

*І.П. Бойко, д.т.н., професор  
В.Л. Підлуцький, асистент*

*Київський національний університет будівництва і архітектури*

## **ДОСЛІДЖЕННЯ ВЛАШТУВАННЯ ПАЛЬ У ФУНДАМЕНТІ РІЗНОЇ ДОВЖИНИ**

*Наведено особливості влаштування палей у фундаменті різної довжини. Методами чисельного моделювання роботи системи «основа – фундаменти – надземні конструкції» розв'язані задачі виявлення зусиль у фундаментах, перерозподілу зусиль у палях залежно від їх довжини і місця розташування. Порівняно отримані дані з результатами натурних експериментальних спостережень за поведінкою несучих конструкцій висотного будинку.*

**Ключові слова:** чисельне моделювання, палі різної довжини, розташування палей, експериментальні спостереження.

*И.П. Бойко, д.т.н., профессор  
В.Л. Подлуцкий, ассистент*

*Киевский национальный университет строительства и архитектуры*

## **ИССЛЕДОВАНИЕ УСТРОЙСТВА СВАЙ В ФУНДАМЕНТЕ РАЗНОЙ ДЛИНЫ**

*Приведены особенности устройства свай в фундаменте разной длины. Методами численного моделирования работы системы «основание – фундаменты – надземные конструкции» решены задачи выявления усилий в фундаментах, перераспределения усилий в сваях в зависимости от их длины и места расположения. Сравнено полученные данные с результатами натурных экспериментальных наблюдений за поведением несущих конструкций высотного здания.*

**Ключевые слова:** численное моделирование, сваи разной длины, расположение свай, экспериментальные наблюдения.

*I.P. Boyko, Prof., DrSc.  
V.L. Pidlutskiy, Assistant*

*Kyiv National University of Construction and Architecture*

## **PLACEMENT FOUNDATION PILES IN VARIOUS LENGTHS**

*The show features the device piles of different lengths in the foundation. Methods of numerical simulation of the system is «basis – the foundation – superstructure» solved the problem identification efforts in foundations, redistribution efforts in piles according to their length and location. Compare our data with the results of full-scale experimental observations of the behavior of load-bearing structures of high-rise buildings.*

**Keywords:** numerical simulation, piles of different lengths, location of piles, experimental observations.

**Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими практичними завданнями.** Будівництво висотних будинків вимагає більш детального вивчення та дослідження перерозподілу зусиль у фундаментних конструкціях та ґрунтовому масиві для розроблення надійних та ефективних проектних рішень фундаментів. Для висотних будинків в умовах слабких верхніх шарів основи зазвичай влаштовують пальові фундаменти. За допомогою таких фундаментів є можливість передати навантаження від надземних конструкцій будинку на більш міцні шари ґрунтів, що залягають на значній глибині.

Проектування пальових фундаментів супроводжується встановленням та обґрунтуванням раціональної довжини паль. На ряду з розробленням проектних рішень у сучасних умовах необхідно проводити порівняння результатів розрахунків з результатами натурних інструментальних спостережень для обґрунтування правильності прийнятих розрахункових передумов.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій, у яких започатковано розв'язання проблеми.** Як відомо, розподіл навантаження між палями у межах фундаменту в процесі їх роботи у складі системи «основа - пальовий фундамент - надземні конструкції» відбувається нерівномірно. Так, найбільше завантажуються периферійні палі, середні ж палі залишаються недовантаженими. 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, О.В. Пілягін, Р. Катценбах та інші [1 – 7].

**Виділення не розв'язаних раніше частин загальної проблеми.** Не завжди розташуванням паль у фундаменті вдається досягнути оптимального перерозподілу між ними внутрішніх зусиль. Досить часто навантаження на периферійні палі перевищують несучу здатність палі по ґрунту, тому доцільно для вирівнювання зусиль у палях влаштовувати їх різної довжини у межах пальового фундаменту висотного будинку. Такий підхід до влаштування пальового поля ще недостатньо розглянуто в опублікованих джерелах і майже не використовується на практиці. Відомі окремі випадки влаштування паль різної довжини у фундаменті [1, 4 – 6].

За наявності потужних електронно-обчислюваних машин дослідження зміни напружено-деформованого стану (НДС) системи «основа - пальовий фундамент - надземні конструкції» дозволяє виконувати методика чисельного моделювання з використанням методу скінченних елементів, що застосовується у багатьох сучасних програмних комплексах. Результати таких розрахунків вимагають обов'язкової перевірки отриманого НДС фундаментних конструкцій шляхом проведення експериментальних натурних спостережень, наприклад спостереження за деформаціями несучих конструкцій висотних будинків у процесі будівництва, а також проведення контрольних замірів протягом деякого часу. Тому результати чисельних розрахунків таких досліджень повинні узгоджуватися з натурними інструментальними вимірюваннями.

На прикладі експериментального висотного будинку у м. Франкфурт-на-Майні, запроектованого проф. Р. Катценбахом [6], показано розподіл зусиль між палями та ростверком, а також вертикальні деформації будинку, що встановлені експериментально. Результати експериментальних спостережень заплановано порівняти з чисельними розрахунками.

**Мета досліджень:** показати особливості сумісної роботи пальового поля та фундаментної плити залежно від габаритів паль; порівняти перерозподіл внутрішніх зусиль в палях, визначених експериментально та за допомогою чисельного моделювання, а також відповідних вертикальних переміщень при обґрунтованій довжині паль.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Результати експериментальних спостережень, що наведені в друкованих працях проф. Р. Катценбаха, порівнюються з даними, отриманими чисельним моделюванням за допомогою програмного комплексу VESNA, який включає добре зарекомендовані скінченно-елементні бібліотеки та алгоритми розв'язку лінійних та нелінійних задач механіки (включаючи задачі механіки ґрунтів), які були випробувані в системах «ПРОЧНОСТЬ-75», «КОМБІК», «РОСИНКА», «APROKS» та інші. Для моделювання процесів нелінійного деформування ґрунтів використана модель фізично нелінійного пружно-пластичного ґрунтового середовища, що базується на дилатансійній теорії [2]. Для визначення приросту пластичних деформацій використовується неасоційований закон пластичної течії. Як умова пластичної течії використовується критерій Мізеса – Шлейхера – Боткіна, модифікований професором

І.П. Бойком [2] для підвищення збіжності результатів моделювання з експериментальними даними в широкому діапазоні навантажень.

Взаємодія висотних споруд із ґрунтовою основою залежить від габаритів плити-ростверку і в першу чергу від співвідношення розмірів будинку в плані і довжини палей, а також від кількості та розміщення палей у складі фундаменту. Тому при обґрунтуванні довжини палей, доцільно розділяти фундаменти із застосуванням палей на два типи: один слід називати палевим фундаментом, а другий – палевою основою, оскільки в цьому разі деформації визначаються розміром будівлі, а палі тільки покращують властивості ґрунту у верхній частині основи внаслідок її ущільнення. Як додаткову ознаку взаємодії системи «основа – фундамент» можна використовувати накладення напружень від ростверку на напруження в площині подошви палей для випадку палевої основи і відсутності накладання таких зон у випадку палевого фундаменту (рис. 1).

Перерозподіл зусиль між палями й ростверком у разі палевої основи відбувається наступним чином: ростверк сприймає близько 45 % від загального навантаження, а палі – близько 55 %. У разі палевого фундаменту такий перерозподіл змінюється: відповідно близько 15 – 20 % на ростверк і 80 – 85 % на палі, що було відзначено при різних ґрунтових умовах. Проведені дослідження вказують на необхідність урахувувати в розрахунку габарити палей і ростверків при взаємодії їх з ґрунтовою основою. У цьому випадку виконується сумісна робота палей з ростверком. Для висотних будинків у таких випадках часто застосовується термін «комбінований плитно-пальовий фундамент (КППФ)» [7].

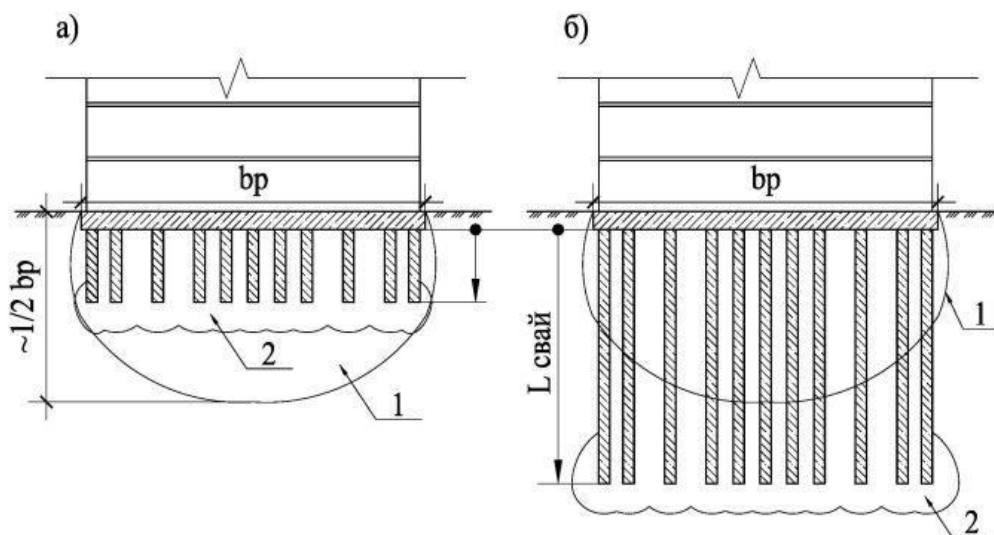


Рисунок 1 – Взаємодія фундаментних конструкцій з ґрунтовим масивом:  
а) палева основа; б) пальовий фундамент; 1 – зона деформації під ростверком;  
2 – зона деформації під подошвою палей

Для проектування висотних будинків, які зводяться в стиснених умовах мегаполісів, як правило, використовують різні програмні комплекси (SCAD, Lira, Мономах, VESNA, Plaxis, Z-Soil, ANSYS та ін.), що враховують взаємодію ґрунтів основи з конструкціями будинку. Важливим етапом при проектуванні є перевірка збіжності прийнятої моделі деформування ґрунтової основи з реальними даними.

Перерозподіл зусиль у палевому фундаменті висотного будинку, який досліджується, планується розглянути на реальному об'єкті, де в процесі його зведення проводилися експериментальні вимірювання та порівняти їх з результатами моделювання. Будинок, що досліджується, побудований у 1988 – 1990 рр. у м. Франкфурт-на-Майні, має висоту 256 м, багатопверховий, з різним плануванням поверхів, верхня частина виконана у вигляді шпиля (рис. 2).

Фундамент, як зазначено вище, комбінований плитно-пальовий. Розміри фундаментної плити в плані 58,8x58,8 м, товщина змінна: від 3 м по контуру будинку до 6 м у центральній частині (рис. 3). Ґрунтовий масив з поверхні характеризується піском та гравієм, під яким залягає глина франкфуртська, яка є основою для паль. Необхідно зауважити і те, що на майданчику високий рівень ґрунтових вод. Уже один підземний поверх знаходиться нижче даного рівня.

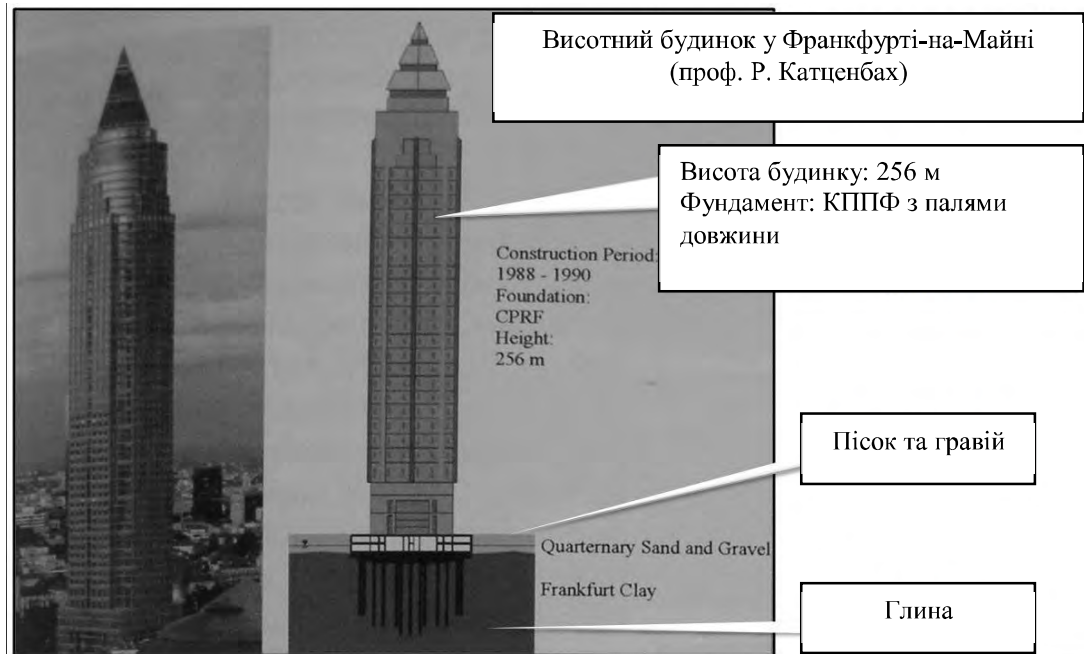


Рисунок 2 – Конструктивні рішення будинку

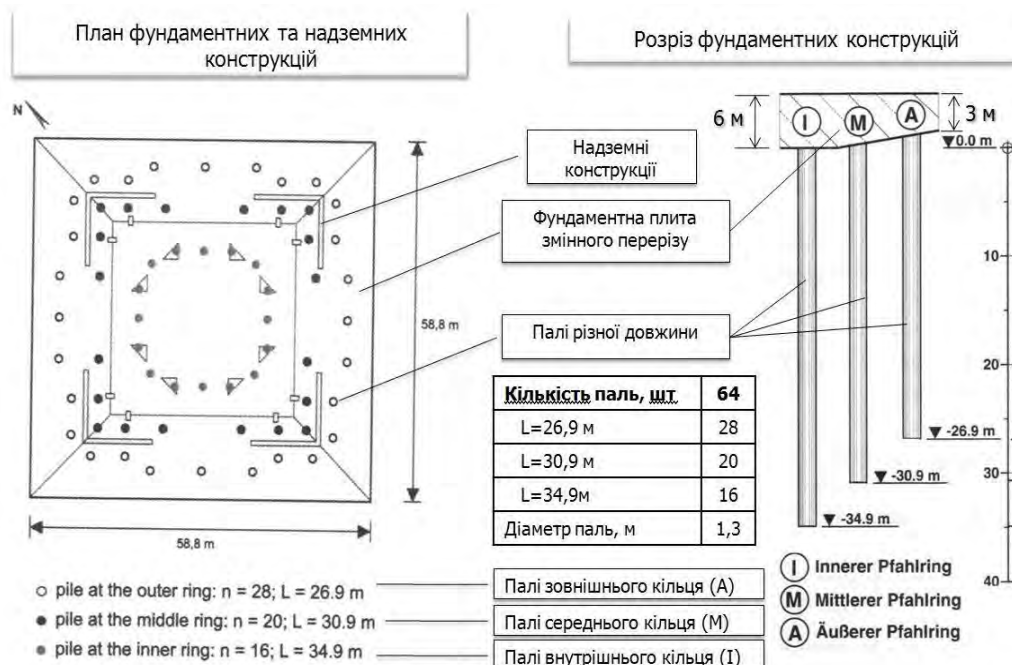


Рисунок 3 – Конструктивні рішення фундаментів

Палі в будинку, що розглядається, розташовано по трьох кільцях: зовнішньому, середньому та внутрішньому. У межах кожного кільця палі мають різну довжину. Так, палі зовнішнього кільця влаштовані довжиною 34,9 м, середнього кільця – 30,9 м, внутрішнього – 26,9 м. Діаметр паль становить 1,3 м. Загальна кількість – 64 штук (рис. 3).

Для об'єкта, що розглядається, розроблена скінченноелементна модель (рис. 4), в якій враховано конструктивні особливості несучих елементів каркаса будинку. Після проведення розрахунків за допомогою чисельного моделювання виконано порівняльний аналіз результатів, які визначено експериментально та розрахунком (рис. 5 та рис. 6).

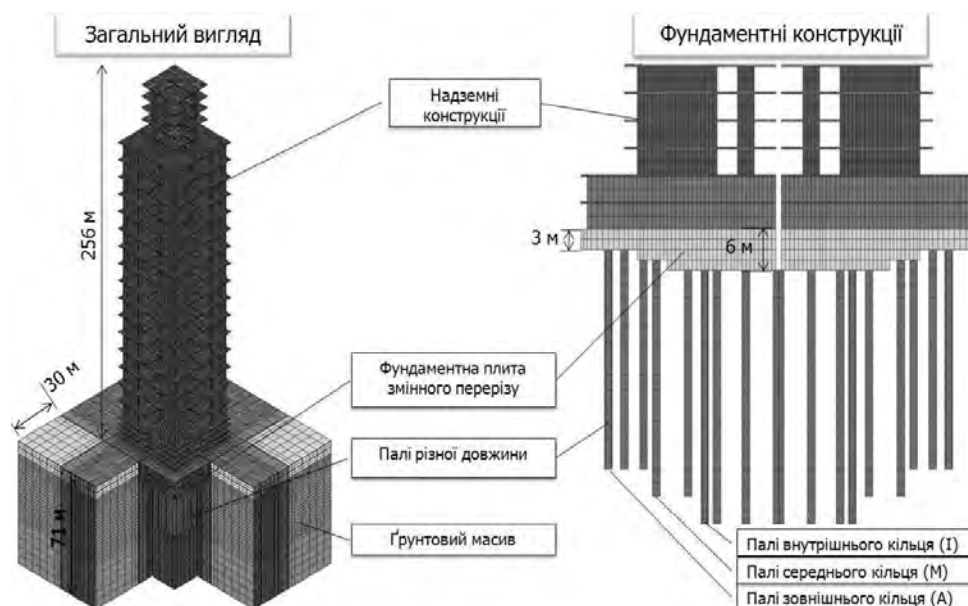


Рисунок 4 – Скінченно-елементна модель будинку, що досліджується

Слід зауважити, що наведені дослідження з порівняння результатів чисельного моделювання з даними натурних спостережень одночасно є і тестовою задачею для перевірки збіжності прийнятої моделі деформування ґрунтового середовища. Такі задачі рекомендовано проводити на кожному етапі використання тієї чи іншої моделі деформування ґрунтів основи. Також необхідно відмітити і той факт, що при проведенні розрахунків висотного будинку матеріали були зібрані з різних літературних джерел, де автор (проф. Р. Катценбах) висвітлює в основному результати спостережень, а параметри ґрунтів основи наведені не в повному обсязі. Окремо дані були отримані на Міжнародній геотехнічній конференції: «Геотехнічні проблеми мегаполісів» з доповіді автора, яка проводилася в 2010 році у Москві.



Рисунок 5 – Вертикальні деформації фундаментної плити, см

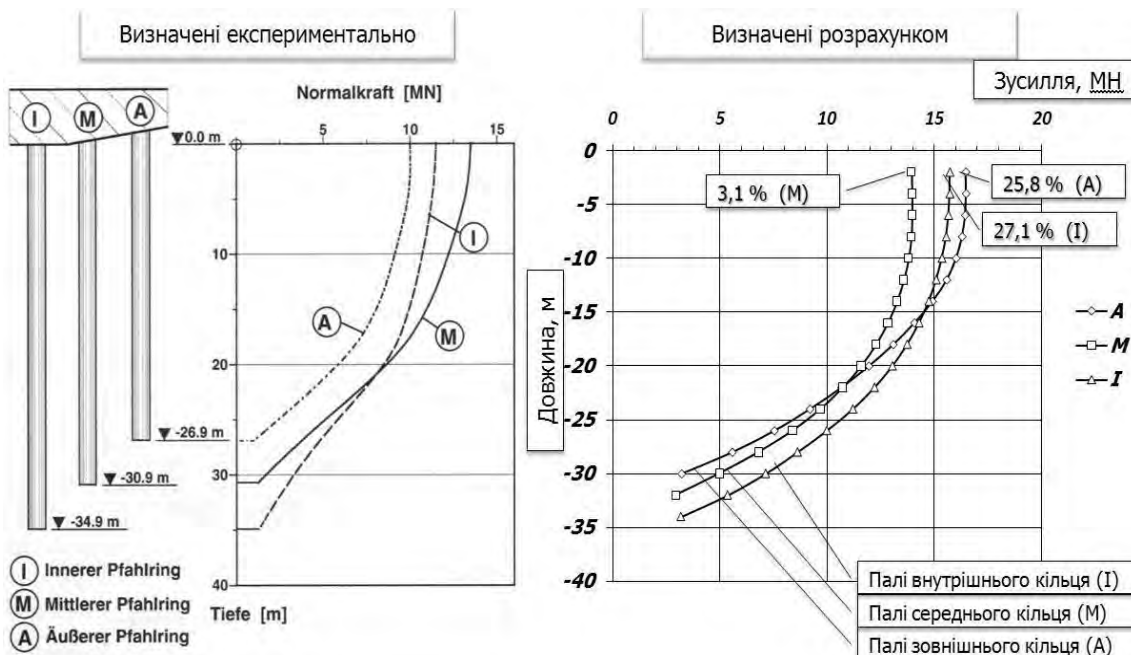


Рисунок 6 – Зусилля по довжині палів

Як відомо, в комбіновано-плитно-пальовому фундаменті з великою кількістю палів розподіл навантажень між плитою та палями в центральних та периферійних частинах плити суттєво відрізняються від пальового фундаменту без плит [4, 5]. У периферійній частині плити палі несуть більші навантаження, ніж у центральній частині (рис. 6), причому ця закономірність залежить від відносної відстані між палями. Такий перерозподіл зусиль у палях підтверджується і при дослідженнях, приведених у даній роботі. Аналіз зусиль при чисельних розрахунках, які виникають по довжині палів, показує, що перерозподіл відбувається відповідно до експериментальних даних з деякими відхиленнями. Деякі неточності пояснюються відсутністю повної вихідної інформації та характеру завантаження будівлі в процесі будівництва.

При порівнянні вертикальних деформацій фундаментної плити (рис. 5) встановлено, що характер їх перерозподілу при чисельному моделюванні ідентичний натурним вимірюванням, а значення максимальних переміщень знаходяться в межах 7,5 %. Цей факт говорить про високу збіжність результатів розрахунків з натурними експериментами при використанні прийнятої моделі деформування ґрунтового середовища.

Виконані розрахунки та аналіз результатів дозволяють зробити наступні загальні висновки:

1. У результаті проведених досліджень встановлено, що вертикальні деформації, визначені за розробленою методикою, узгоджуються з експериментальними даними, розбіжність у результатах не перевищує 10 %.

2. Розподіл зусиль у палях внутрішнього кільця, визначених шляхом чисельного моделювання, відрізняється до 27 %, що пов'язано з характером завантаження, проміжні дані в друкованих матеріалах не приведені. Зусилля в палях середнього кільця узгоджуються з експериментальними даними (розбіжність у межах 5 %).

3. Проведення експериментальних досліджень та організація моніторингу під час зведення висотних будинків дозволяє приймати надійні рішення при проектуванні і контролювати дані чисельних розрахунків.

4. Установлено, що використання прийнятої методики чисельного моделювання та перевірка отриманих результатів згідно з експериментальними даними забезпечить

розроблення раціональних розмірів фундаментних конструкцій та сприятиме економії ресурсів для зведення будівель.

#### *Література*

1. Бартоломей, А.А. Расчет и проектирование свай и свайных фундаментов / А.А. Бартоломей // Тр. II Всесоюзной конф. – Пермь, 1990. – С. 7 – 13.
2. Бойко, І.П. Особливості взаємодії пальових фундаментів під висотними будинками з їх основою / І.П. Бойко // Основи і фундаменти: Міжвідомчий наук.-техн. зб. – Вип. 30. – К.: КНУБА, 2006. – С. 3 – 8.
3. Далматов, Б.И. Проектирование свайных фундаментов в условиях слабых грунтов / Б.И. Далматов, Ф.К. Лапшин, Ю.В. Россихин. – Л.: Стройиздат, 1975. – 240 с.
4. Пилягин, А.В. О взаимном влиянии свай / А.В. Пилягин // Механика грунтов, основания и фундаменты. Докл. к XXVII науч.конф. ЛИСИ. – Л.: ЛИСИ, 1968. – 90 с.
5. Підлуцький, В.Л. Перерозподіл зусиль у 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 // Весник МГСУ, 2006, Вип. 1. – 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.

*Надійшла до редакції 17.09.2012*

*© І.П. Бойко, В.Л. Підлуцький*