

УДК 624.131

**ОСОБЛИВОСТІ ВЛАШТУВАННЯ ПАЛЬ РІЗНОЇ ДОВЖИНИ У ФУНДАМЕНТІ**

О. В. Титко

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

**Ключові слова:** математичне моделювання, палі різної довжини, розташування палей, експериментальні дослідження.

**ОСОБЕННОСТИ УСТРОЙСТВА СВАЙ РАЗНОЙ ДЛИНЫ В ФУНДАМЕНТЕ**

О. В. Титко

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

**Ключевые слова:** математическое моделирование, сваи разной длины, расположение свай, экспериментальные исследования.

**PLACEMENT FOUNDATION PILES IN VARIOUS LENGTHS**

O. Tytko

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

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

**Вступ**

Фундаменти з групи взаємозалежних палей, як правило, влаштовують під великі потужні споруди промислового виробництва, під будівництво висотних будинків та під будови на слабких ґрунтах. Об'єми витрат при виконанні таких фундаментів сягають 15-30 % від загальних витрат на будівництво і пов'язані, насамперед, з тим, що сучасна теорія розрахунків підвалів фундаментів з групи палей не дозволяє дати вичерпні відповіді на чисельні запитання, що виникають в процесі дослідження напружено-деформованого стану ґрунту в навколо палевому просторі. Тому виникає актуальність та доцільність в додаткових дослідженнях моделі “фундамент – основа” та розробці методів розрахунку по знижені витрат на влаштування таких фундаментів.

Проектування палевих фундаментів супроводжується встановленням та обґрунтуванням раціональної довжини палей. 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.

Як відомо, розподіл навантаження між палями у межах фундаменту в процесі їх роботи у складі системи «основа – палевий фундамент» 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 [1-8].

Не завжди розташуванням паль у фундаменті вдається досягнути оптимального перерозподілу навантаження від наземної частини споруди. 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 пального фундаменту висотного будинку. Такий підхід до влаштування пального 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 - паливий 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 [2,3,5].

На прикладі експериментального висотного будинку у м. Франкфурт-на-Майні, запроєктованого 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.

### Постановка задачі

Показати особливості сумісної роботи пального 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.

Взаємодія висотних споруд із ґрунтовою основою залежить від габаритів плити-ростверку і в першу чергу від співвідношення розмірів будинку в плані і довжини паль, а також від кількості та розміщення паль у складі фундаменту. Тому при обґрунтуванні довжини паль, доцільно розділяти фундаменти із застосуванням паль на два типи: один слід називати паливим фундаментом, а другий – паливою 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 підошви паль для випадку пальної основи і відсутності накладення таких зон у випадку пального фундаменту (рис. 1).

Перерозподіл зусиль між палями й ростверком у разі пальної основи відбувається наступним чином: ростверк сприймає близько 45 % від загального навантаження, а палі - близько 55 %. У разі пального 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 паль і ростверків при взаємодії їх з ґрунтовою основою. У цьому випадку виконується сумісна робота паль з ростверком. Для висотних будинків у таких випадках часто застосовується термін «комбінований плитно-паливий фундамент» [2-7].

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 паливому 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, багатоповерховий, з різним плануванням поверхів, верхня частина виконана у вигляді шпиля (рис. 2) [6].

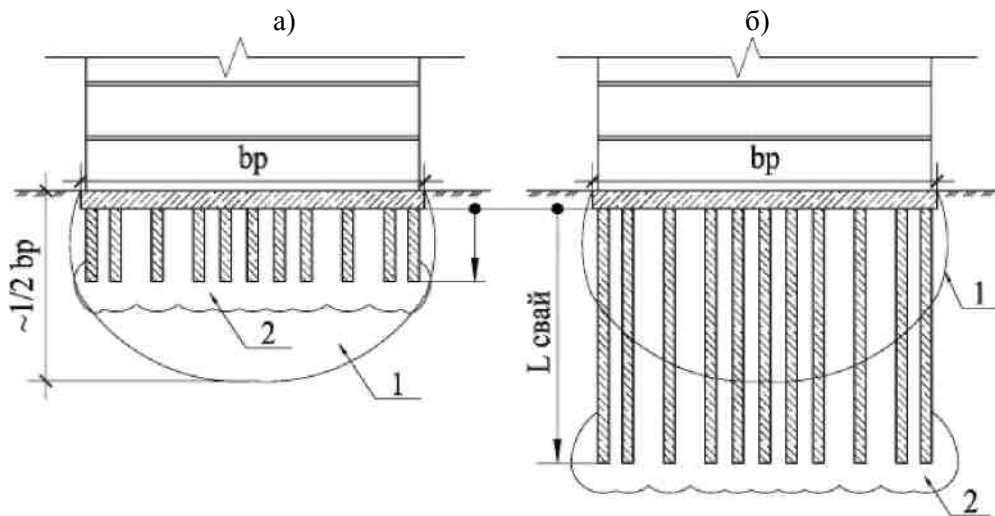


Рисунок 1 – Взаємодія фундаментних конструкцій з ґрунтовим масивом:  
а) польова основа; б) польовий фундамент; 1 – зона деформації під ростверком;  
2 – зона деформації під подошвою паль

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. 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. 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).

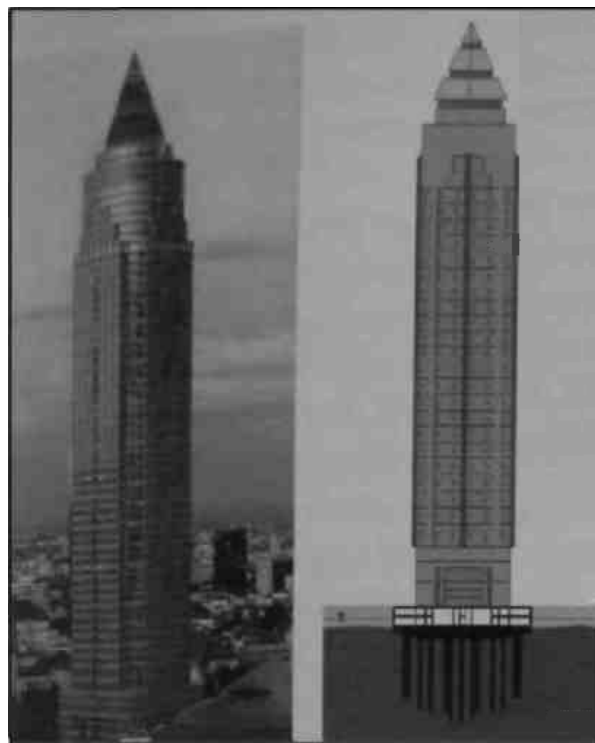


Рисунок 2 – Конструктивні рішення будинку

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). [2,3,5].

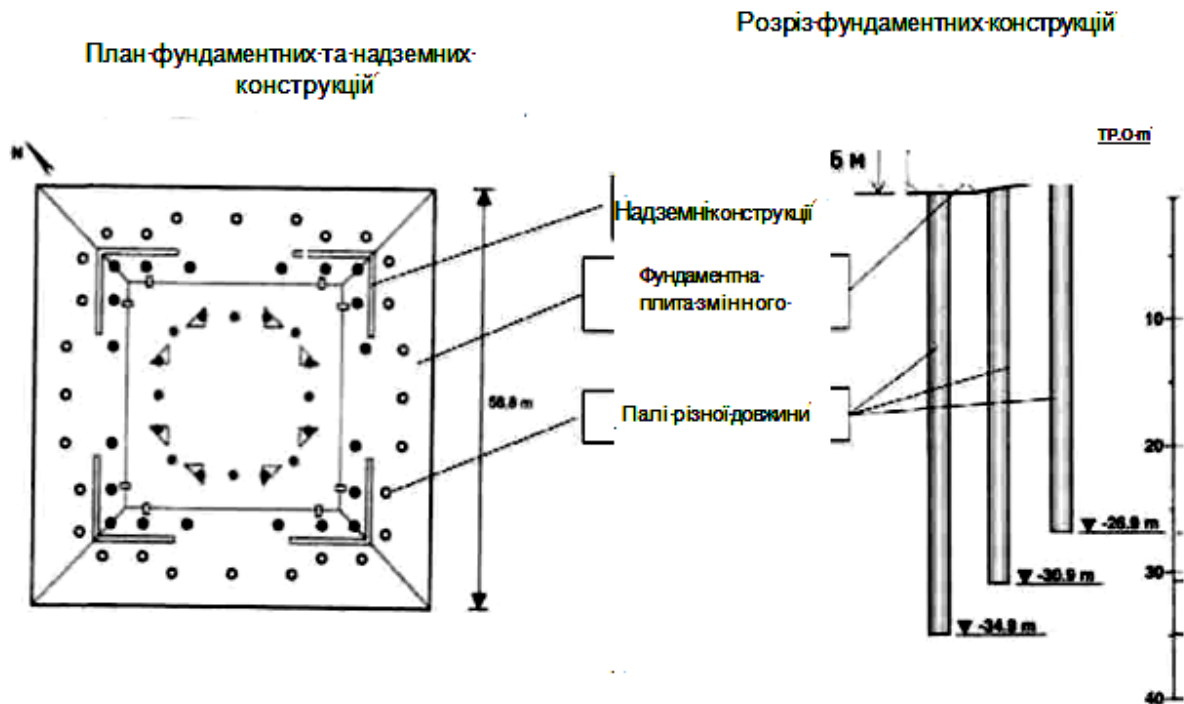


Рисунок 3 – Конструктивні рішення фундаментів

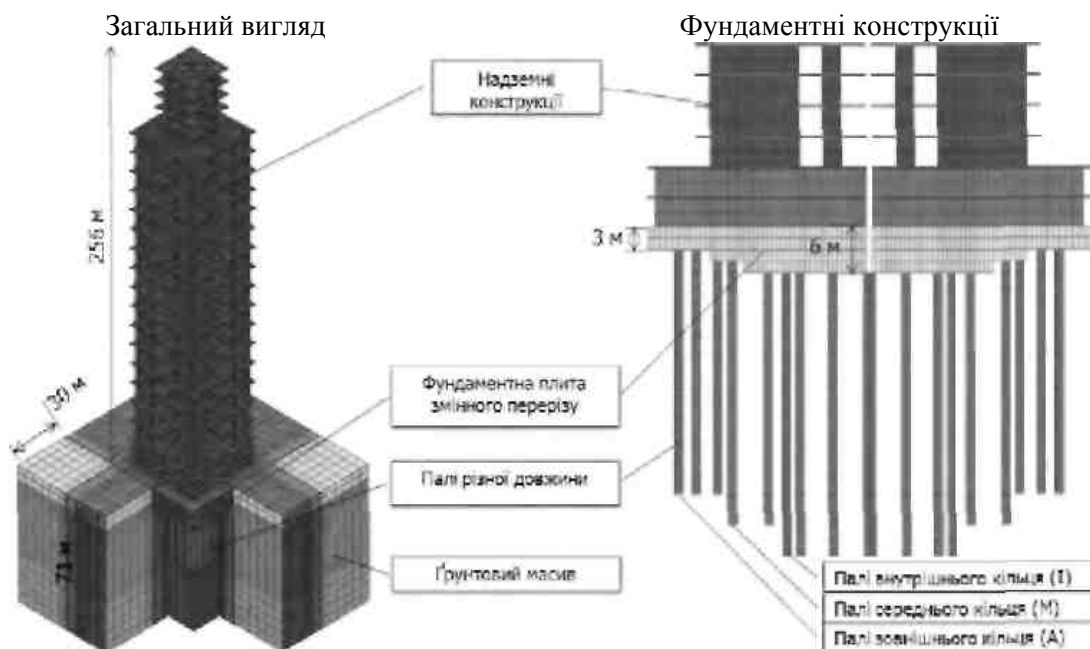


Рисунок 4 – Скінченно-елементна модель будинку, що досліджується

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 основні результати спостережень [6].

Визначені експериментально

Визначені розрахунком

**Основний матеріал**

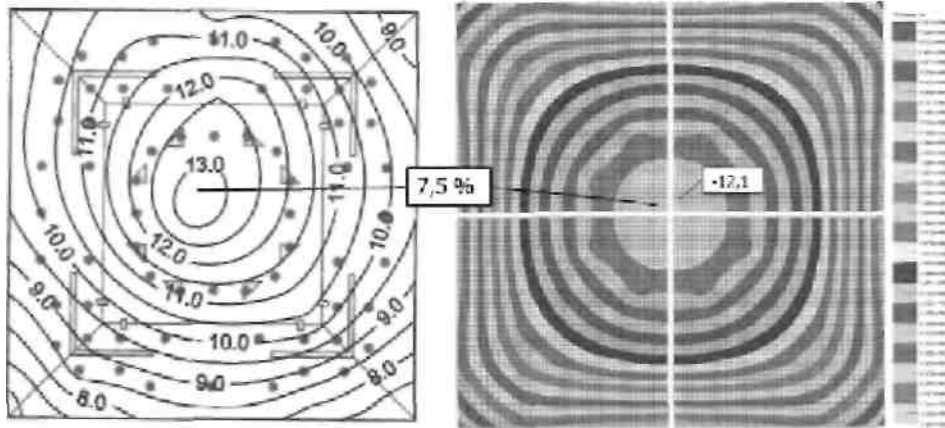


Рисунок 5 – Вертикальні деформації фундаментної плити, см

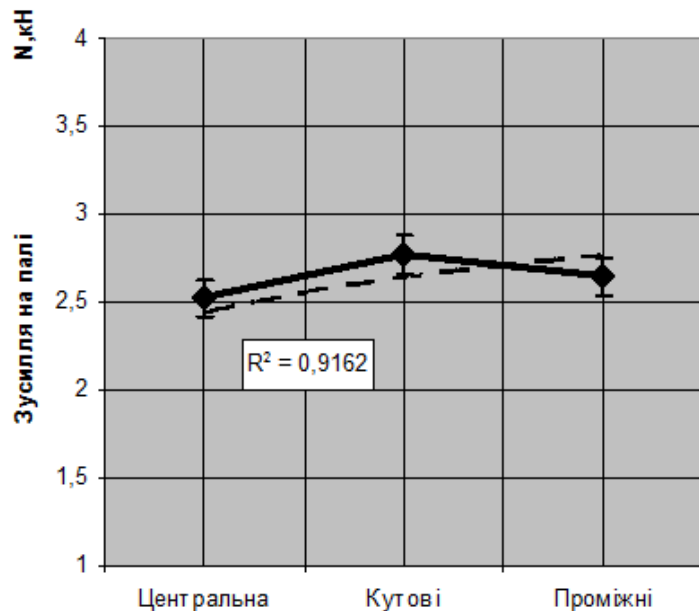
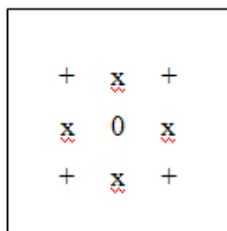
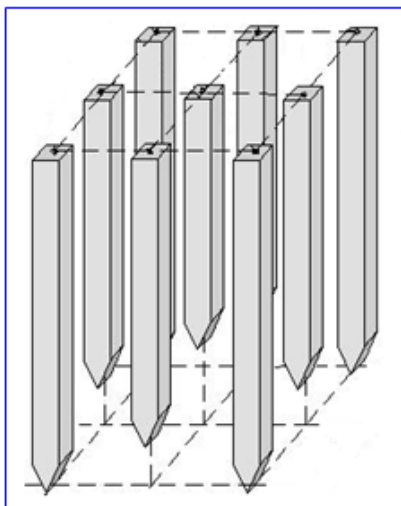


Рисунок 6 – Порівняння теоретичних та експериментальних даних по розподілу зусиль між палями групи:

+ – довга паля; x – середня паля; 0 – коротка паля,  
 - - - - - теоретичні, ————— експериментальні

Як відомо, в комбіновано-плитно-пальовому фундаменті з великою кількістю палей 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. Тому, ще можна розглядати інший варіант пальового фундаменту, в якому довгі палі розташовані по периметру, а короткі в середині. Порівняння зусиль, які приходяться на окремі палі в групі до загального навантаження на групу при заданій осадці дозволили встановити, що кутові палі сприймають 12-13% загального навантаження, а проміжні біля 10% і центральна паля 6-8% [7].

Використання даної конфігурації пальового фундаменту дозволяє скоротити загальну довжину палей у фундаменті до 12 %, що зменшує витрати бетону та трудовитрати по їх

влаштуванню. Виконані автором дослідження показують, що при скороченні довжини паль несуча здатність групи із паль різної довжини рівна несучій здатності групи із паль однієї довжини (рис. 7).

Окрім вище зазначених переваг даної конфігурації, є ще важливе питання про зменшення згинальних моментів в плиті ростверку до 12-13 %, що також приводить до скорочення витрат матеріалів на виготовлення самої плити [7].

Поряд з очевидними факторами, що визначають об'єм роботи по забиванні палі (її радіус і довжина) розроблена методика, що дозволяє розрахувати зростання об'єму роботи зі збільшенням модуля деформації ґрунту  $E$ , коефіцієнта бічного тиску  $\mu$  і величини граничного ущільнення  $\Theta^*$ . Однак при цьому варто звернути увагу ще на один важливий фактор, який не враховується таким розрахунком. При наявності ущільненої зони поблизу палі, що забивається, збільшується лобовий опір ґрунту, який виштовхується в бік цієї зони, а при значному ущільненні рух ґрунту в цьому напрямку взагалі не відбувається. Тому зростають загальні витрати на роботу ущільнення, що відбувається не в чотирьох напрямках, а при наявності однієї сусідньої палі – у трьох, при наявності двох - у двох напрямках і, при забиванні в проміжок між палями, коли крім того забита і третя сусідня палля - усього в одному напрямку. Цим і пояснюються труднощі забивання останніх палей групи.

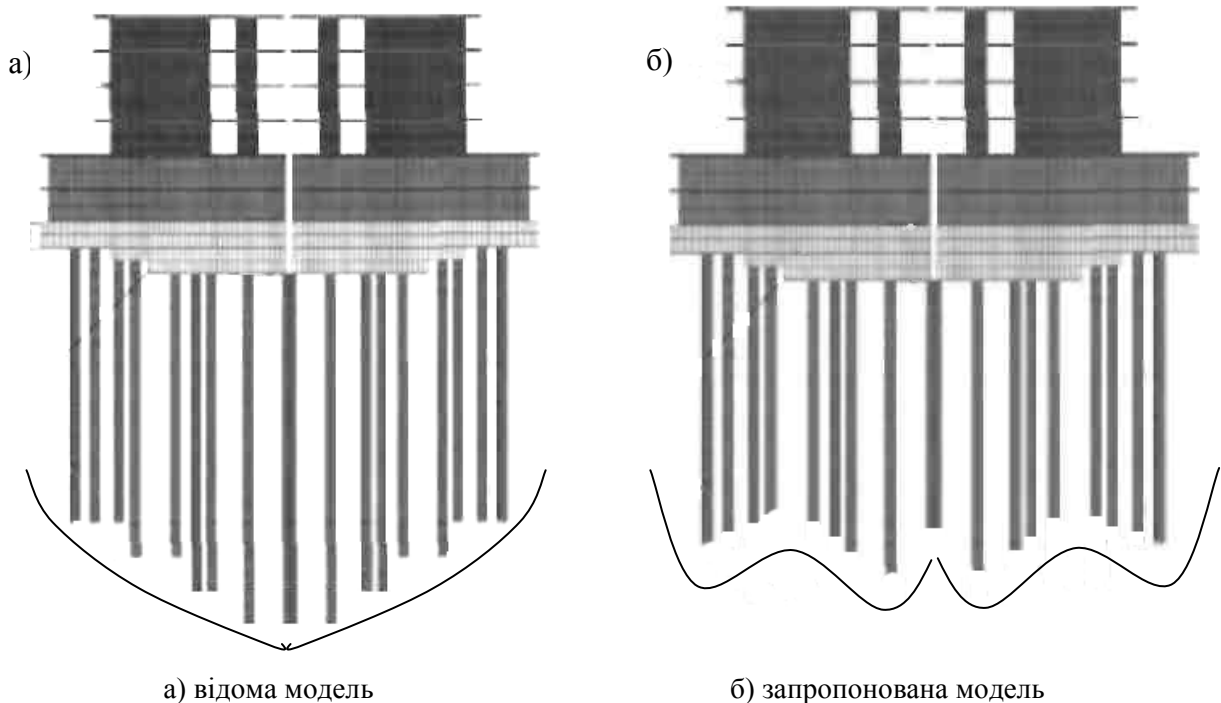


Рисунок 7 – Формування зон взаємодії основи фундаменту з ґрунтовим масивом

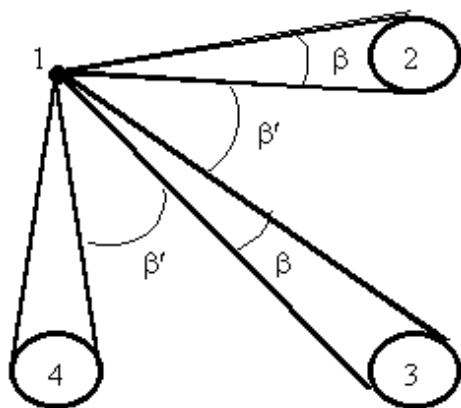


Рисунок 8 – Схема до розрахунку ущільнення при дії сусідніх палей.

На рис. 8 схематично показані сектори, обмежені кутом  $\beta$ , рівним:

$$\beta = \arctg(2r_y / d) \quad (1)$$

де  $r_y$  – радіус зони граничного ущільнення.  
 $d$  – відстань між палями.

При забиванні палі у відмітці 1 ґрунт не може переміщуватися по цих секторах у напрямку раніше забитих палей 2, 3 і 4.

Точний розрахунок по цих факторах очевидно зробити важко, але можна оцінити їхній

вплив, використовуючи підвищувальний коефіцієнт  $K_y$ , що вводиться в розрахункові значення роботи ущільнення  $\Sigma A_y$  і деформації формозміни  $\Sigma \Delta f$ . Оцінку його величини зробимо з геометричних побудов. Він складе:

$$K_y = 1 + \sum_1^{i=n} (\beta_i + 0,3\beta'_i) / 2\pi \quad (2)$$

Цей коефіцієнт вводиться у вихідні дані при розрахунку сумарного об'єму роботи по забиванні паль в складі групи, разом з даними змін щільності, модуля деформації і показників міцності ґрунту.

### Висновки

- Приведені експериментальні і теоретичні дані показують, що запропонована методика розрахунку палових фундаментів за деформаціями основи підтверджується експериментом. При цьому перевірка виконана для груп із паль однакової довжини при збільшенні заглиблення групи, а також для груп із паль різної довжини.
- Приведена методика дозволяє відтворити математичну модель процесу деформації ґрунту при забивці паль, а також оцінити об'ємну деформацію ґрунту, обумовлену забиванням зближених паль в куці. Порівняння додаткових переваг і витрат дозволяє більш обґрунтовано вибрати найбільш економічний у даних умовах варіант фундаменту проектного будинку.
- Конструктивні схеми розміщення паль в групі також можуть бути піддані аналізу за допомогою цієї методики. слід відмітити, що використання паль різної довжини дозволяє скоротити довжини паль фундаменту, що зменшує витрати бетону.

Автор висловлює подяку авторам [2, 5] за наданий матеріал, та приносить вибачення за недодрукований зміст статті, оскільки в попередньому номері було надруковано лише стан питання.

### Використана 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 палових 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. Бойко І. П. Дослідження влаштування паль у фундаменті різної довжини / І. П. Бойко, В.Л. Підлущкий // Збірник наукових праць. Вип. 4 (34). Т2. – ПолтНТУ, 2012. – С. 43-48.
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. Підлущкий В. Л. Перерозподіл зусиль у паловому фундаменті при влаштуванні паль різної довжини / В. Л. Підлущкий // Основи і фундаменти: Міжвідомчий науково-технічний збірник. – Вип. 30. – К: КЛУБА, 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. Титко О. В. Оцінка ефективності фундаментів з групи взаємозалежних паль: монографія / О. В. Титко. – Вінниця: ВНТУ, 2007. – 114 с.
8. 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.

**Титко Олег Васильович** – кандидат технічних наук, доцент кафедри теплогазопостачання. Вінницький національний технічний університет.

**Титко Олег Васильевич** – кандидат технических наук, доцент кафедры теплогазоснабжения. Винницкий национальный технический университет.

**Tytko Oleg** – Ph.D., Associate Professor of gas supply and heat. Vinnytsia National Technical University.