у фундаменті дозволяє зменшити загальну їх кількість до 15%.

4. Установлено, що влаштування фундаментів з палями різної довжини в складних ґрунтових умовах дозволяє досягнути ефективного та рівномірного перерозподілу зусиль у фундаментних конструкціях, що приводить до зменшення зусиль у них.

#### Література

1. Бартоломей, А.А. Расчет и проектирование свай и свайных фундаментов / А.А. Бартоломей // Тр. II Всесоюзной конф. – Пермь. – 1990. – С. 15 – 20.
2. Бойко, І.П. Особливості взаємодії пальових фундаментів під висотними будинками з їх основою / І.П. Бойко // Основи і фундаменти: міжвідомчий науково-технічний збірник. – Вип. 30. – К.: КНУБА, 2006. – С. 3 – 8.
3. Далматов, Б.И. Проектирование свайных фундаментов в условиях слабых грунтов / под ред. д-ра наук. проф. Б.И. Далматова. – Л.: Стройиздат, Ленингр.от., 1975. – 240 с.
4. Пилягин, А.В. О взаимном влиянии свай / А.В. Пилягин // Механика грунтов, основания и фундаменты. – Л.: ЛИСИ, 1968. – С. 35 – 40.
5. Підлуцький, В.Л. Перерозподіл зусиль в пальовому фундаменті при влаштуванні паль різної довжини / В.Л. Підлуцький // Основи і фундаменти: міжвідомчий науково-технічний збірник. – Вип. 30. – К.: КНУБА, 2006. – С. 77 – 83.
6. Катценбах, Р. Последние достижения в области фундаментостроения высотных зданий на сжимаемом основании / Р. Катценбах // Вестник МГСУ. – Вып. 1. – 2006. – С. 105 – 118.
7. Улицкий, В.М. Расчеты и интерактивный мониторинг при строительстве зданий в сложных грунтовых условиях / В.М. Улицкий, К.Г. Шашкин, А.Г. Шашкин // Технологии безопасности и инженерные системы. – №2(13). – С-Пб: Стройиздат. – 2007. – С. 16 – 19.
8. Основи та фундаменти споруд. Зміна № 1: ДБН В.2.1–10–2009. – [Чинний від 2011–07–01]. – К.: Мінрегіонбуд України, 2011. – 55 с.
9. Палі. Визначення несучої здатності за результатами польових випробувань: ДСТУ Б В.2.1–27:2010. – [Чинний з 2011–07–01]. – К.: Мінрегіонбуд України, 2011. – 11 с.

Надійшла до редакції 02.10.2013  
©І.П. Бойко, О.В. Пятков, В.Л. Підлуцький