

## БУДІВНИЦТВО

УДК 642:624.044.624.15

А. С. Моргун<sup>1</sup>  
О. В. Крайсвітня<sup>1</sup>

### ПРОГНОЗУВАННЯ ЗА МЕТОДОМ ГРАНИЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ ОСІДАННЯ 17-ПОВЕРХОВОЇ СПОРУДИ

<sup>1</sup>Вінницький національний технічний університет

*В роботі використано інтегральне рівняння рівноваги фундаментної конструкції в ґрунтовій основі, яке є синтезом статичних, геометричних та фізичних класичних рівнянь стану, та проведено його реалізацію за числовим методом граничних елементів.*

**Ключові слова:** інженерно-геологічні умови, фундаменти, розрахунок осідання основ, дилатансія, навантаження.

#### Вступ

На сьогодні математичне прогнозування є одним з головних і найекономічніших прийомів теоретичних і прикладних досліджень актуальних проблем науки та народного господарства. Прогнозування осідань основ фундаментів — є одна з найскладніших задач механіки ґрунтів. На сьогодні відомо біля 20 методів розрахунку осідань фундаментів. Але в проектній практиці в більшості випадків використовують лише декілька (пошарове підсумовування, метод лінійно деформованого шару, шару обмеженої товщі, еквівалентного шару, лінійно деформованого півпростору). Область застосування тих чи інших методів розрахунку обмежуються різними умовами: інженерно-геологічні умови будівельного майданчика, розміри та форми фундаменту, розрахункові схеми, деформативність ґрунтів.

#### Постановка задачі. Визначальні співвідношення

В ґрунтах від дії зовнішніх сил виникають як пружні ( $\varepsilon^{пр}$ ), так і залишкові ( $\varepsilon^{пл}$ ) деформації, які часто в десятки разів перебільшують пружні. Суттєвою відмінністю ґрунтів від однорідних пружних тіл є те, що під час дії зовнішніх навантажень залишкові деформації завжди є супутніми пружним, навіть за незначних навантажень. Сума залишкової та пружної деформації складає повну деформацію  $\varepsilon = \varepsilon^{пр} + \varepsilon^{пл}$ . Рівномірне осідання будівлі, навіть значне, не спричиняє ризику їх руйнування. Жорстка 17-поверхова споруда, розріз якої показаний на рис. 1 буде деформуватися разом із основами, впливаючи на їх осадку. Саме з цих міркувань за фундаментну конструкцію багатоповерхової споруди запроєктовано фундаментну плиту товщиною 0,8 м, яка в змозі вирівняти нерівномірне осідання завдяки перерозподілу навантажень. Точне рішення для визначення осідань основи в результаті надмірної складності природи ґрунтів та великої кількості факторів, що впливають на осідання фундаментів, в більшості випадків неможливо, що відмічається також в Єврокодах 7.

Робота ґрунту в основах споруд носить пружнопластичний характер, що приводить до нелінійних

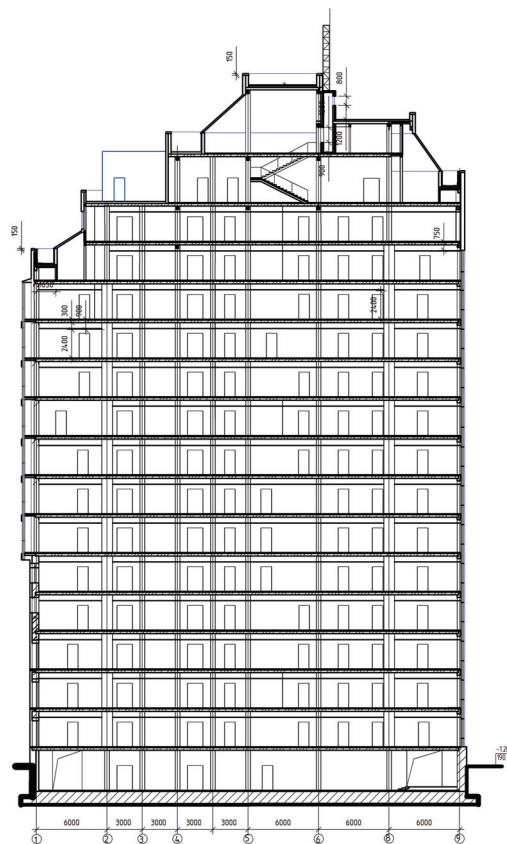


Рис. 1. Розріз 17-поверхової споруди

залежностей «навантаження—осідання», які в практичних методах розрахунку основ не враховуються. В запропонованій роботі враховується 9 чинників впливу зі всього переліку властивостей ґрунтів:

- модуль деформації ґрунту  $E = 18,91$  МПа;
- коефіцієнт Пуассона  $\nu = 0,37$ ;
- зчеплення  $c = 44,46$  кПа;
- кут внутрішнього тертя  $\varphi = 22,73^\circ$ ;
- щільність ґрунту  $\rho = 1,999$  кН/м<sup>3</sup>;
- мінімальна щільність ґрунту  $\rho_{\min} = 1,56$  кН/м<sup>3</sup>;
- максимальна щільність ґрунту  $\rho_{\max} = 2,26$  кН/м<sup>3</sup>;
- структурна щільність ґрунту  $\rho_s = 2,713$  кН/м<sup>3</sup>;
- коефіцієнт пористості  $e = 0,67$ .

Оскільки надійність основ залежить від уміння оцінити їх інженерно-геологічні умови, гідрогеологічну ситуацію, зміну цих властивостей в процесі будівництва та експлуатації, то для визначення осідання споруди необхідне залучення останніх досягнень механіки ґрунтів, сучасних числових методів та ЕОМ. Великий розкид інженерно-геологічних умов, різноманіття конструкцій споруд виключає стандартний підхід до проектування основ і фундаментів і потребує творчого осмислення.

Як відомо, споруда і основа знаходяться в тісному контакті і взаємодії. Під впливом навантажень, що передаються фундаментом основа деформується в межах обмеженого об'єму зони деформації, а це, в свою чергу, викликає перерозподіл навантажень за рахунок включення в роботу надфундаментних конструкцій. Характер і ступінь перерозподілу навантажень на основу, а, відповідно, і додаткові зусилля в конструкціях споруд, залежать від конструктивної схеми будівлі, її просторової жорсткості, піддатливості основи та багатьох інших факторів. Прийнято до розгляду в розрахунку активну зону основи та дискретизацію її навколофундаментної зони, що показано на рис. 2а.

Рівняння стану фундаментної плити під навантаженням

$$C_{ij}U_j + \int_{\Gamma} p_{ij}^* \cdot U_{ij} d\Gamma = \int_{\Gamma} U_{ij}^* \cdot p_i d\Gamma + \int_{\Omega} \sigma^* \cdot \varepsilon_{jk}^{пл} d\Omega, \quad (1)$$

де  $U$  — заданий вектор переміщень на границі фундаментної плити;  $\rho$  — вектор напружень на цій границі;  $U^*$ ,  $p^*$ ,  $\sigma^*$  — ядра граничного рівняння — розв'язки Р. Міндліна для  $P = 1$  у півпросторі для переміщень, напружень і похідних від напружень, відповідно;  $C_{ij}$  — матриця яка визначається з умов руху тіла як цілого;  $\Gamma$ ,  $\xi$ ,  $X$  — відповідно, гранична поверхня фундаментної конструкції, точка прикладання  $P = 1$ , точка спостереження.

Рівняння (1) є граничним інтегральним рівнянням щодо значень шуканих функцій (напруження по боковій поверхні та подошві фундаментної плити) лише на границі досліджуваного об'єкта. Ця важлива обставина надає найбільшій привабливості цьому рівнянню, яке стає вельми прийнятним для досліджень числовими методами.

Мінливість процесу деформування ґрунту основи споруди в роботі проведено за числовим методом граничних елементів [2] за дилатансійною математичною моделлю В. Н. Ніколаєвського, І. П. Бойка [3, 4]. Поведінку ґрунту в нелінійній стадії описано неасоційованим законом пластичної течії. Для врахування дисипативних ефектів ґрунту до рівняння (1) додавались:

- а) критерій переходу в пластичний стан — умова пластичності Мізеса—Шлейхера—Боткіна, яка допускає руйнування ґрунту по октаедричних площадках;
- б) неасоційований закон пластичної течії

$$d\varepsilon_{ij}^{пл} = d\lambda \frac{dF}{d\sigma_{ij}}, \quad F \neq f, \quad (2)$$

де  $F$  — пластичний потенціал (дисипативна функція пористого середовища ґрунту);  $f$  — критерій переходу до пластичного стану;  $d\lambda$  — скалярний множник.

Для корегування неспіввідності тензорів напружень і тензорів деформацій роботи навантаженого ґрунту в пластичній стадії використано дилатансійну теорію [3, 4]. Напрацьована дилатансійна модель з'єднує розрахунок ґрунтових основ за обома граничними станами (по деформаціях і несучій здатності) у рамках єдиної розрахункової схеми.

## Результати дослідження

Оскільки зв'язок  $\sigma$ — $\varepsilon$  для ґрунтів не носить лінійного характеру, задача визначення  $\sigma$ — $\varepsilon$  стану фундаментної плити обмежувалась умовами нескінченно малих змін  $d\sigma$  і відповідних їм  $d\varepsilon$ . Процес пластичного деформування ґрунту складався із рекурентної послідовності лінійних задач, тобто здійснювався метод пружних рішень А. Ільюшина [5].

Для числової реалізації бокова поверхня фундаментної плити (рис. 2а) та активна зона ґрунтової основи розбивались на скінченні елементи (СЕ). Шукані функції (вектор напружень) кусочно апроксимувались в межах СЕ. Ідея подання шуканих функцій за допомогою кусочної апроксимації використовується в сучасних числових методах та вдало об'єднує матричну форму розрахунків зі зручностями використання ЕОМ.

На рис. 2б з використанням розробленої моделі з прогнозовано несучу здатність фундаментної плити  $h = 0,8$  м в залежності від величини її деформації для вищезазначеної геологічної ситуації будівельного майданчика споруди. Маючи вагу наземної частини споруди 772000 кН, очікуване осідання згідно з даними числового прогнозу за МГЕ складає 7,61 см, що менше 8 см, гранично допустимого згідно з ДБН.

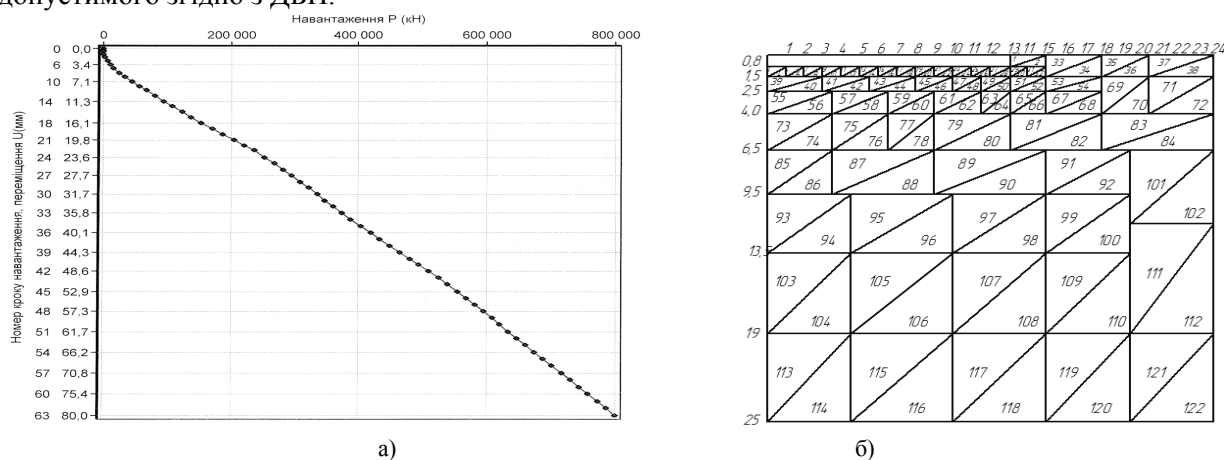


Рис. 2: а — дискретизація навколоплитної зони основи; б — графік залежності «навантаження—осідання»

## Висновок

Урахування в моделі пластичної поведінки ґрунту під навантаженням дало можливість підняти якість проектного розрахунку, встановити характерні закономірності формування зусиль в процесі взаємодії фундаментної плити з основами та отримати графік деформування фундаментної плити для конкретних геологічних умов 17-поверхової споруди до граничнодопустимих за ДБН  $S \leq 8$  см, які передбачають появу в наземних конструкціях недопустимих для нормальної експлуатації тріщин та пошкоджень.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Бреббиа К. Методы граничных элементов : пер. с англ. / К. Бреббиа, Ж. Теллес, К. Вроубел. — М. : Мир. — 1988. — 523 с.
2. Моргун А. С. Метод граничных элементов в расчетах палей / А. С. Моргун. — Вінниця : Універсум-Вінниця, 2000. — 130 с.
3. Николаевский В. Н. Современные проблемы механики ґрунтов / В. Н. Николаевский // Определяющие проблемы механики ґрунтов. — М. : Стройиздат, 1975. — С. 210—227.
4. Бойко І. П. Наружно-деформований стан ґрунтового масиву при побудові нових фундаментів поблизу існуючих будинків / І. П. Бойко, В. О. Сахаров // Основи і фундаменти : міжвідомчий науково-технічний збірник. — К. : КНУБА.. 2004. — Вип. 28. — С. 3—10.
5. Ільюшин А. А. Труды (1946—1966). — Т. 2. Пластичность / О. А. Ільюшин. — М. : Физматлит, 2004. — 480 с.

Рекомендована кафедрою промислового і цивільного будівництва

Стаття надійшла до редакції 28.05.2014

**Моргун Алла Серафимівна** — д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри промислового і цивільного будівництва;

**Крайвітня Ольга Вячеславівна** — студентка Інституту будівництва, теплоенергетики та газопостачання, e-mail: desirable93@mail.ru.

Вінницький національний технічний університет, Вінниця

A. S. Morgun<sup>1</sup>  
O. V. Kraisivitnia<sup>1</sup>

## Forecasting according to the boundary element method of subsidence of 17-storied building

<sup>1</sup>Vinnytsia National Technical University

*An integral equation at equilibrium foundation construction in the ground basis which is a synthesis of static, physical and geometric classical equations of state is used and its temporal realization at the method at boundary elements is conducted in this work.*

**Keywords:** engineering–geological conditions, foundations, subsidence calculation bases, dilatancy, load.

*Morgun Alla S.* — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Head of the Chair of Industrial and Civil Construction;

*Kraisivitnia Olga V.* — Student of the Institute of Construction, Power Engineering and Gas Supply, e-mail: desirable93@mail.ru

А. С. Моргун<sup>1</sup>  
О. В. Крайсвитня<sup>1</sup>

## Прогнозирование по методу граничных элементов оседания 17-этажного сооружения

<sup>1</sup>Винницкий национальный технический университет

*В работе использовано интегральное уравнение равновесия фундаментной конструкции в грунтовой основе, которое является синтезом статических, геометрических и физических классических уравнений состояния, и проведена его реализация по численному методу граничных элементов.*

**Ключевые слова:** инженерно-геологические условия, фундаменты, расчет осадок оснований, дилатансия, нагрузки.

*Моргун Алла Серафимовна* — д-р техн. наук, профессор, заведующая кафедрой промышленного и гражданского строительства;

*Крайсвитня Ольга Вячеславовна* — студент Института строительства, теплоэнергетики и газоснабжения, e-mail: desirable93@mail.ru