

*А.М. Дворник, аспірант
Науково-дослідний інститут будівельних конструкцій, м. Київ*

**ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ВЗАЄМОДІЇ ЕЛЕМЕНТІВ
СИСТЕМИ «ОСНОВА – ФУНДАМЕНТ – БУДІВЛЯ»
З УРАХУВАННЯМ ПРОЯВУ ДОДАТКОВИХ ДЕФОРМАЦІЙ
ОСНОВИ, СКЛАДЕНОЇ ВОДОНАСИЧЕНИМИ
ПІЩАНИМИ ҐРУНТАМИ**

Наведено результати чисельного моделювання функціонування системи «основа – фундамент – надземна частина будівлі» з використанням методу скінченних елементів та методу змінних коефіцієнтів жорсткості основи. Розрахунки дають можливість оцінити реальний напружено-деформований стан елементів системи з урахуванням прояву додаткових нерівномірних деформацій основи.

Ключові слова: чисельне моделювання, нерівномірні деформації, віброкомпресія.

*А.Н. Дворник, аспірант
Научно-исследовательский институт строительных конструкций, г. Киев*

**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ
ЭЛЕМЕНТОВ СИСТЕМЫ «ОСНОВАНИЕ – ФУНДАМЕНТ –
ЗДАНИЕ» С УЧЕТОМ ПРОЯВЛЕНИЯ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ
ДЕФОРМАЦИЙ ОСНОВАНИЯ, СОСТОЯЩЕГО
ИЗ ВОДОНАСЫЩЕННЫХ ПЕСЧАНЫХ ҐРУНТОВ**

Приведены результаты численного моделирования функционирования системы «основание – фундамент – надземная часть здания» с использованием метода конечных элементов и метода переменных коэффициентов жесткости основания. Расчеты дают возможность оценить реальное напряженно-деформированное состояние элементов системы с учетом проявления дополнительных неравномерных деформаций основания.

Ключевые слова: численное моделирование, неравномерные деформации, виброкомпрессия.

*A.N. Dvornyk, post-graduate
Scientific-research Institute of building constructions, Kiev*

**NUMERICAL MODELLING OF INTERACTION OF THE SYSTEM
«BASE – FOUNDATION – BUILDING» ELEMENTS, CONSIDERING
THE EXISTENCE OF ADDITIONAL DEFORMATION OF THE BASE
CONSISTING OF WATER-SATURATED SANDY SOIL**

Results of numerical modelling of interaction of the system «base – foundation – building» elements with using the finite element method and the method of variable stiffness

of the base. Calculations give an opportunity to estimate the real tensely-deformed state of elements of the system taking into account the existence of additional uneven deformations of the base.

Keywords: *numerical modelling, uneven deformations, vibrocompression.*

Вступ. Насичені водою мілкі та пилуваті піски можуть мати особливі властивості залежновід їх стану і впливів, яким вони піддаються. В умовах статичного навантаження ці ґрунти навіть у пухкому стані не зазнають значних деформацій, тому осідання будівель на таких ґрунтах зазвичай не мають небезпечного розвитку. Проте поява джерел вібрації різної інтенсивності та тривалості у безпосередній близькості від таких будівель може істотно змінити картину. Причиною є реакція ґрунтів на динамічні впливи, яким вони піддаються, у т. ч. при роботі будівельної техніки поблизу існуючої забудови.

Характерною формою реакції пісків на динамічні навантаження є додаткове ущільнення, що проявляється у процесах віброкомпресії та віброповзучості. Віброкомпресія – ущільнення ґрунту при вібраційній дії або при часто повторюваних імпульсах. У процесі тривалої дії вібраційних навантажень відбуваються не лише об'ємні деформації. За наявності статичних зсувних напружень можуть проявлятися деформації зсуву, які мають характер віброповзучості. Сумарні об'ємні та зсувні деформації віброповзучості призводять до виникнення кренів фундаментів, що можуть накопичуватися впродовж тривалого періоду часу. Характерним результатом прояву віброповзучості є деформації основ будівель і споруд від вібраційних дій автомобільного та залізничного транспорту.

Особливі деформаційні йміцнісні властивості основ, складених водонасиченими пісками, повинні обов'язково бути враховані при проектуванні будівель і споруд, що працюють в умовах динамічних впливів, особливо довготривалих техногенних навантажень невеликої інтенсивності.

Проблема адекватного моделювання поведінки ґрунтів при динамічних впливах на сьогодні не може вважатися розв'язаною. Серед важливих аспектів роботи в цьому напрямі – вдосконалення та деталізація математичних моделей середовища, розроблення методів розв'язання задач прогнозування зміни НДС з урахуванням особливих властивостей ґрунтів основи при динамічних навантаженнях.

Огляд останніх джерел досліджень і публікацій. Вивченням питань прогнозування додаткових осідань віброкомпресії та віброповзучості серед вітчизняних науковців займалися Н.М. Герсєванов, В.А. Флорін, М.М. Маслов, П.Л. Іванов, В.Я. Хаїн, А.Л. Крижановський, І.К. Ігонін, Р.Г. Юркін, Р.Д. Філіпов, М.Н. Гольдштейн, В.Б. Швець, А.П. Афонін, М.Д. Красников, В.М. Кравцов та інші дослідники. Для інженерної практики велике значення має визначення умов, за яких відбувається втрата динамічної стійкості ґрунтів, і в першу чергу – прогнозування додаткових деформацій основи та її взаємодії зі спорудою. Узагальнюючи теоретичні дослідження згаданих вище науковців, можна виділити для загального випадку такий порядок розв'язання задачі прогнозування зміни напружено-деформованого стану системи «основа – будівля» при додаткових осіданнях:

1) за даними інженерно-геологічних вишукувань установлюється геологічний розріз майданчика, можливі рівні коливання ґрунтових вод, геотехнічні та фізико-механічні властивості ґрунтів, що необхідні для розрахунків, умови їх статичного навантаження та характеристика джерел вібрацій;

2) виконується розрахунок системи «основа – будівля» на статичні навантаження, визначаються розрахункові напруження в ґрунтах основи та осідання;

3) з урахуванням особливостей інженерно-геологічного розрізу основи, параметрів коливань фундаментів, хвильових характеристик ґрунтів виконується розрахунок інтенсивності коливань в основі споруди;

4) визначення характеристик віброущільнення в розрахункових шарах ґрунтів основи при дії вібрацій відповідної розрахункової інтенсивності;

5) визначення «активної зони» в основі фундаментів, у межах якої фізико-механічні властивості ґрунтів змінюються під дією розрахункових динамічних впливів;

6) визначення коефіцієнтів зміни розрахункових параметрів деформативності ґрунтів при дії динамічних впливів;

7) розрахунок системи «основа – будівля» за відкоригованими коефіцієнтами жорсткості основи, визначеними з урахуванням додаткових осідань.

Складність поставленої задачі полягає в тому, що вирішення завдань п.4 і п.5 незалежно від різномайття підходів згаданих вище науковців потребує виконання додаткових спеціальних досліджень динамічних властивостей ґрунтів, не передбачених стандартним набором досліджень, що виконуються в межах інженерно-геологічних вишукувань на майданчику будівництва.

Чисельне моделювання системи «основа – фундамент – будівля», наведене у цій роботі, виконано з використанням методу змінних коефіцієнтів жорсткості основи (МЗКЖ). Моделювання геометрії будівлі виконано з використанням методу скінченних елементів (МСЕ).

Поняття «коефіцієнт жорсткості основи» вперше введено Н.П. Павлюком при розробленні загальної теорії коливань фундаментів. Згідно із цією теорією опір основним видам переміщень, вертикальні, зсувні й повороти фундаменту, є пропорційними їх величинам. Ці коефіцієнти пропорційності називаються коефіцієнтами жорсткості основи.

С.М. Клепиков [1, 2] запропонував у загальному випадку моделювати основу в будь-якій точці контактної поверхні з конструкцією двома коефіцієнтами жорсткості: K_{cm} – коефіцієнт жорсткості основи при стиску; K_{zc} – коефіцієнт жорсткості основи при зсуві. Ця основа має такі властивості: реактивні тиски p_z , нормальні до контактної поверхні конструкції, пропорційні переміщенням w_z у цьому напрямку – $p_z = K_{cm}w_z$; реактивні сили тертя p_x , дотичні до контактної поверхні конструкції, пропорційні переміщенням w_x у цьому напрямку – $p_x = K_{zc}w_x$.

Ітераційний метод розв'язання задачі розрахунку конструкцій на податливій основі, що змодельована коефіцієнтами жорсткості, надалі отримав назву методу змінних коефіцієнтів жорсткості основи (МЗКЖ).

МСЕ і МЗКЖ у сучасному формулюванні є чисельними методами та мають однакову базову концепцію – апроксимація безперервної величини безліччю ділянково-безперервних функцій, визначених на кінцевому числі підобластей, у МСЕ – скінченних елементів, у МЗКЖ – контактних вузлів. Тому ці методи є природно зіставними в єдиній розрахунковій процедурі [3, 4].

Виділення раніше не розв'язаних частин загальної проблеми, котрим присвячена стаття. Сучасне проектування будівель у складних інженерно-геологічних умовах вимагає проведення комплексу розрахунків системи «основа – будівля», які відображали б реальний напружено-деформований стан її елементів на всіх етапах функціонування. Актуальною є проблема коректного моделювання взаємодії всіх елементів системи з урахуванням особливих властивостей ґрунтів, що складають основу будівлі.

У статті викладено результати розрахунків системи «основа – фундамент – будівля» з використанням МЗКЖ та з урахуванням додаткових осідань розрахункових ділянок фундаментів, спричинених явищами віброущільнення.

Метою роботи є виконання чисельного моделювання взаємодії елементів системи «основа – фундамент – будівля» з використанням МСЕ та МЗКЖ з урахуванням додаткових деформацій основи.

Основний матеріал і результати. Чисельне моделювання взаємодії елементів системи «основа – фундамент – будівля» виконано на прикладі дослідного майданчика у м. Вишневому Києво-Святошинського району Київської області.

Характеристика об'єкта. Будівля прямокутної форми з розмірами у плані 43,6х12,6 м має 9 основних поверхів, горище та цокольний поверх, дві сходових клітки. Будівля безкаркасна з поздовжніми несучими цегляними стінами. Товщина зовнішніх стін змінюється по висоті від 380 до 510 мм. Міжповерхові перекриття – збірні залізобетонні плити. Фундамент будівлі – суцільна залізобетонна плита товщиною 700 мм.

Інженерно-геологічні умови. У геологічній будові території до розвіданої глибини 13,0 м беруть участь: з поверхні сучасні насипні та елювіальні відкладигрунтово-рослинного шару, під ними залягають верхньочетвертинні еолово-делювіальні відклади. Нижня частина розрізу представлена комплексом морених озерно-льодовикових відкладів.

Гідрогеологічні умови майданчика характеризуються розповсюдженням безнапірного водоносного горизонту у відкладах рослинного шару. Відмітки сталого рівня ґрунтових вод відповідають глибинам 0,7 – 1,2 м. Інженерно-геологічний розріз наведено на рис. 1.

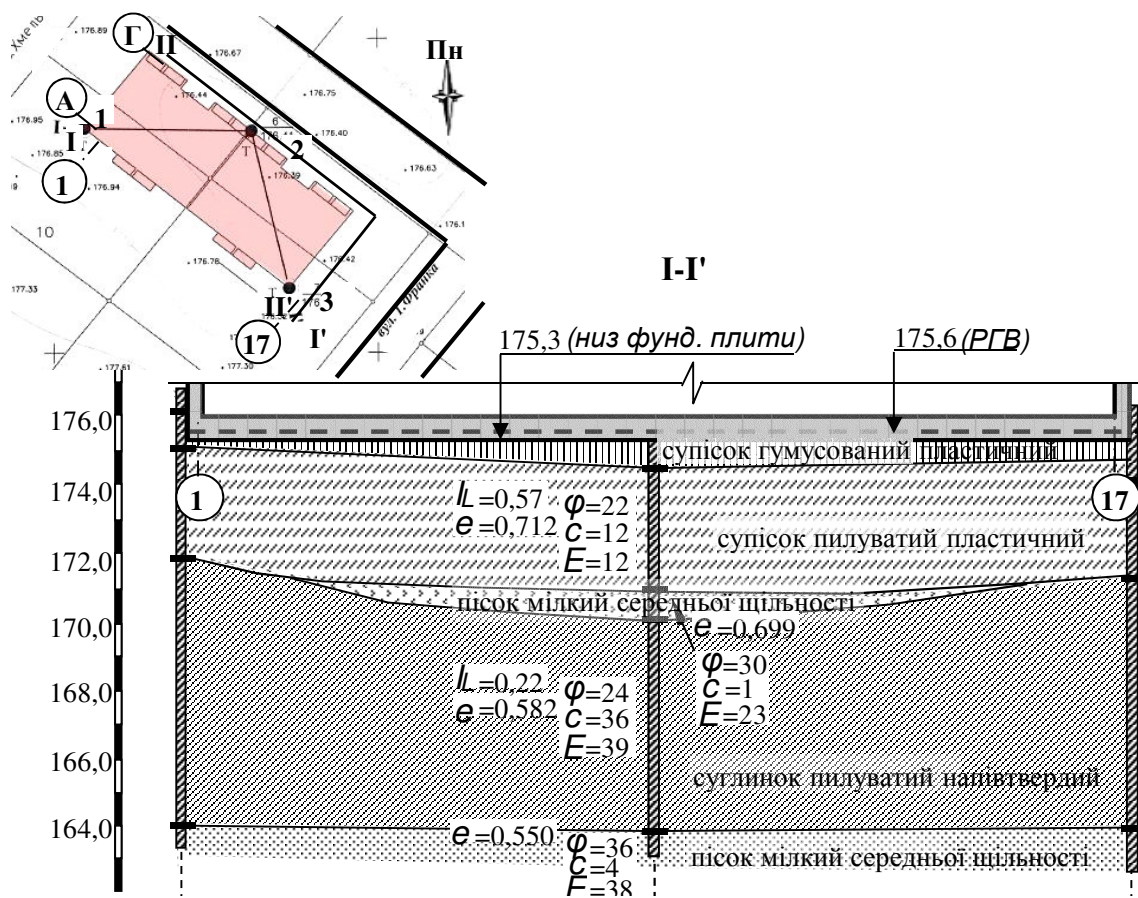


Рис. 1. Посадка будівлі на інженерно-геологічний розріз (за результатами вишукувань)

З аналізу наявних архівних даних про геологічні умови сусіднього (через дорогу від осі Г) майданчика та наявних даних геодезичних спостережень можна зробити припущення, що пісок ПЕ-3 розповсюджений під фундаментами біля осі Г. При цьому його потужність може збільшуватися в напрямку дороги біля осі Г і ближче до осей 1 та 17, як показано на рис. 2.

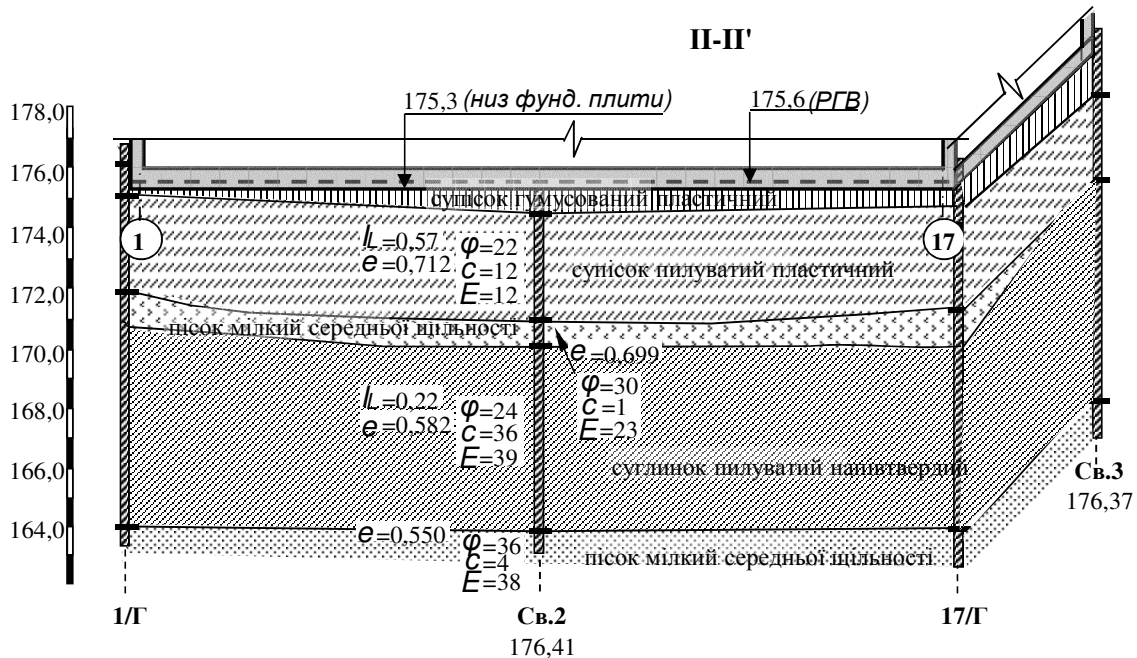


Рис. 2. Імовірні інженерно-геологічні умови основи вздовж осі Г в осях 1 – 17 (побудовано за результатами аналітичних досліджень)

Інженерно-геодезичний моніторинг деформацій. Під час зведення останніх двох поверхів будівлі виявлено розвиток надмірних нерівномірних деформацій. Організовано регулярний інженерно-геодезичний контроль деформацій осадочних марок, установлених на будівлі. Результати спостережень за осіданнями наведено на рисунку 3.

Період від початку будівництва до кінця червня відповідає зведенню дев'яти поверхів та характеризується незначними рівномірними деформаціями основи. Періоду з початку червня до середини липня відповідає зведення цокольного поверху та продовження робіт з улаштування підлог і перегородок на окремих поверхах.

При цьому на період липня – серпня припадають інтенсивні нерівномірні деформації основи із середньою швидкістю від 0,2 до 0,9 мм/добу. За умов незначного додаткового навантаження будівлі в цей період було розпочато виконання земляних робіт поблизу дослідного будинку. Зафіксовано роботу важкої будівельної техніки на ділянці зі сторони осі 17. У середині серпня було розпочато роботи з підсилення основи будівлі за технологією «jet-grouting» відповідно до наданих рекомендацій, наведених нижче.

Характеристика джерел динамічних впливів. Вібродинамічних досліджень ґрунту та фундаментів будівлі на ділянці будівництва не проводилось. Джерелами динамічних впливів, які могли спровокувати додаткові осідання віброущільнення ґрунтів, є такі:

- рух вантажного автотранспорту по дорозі на відстані 3 м від будівлі (вісь Г);
- періодична робота важкої будівельної техніки з підготовки території та часткової розробки котловану під нове будівництво на відстані близько 7 – 8 м від осі 17.

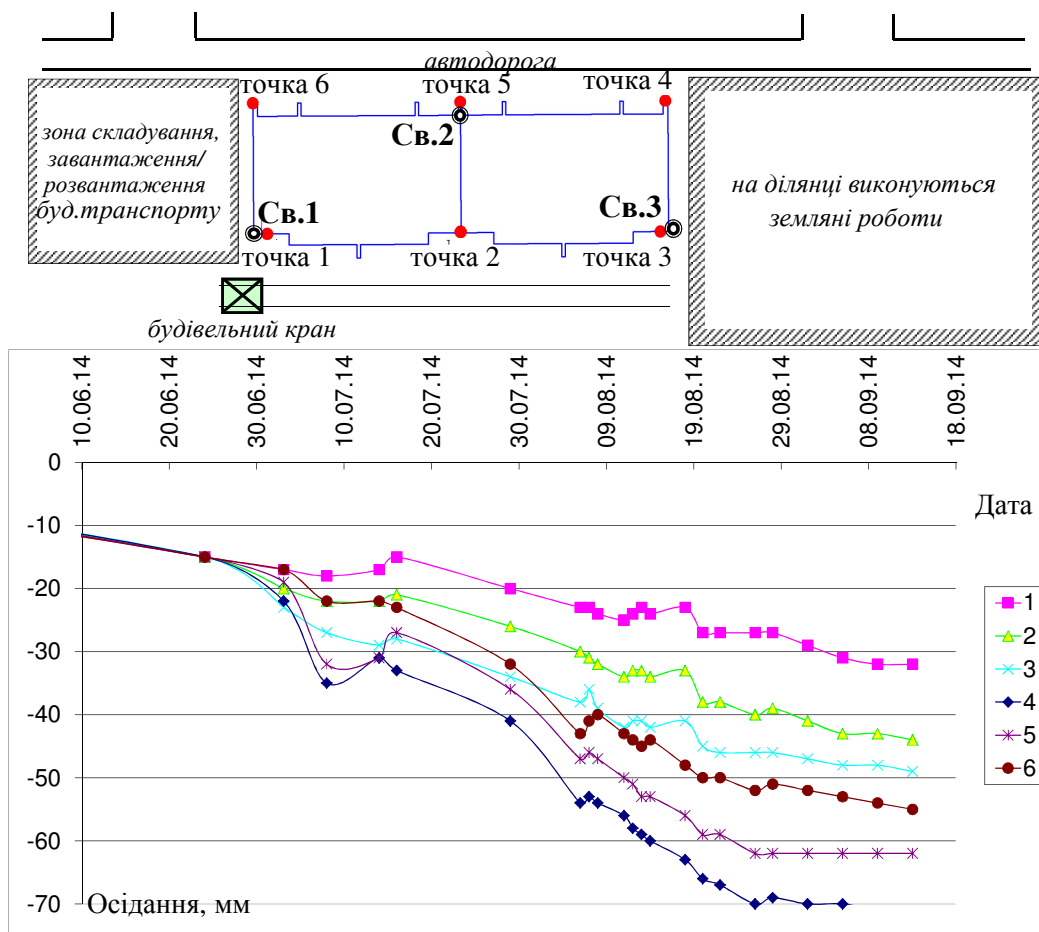


Рис. 3. Графік осідань будівлі

Зона впливу вібрацій від руху автомобільного транспорту за наявності вантажних автомобілів на незадовільному стані дорожнього покриття може досягати 40 м. Спектр частот, які виникають у масиві ґрунту, знаходиться в інтервалі 13 – 28 Гц, причому при віддаленні від джерела високі частоти затухають швидше, тому доля їх у спектрі частот зменшується. Рівень прискорень частинок ґрунту, викликаних коливаннями, може досягати під дорожнім покриттям і поблизу дороги 15 – 20 $\text{см}/\text{с}^2$ [5 – 7]. Відомо, що динамічна стійкість мілких водонасичених пісків за певних умов може порушуватися при віброприскореннях, вищих за 4 $\text{см}/\text{с}^2$.

Моделювання системи «основа – фундамент – будівля». Розрахунки цієї системи виконано для таких етапів:

1. Етап I – розрахунки з визначення розрахункового НДС конструкцій будівлі на період зведення останнього її поверху. Характеристики ґрунтів призначені для їх природного стану відповідно до результатів інженерно-геологічних вишукувань. При розв'язанні контактної задачі ітераційним методом на кожній розрахунковій ділянці коефіцієнти жорсткості основи визначались із співвідношення $K_i = P_i / S_{i,p}$, де P_i – розрахунковий тиск по підшві фундаменту на розрахунковій ділянці; $S_{i,p}$ – осідання від дії розрахункового тиску.

2. Етап II – імітаційне моделювання для визначення фактичного НДС системи при додаткових осіданнях, зафіксованих у результаті інженерно-геодезичних

спостережень. Коефіцієнти жорсткості основи обчислені з урахуванням додаткових осідань відповідних ділянок за формулою

$$K_i = \frac{P_i}{(S_{i,p} + \Delta S_{i,\eta})} \quad (1)$$

де $\Delta S_{i,\eta}$ – додаткове осідання розрахункової ділянки внаслідок віброущільнення, спричиненого дією динамічних впливів з інтенсивністю η . Додатковим критерієм відповідності розрахункової напружено-деформованої схеми будівлі фактичній слугує: порівняння розрахункових значень кренів будівлі з фактично зафіксованими та відповідність зафіксованих пошкоджень зонам дії максимальних напружень у конструкціях.

3. Етап III – моделювання прогнозованого напружено-деформованого стану системи при експлуатаційних розрахункових навантаженнях після завершення будівництва. Характеристики жорсткості основи відповідають розрахунковій схемі етапу II. Розрахункові сполучення навантажень включають усі експлуатаційні навантаження на конструктивні елементи будівлі.

Опис розрахункової моделі. Для визначення напружено-деформованого стану конструктивних елементів та ґрунтів основи будівлі використано програмний комплекс «ЛІРА», що реалізує метод скінченних елементів.

Розрахункова модель основи – лінійно-деформований напівпростір. У ПК «ЛІРА» розрахункова модель основи представлена коефіцієнтами жорсткості основи по плоских скінченних елементах (СЕ), розміщених у площині ХОУ, якими змодельований фундамент. Розрахункова схема основи представлена системою розрахункових фундаментних ділянок, що взаємно впливають.

Коефіцієнти жорсткості основи в розрахункових схемах визначені з розв’язання контактної задачі. Розрахунок виконувався ітераційним способом. У нульовій ітерації визначено напружено-деформований стан будівлі на однакових коефіцієнтах жорсткості основ для всіх розрахункових ділянок фундаментів. Далі виконано розрахунок осідань і коефіцієнтів жорсткості основи. У першій і подальших ітераціях послідовно виконувалися розрахунки будівлі з урахуванням перелічених коефіцієнтів жорсткості основ і визначення коефіцієнтів для наступної ітерації. Ітерації виконувалися до тих пір, поки не було отримано «врівноважений» НДС будівлі спільно з основою.

За результатами цього розрахунку виконується аналіз початкового напружено-деформованого стану будівлі (етап I). Значення коефіцієнтів жорсткості основи знаходяться у межах від 228 до 461 т/м³. Установлено, що отримана за розрахунком деформована схема фундаментної плити (етап I) не відповідає результатам інженерно-геодезичних спостережень. На окремих ділянках фактичні осідання перевищують отримані за розрахунком для відповідного етапу навантаження основи.

Відповідно до результатів інженерно-геодезичних спостережень за деформаціями коефіцієнти жорсткості для етапу II були скориговані на окремих ділянках для отримання фактичної деформованої схеми будівлі. На окремих ділянках коефіцієнти зменшені на 10 – 50%. На локальній ділянці в центральній частині коефіцієнти збільшені на 20 – 25% за рахунок зміни деформованої схеми фундаментної плити (рис. 4).

Результати розрахунків. У результаті виконаних розрахунків були визначені основні технічні параметри напружено-деформованого стану системи, необхідні для розв’язання поставлених задач. Ізополя осідань основи будівлі наведено на рисунку 5.

Установлено, що розрахункова модель системи «основа – фундамент – будівля» адекватна реальному об’єкту. Отриманий на етапі II напружено-деформований стан об’єкта відповідає фактичному. Про це свідчить відповідність розрахункових значень

осідань і кренів будівлі фактично зафіксованим показникам. Це дає можливість з достатньою достовірністю виконати прогноз зміни напружено-деформованого стану системи та прийняти оптимальні рішення при розробленні проекту відновлення експлуатаційної придатності об'єкта.

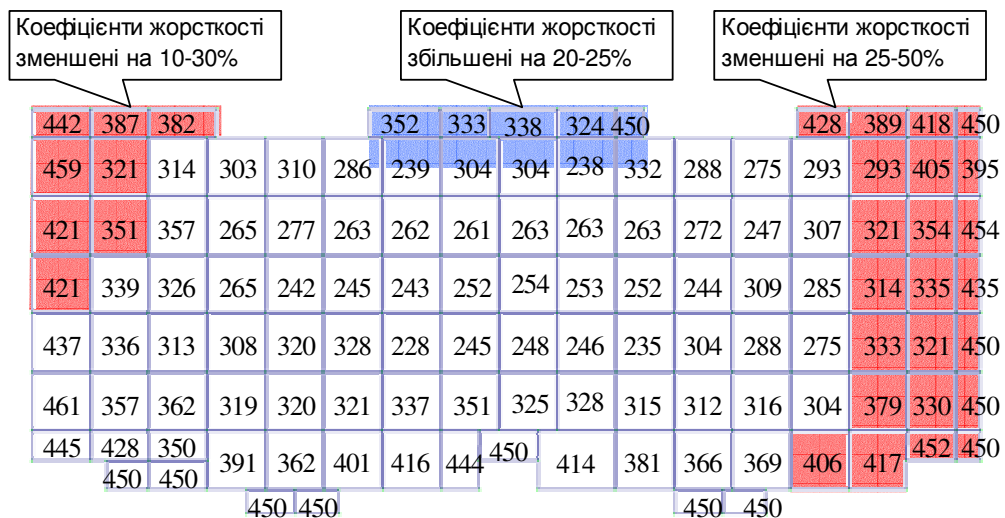


Рис. 4. Схема розподілу значень коефіцієнтів жорсткості основи, т/м³. Позначені ділянки, на яких змінені коефіцієнти при моделюванні додаткових осідань

На період виконання розрахунків (етап II) показники деформованого стану будівлі перебувають у межах рекомендованих норм, однак результати інженерно-геодезичних спостережень свідчать про продовження процесу розвитку нерівномірних деформацій, зокрема на ділянці будівлі в осях 14 – 17. За результатами розрахунків встановлено, що при діючих фактично нині навантаженнях напруження в плиті досягли на деяких ділянках граничних значень за умовами тріщинотійкості.

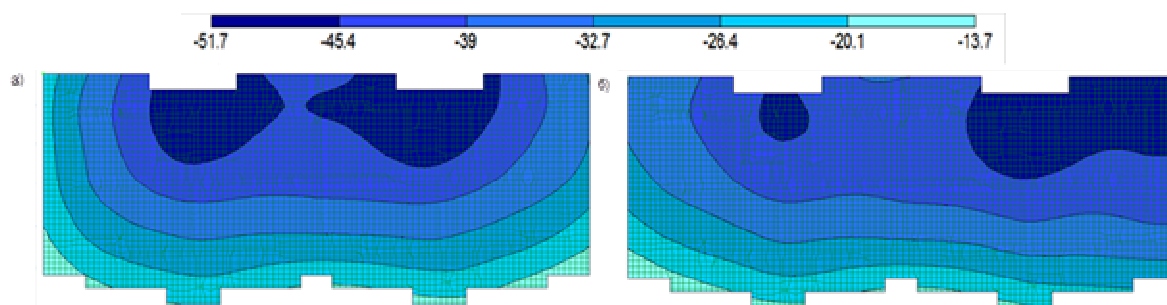


Рис. 5. Ізополі розподілу осідань основи: а) за нормальних умов експлуатації ґрунтів (етап I); б) з урахуванням додаткового ущільнення ґрунтів (етап II)

Висновки. Чисельне моделювання функціонування системи «основа–фундамент–надземна частина будівлі» з використанням методу скінченних елементів та методу змінних коефіцієнтів жорсткості основи дозволяє оцінити реальний напружено-деформований стан елементів системи. Запропонований підхід дає можливість простежити зміни НДС системи як у процесі зведення з урахуванням зафіксованих додаткових деформацій, так і на перспективу в часі.

При проектуванні основ будівель та споруд, що експлуатуються в умовах динамічних впливів, необхідно враховувати особливі властивості водонасичених піщаних ґрунтів, у тому числі додаткові деформації за рахунок явищ віброкомпресії та віброповзучості. Здатність ґрунтів до додаткового ущільнення при динамічних впливах та відповідні характеристики віброущільнення необхідно визначати на етапі підготовки вихідних даних для проектування. Актуальною залишається проблема розроблення методик прогнозування можливих додаткових деформацій таких основ під дією динамічних впливів.

Література

1. Клепиков С.Н. Расчет сооружений на деформируемом основании / С.Н. Клепиков. – К.: НИИСК, 1996. – 202 с.
2. Клепиков С.Н. Расчет конструкций на неупругом основании при совместном применении метода конечных элементов и метода переменных коэффициентов жесткостей основания / С.Н. Клепиков, Я.И. Червинский. – К.: НИИСК Госстроя СССР, 1984. – 8 с.
3. Development of calculation methods of foundations on the pliable basis in Ukraine / P. Krivosheev, Y. Slyusarenko, J. Chervinsky // Alexandria - Published by IOS Press under the imprint Millpress. ISBN 978-1-60750-031-5, 5–9 October 2009; 17th Intern. Conf. Soil Mechanics and Geotechnical Engineering.
4. Червинский Я.И. Совместный расчет системы «сооружение – основание» с применением метода переменных коэффициентов жесткости основания // Збірник наукових праць. Серія: Галузеве машинобудування, будівництво. – Полтава: ПолтНТУ, 2010. – Вип. 3 (28). – С. 278 – 285.
5. Влияние вибраций, вызываемых транспортом, на техногенные загрязнения массивов грунта / И.А. Кудрявцев – Вильнюс, 2003. – 40 с.
6. Kudrjavitsev I.A. Influence Vibration Sources of the Properties of Foundation 25th Conf. of «Foundation of constructions», 1998. – P. 55 – 59.
7. Экспериментальная динамика сооружений. Мониторинг транспортной вибрации / Е.К. Борисов и др. – Петропавловск-Камчатский: КамчатГТУ, 2007. – 58 с.

© А.М. Дворник
Надійшла до редакції 25.05.2015