

## БУДІВНИЦТВО

УДК 519.642:624.044:624.15

А. С. Моргун, д-р техн. наук, проф.;

О. В. Франчук, студ.;

Д. С. Довгопол, студ.

### ПРОГНОЗУВАННЯ ЗА МЕТОДОМ ГРАНИЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ ТЕХНІЧНИХ РЕСУРСІВ КІЛЬЦЕВОГО ПАЛЬОВОГО ПОЛЯ СИЛОСУ ЗЕРНОСУШАРКИ

*За методом граничних елементів оптимізовано кільцевий фундамент силосу. Наведено методику розрахунку несучої здатності кільцевого ростверку та кільцевого пальового поля. Для порівняння роботи палі в куці та одиночної палі за методом граничних елементів спрогнозовано нелінійну задачу поведінки одиночної палі під навантаженням.*

#### Вступ

Під час експлуатації всі споруди передають навантаження на ґрунт. В деяких випадках ця задача здійснюється через численні послідовно розташовані елементи споруди, в інших випадках, як в дорожніх покриттях, контакт є безпосереднім. Та у всіх випадках основне значення має реакція ґрунту на дію прикладеного навантаження.

Одним з головних завдань під час проектування споруд є оцінювання технічної та економічної доцільності влаштування конкретних видів фундаментів з урахуванням специфічних природних умов будівельного майданчика. Адже кошторисна вартість підземної частини споруд за складних інженерно-геологічних умов складає 40—45 % загальної вартості. Для вибору найкращого варіанту використовується варіантне проектування, яке базується на основних принципах економічності, надійності, швидкості спорудження, максимального використання несучої спроможності основ і фундаментів, використанні під час проектування сучасних досягнень механіки ґрунтів та фундаментобудування.

#### Постановка задачі, визначальні співвідношення

Досить часто теоретичні моделі фундаментних конструкцій є єдиним джерелом відомостей про їх напружено-деформований стан (НДС) та несучу здатність. Інженерні задачі механіки ґрунтів описуються еліптичними диференціальними рівняннями в частинних похідних (класичними рівняннями Лапласа). Їх можна ефективно розв'язувати, використовуючи потенціал методу граничних елементів, який на теперішній час є одним із найдієвіших числових методів розв'язання крайових прикладних задач геомеханіки.

Перетворення розрахункової системи з 15 диференціальних рівнянь в частинних похідних (рівнянь рівноваги, геометричних, фізичних) в інтегральне рівняння (1) та пошук його числового розв'язку — суть МГЕ. Під час розгляду задачі визначення несучої здатності кільцевого пальового поля силосу (рис. 1) розрахункове інтегральне рівняння рівноваги паль в ґрунті [1]:

$$C(\xi)U(\xi) + \int_{\Gamma} U(x)q^*(\xi, x)d\Gamma(x) = \int_{\Gamma} q(x)U^*(\xi, x)d\Gamma(x), \quad (1)$$



Рис. 1. Вигляд силосів для сушіння зерна в м. Оратів

яке пов'язує значення  $U$  і його нормальної похідної  $q = du/dx$  в кожному граничному вузлі на границі досліджуваної фундаментної конструкції.  $U^*(\xi, x)$ ,  $q^*(\xi, x)$  — фундаментальні розв'язки Р. Міндліна для переміщень та напружень в пружній напівплощині. Коефіцієнт  $C(\xi) = 1/2$  для гладкої границі. Матричний вигляд рівняння (1)

$$A \cdot Y = F, \tag{2}$$

де  $A$  — матриця впливу МГЕ;  $Y$  — шуканий вектор напружень на границі палі (дотичні напруження  $\tau_i$  по боковій поверхні та нормальні напруження під вістрям палі  $\sigma_i$ );  $F$  — заданий вектор переміщень.

В процесі компонування матриці впливу МГЕ точка прикладання навантаження  $\xi$  розташовувалась по черзі на боковій поверхні та вістрі всіх паль пальового поля, що входили в активну зону кожної палі. Це дало можливість відслідковувати взаємовплив активних зон сусідніх паль. Матриця впливу МГЕ  $A = \begin{bmatrix} KSS & KBS \\ KSB & KBB \end{bmatrix}$  складалась із чотирьох підматриць, коефіцієнти яких є переміщенням точок бо-

кової поверхні та вістря від дії одиничних напружень  $\tau_s = 1$  та нормальних напружень  $\sigma_l = 1$  по вістрі.

Пальові фундаменти спроможні забезпечити найраціональніше проектне рішення, вони створюють можливість:

- уникнути великих і нерівномірних осідань;
- прорізати шари ґрунту, які під впливом води можуть втратити стійкість;
- забезпечити стійкість споруд, що знаходяться під впливом значних горизонтальних навантажень.

Таблиця 1

Середньозважені характеристики шарів ґрунту будівельного майданчика

$E$ , МПа	$\varphi, \rho$	$\rho^{\min}$ , т/м <sup>3</sup>	$\rho^{\max}$ , т/м <sup>3</sup>	$\rho$ , т/м <sup>3</sup>	$\nu$	$C$ , кПа
9,52	0,1572	1,585	2,24	1,87	0,35	15,49

З метою оптимізації кільцевого пальового поля силосу за числовим МГЕ [2] спочатку було спрогнозовано поведінку одиночної забивної палі С100.35 (з них складалось кільцеве пальове поле силосу) в ґрунтах з середньозваженими фізико-механічними характеристиками, наведеними в табл. 1.

В табл. 1:  $E$  — модуль деформації ґрунту;  $\varphi$  — кут внутрішнього тертя;  $\rho$  — щільність ґрунту;  $\nu$  — коефіцієнт поперечного розширення;  $C$  — зчеплення.

За допомогою використання дилатансійної нелінійної моделі [2], яка базується на подібності реакцій на навантаження натурального фундаменту та числової моделі, отримано графік залежності навантаження—осідання (рис. 2б) та наведено дискретизацію активної зони навколопальнової основи. Згідно з даними прогнозування у разі осідання  $S = 1$  см несуча спроможність одиночної палі для цих ґрунтів складала 256 кН. Несуча спроможність за методикою діючого ДБН В.2.1-10-2009 «Основи та фундаменти споруд» складає 264 кН.

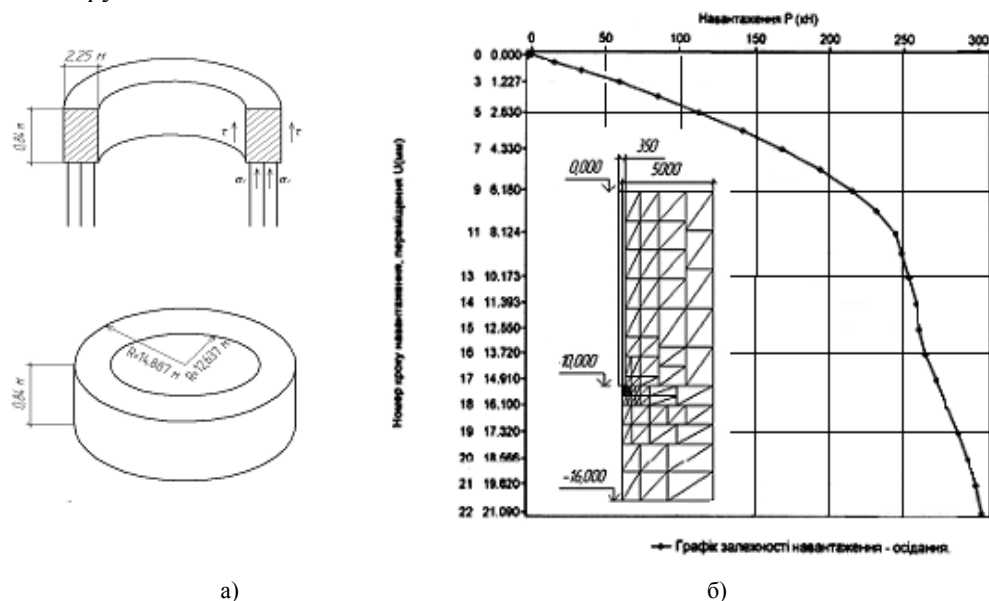


Рис. 2. Розміри кільцевого ростверку (а); графік залежності навантаження—осідання та дискретизація активної зони навколопальнової основи (б)

В першому початковому варіанті розрахунку за фундаментну конструкцію силосу взято 248 палів С 100.35 (рис. 3) з кільцевим ростверком висотою 0,84 м та шириною 2,25 м. Конструкція кільцевого ростверку показана на рис. 3.

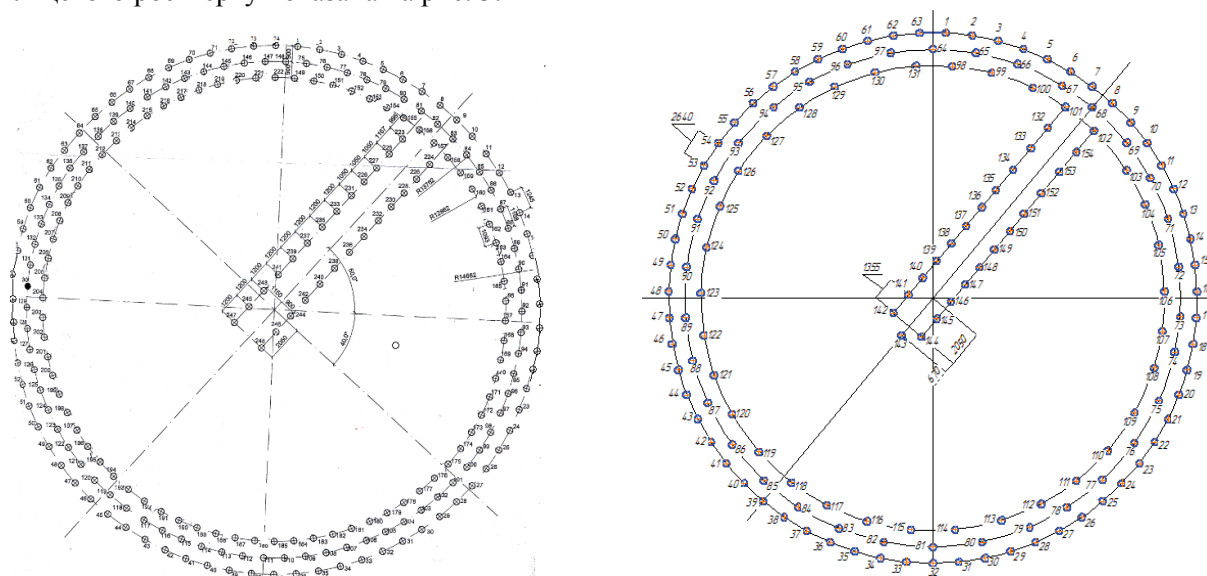


Рис. 3. План пального поля силосу початковий та оптимізований за IV варіантом

В процесі розрахунку за числовим МГЕ, з урахуванням взаємовпливу активних зон сусідніх палів, несучої спроможності I варіанту кільцевого пального поля силосу зерносушарки виявлено, що несуча спроможність найзатиснутіших палів складає 40—55 кН, що є лише 1/5 можливої несучої спроможності одиночної палі С 100.35, (див. рис. 2б). Сумарна несуча спроможність кільцевого пального поля для  $S = 1$  см становить 13392,4 кН. З огляду на те, що відстань між палями була  $< 3d$ , де  $d$  — діаметр палі, а чинні нормативні документи пропонують відстань між палями пального поля приймати  $> 3d$ , проведено оптимізацію пального поля.

В другому варіанті прогнозного розрахунку кількість палів зменшено на 37 штук, що дало можливість підняти несучу спроможність палів по зовнішньому радіусу (див. рис. 3) з 54 кН до 65 кН.

В третьому варіанті зменшено кількість палів на 73 штуки, несуча спроможність палів по зовнішньому радіусу збільшилась з 54 кН до 72 кН.

В четвертому варіанті зменшено кількість палів на 94 штуки (див. рис. 3), несуча спроможність найзатиснутіших палів по зовнішньому радіусу зростає з 54 кН до 87 кН, саме таке розташування палів забезпечує рівномірне навантаження на кожну палию. За рахунок раціонального перерозподілу зусиль між палями кільцевого пального поля значно вирівняно показники несучої спроможності кожної палі кільцевого пального поля силосу. Результати розрахунків сумарної несучої спроможності кільцевого пального поля зведені в табл. 2.

Таблиця 2

Результати оптимізації кільцевого пального поля силосу зерносушарки

№ варіанта розрахунку	Кількість палів С 100.35, штук	Сумарна несуча спроможність кільцевого пального поля, для $S = 1$ см, кН
1	248	13392
2	$248 - 37 = 211$	13562,6
3	$248 - 37 - 36 = 175$	13748,8
4	$248 - 94 = 154$	14061,74

В процесі числового розв'язання розрахункового рівняння фундаменту (1), (2) для визначення несучої спроможності кільцевого ростверку пального поля (рис. 2а) матриця впливу МГЕ складалась із дев'яти підматриць:

$$A = \begin{vmatrix} KS1S1 & KS2S1 & KBS1 \\ KS1S2 & KS2S2 & KBS2 \\ KS1B & KS2B & KBB \end{vmatrix},$$

які є фундаментальними розв'язками Р. Міндліна. Після визначення вектора напружень по границі фундаментної конструкції несуча спроможність визначалась інтегруванням по бокових поверхнях (зовнішній та внутрішній) та вістрі палі.

Несуча спроможність такого ростверку для  $S = 1$  см склала 4574 кН. МГЕ заснований на ідеї апроксимації неперервної функції дискретною моделлю. МГЕ дає можливість розчленувати розрахункову систему рівнянь на основі розгляду кожного окремого граничного елемента, що дуже зручно в реалізації і є особливістю методу. В роботі використано кусково-лінійну апроксимацію. Числове інтегрування проводилося за схемою Гаусса з автоматичним вибором кількості точок інтегрування, що дає можливість отримати числовий розв'язок нелінійної задачі механіки ґрунтів.

Під час збору навантаження на кільцевий пальовий фундамент розраховано: власна вага банки силосу — 178,755 т; вага зерна —  $P_{\text{зерна}} = \rho \cdot V = 800 \text{ кг/м}^3 \cdot 18,075 \text{ м}^3 = 14460 \text{ т}$ ; снігове навантаження —  $P_{\text{сніг}} = S_{\text{кришки}} \cdot S_{\text{сніг}} = \pi \cdot 14,887 \text{ м}^2 \cdot 146,47 \text{ кг/м}^2 = 101,98 \text{ т}$ .

Сумарне навантаження склало  $\Sigma = 147407,35$  кН. Несуча спроможність прийнятої конструкції фундаменту силосу складається із несучої спроможності 154 штук палей С 100.35 при  $S = 1$  см — 14061,74 кН та несучої спроможності кільцевого ростверка для  $S = 1$  см — 4574 кН. Загальна несуча спроможність  $\Sigma = 18638$  кН для  $S = 1$  см.

Очікуване осідання фундаменту:  $147407,35 : 18,638 = 7,91$  см, що менше допустимого за ДБН В.2.1-10-2009 «Основи та фундаменти споруд. Зміна № 1», яке становить 10 см.

З огляду на те, що дно силосу жорстко не зв'язане з його фундаментною конструкцією, за умови, якщо на пальовий фундамент буде передаватись лише 50 % ваги зерна, сумарне навантаження на фундамент складе:  $1787,55 + 1019,8 + 72300 = 75107,35$  кН, то очікуване осідання фундаменту  $S = 4,03$  см.

Із результатів роботи видно, що подібне технічне рішення (четвертий варіант розрахунку) дозволяє суттєво скоротити терміни і кошторисну вартість спорудження підземної частини силосу для сушіння зерна, що будується, з дотриманням вимог надійності і довговічності конструкції.

Запропоноване для силосу зерносушарки пальове фундаментне поле (154 палей С 100.35 з кільцевим ростверком) дозволяє забезпечити для споруди допустимі значення осідань  $S = 7,91 \text{ см} < [10 \text{ см}]$  згідно з ДБН.

## Висновки

1. Запропонований покращений варіант оптимізації кільцевого пальового поля силосу дозволяє зменшити кількість палей з 248 штук до 154, що сприятиме значному економічному ефекту.

2. Числовий прогноз осідань силосу зерносушарки за методом граничних елементів дозволяє задовільно описувати процес розвитку деформацій фундаментних конструкцій, моделювати їх поведінку під дією статичного навантаження. Це свідчить про адекватність закладених в основу моделі передумов і перспективність використання математичної моделі для розв'язання практичних задач фундаментобудування.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Бенерджи П. Методы граничных элементов в прикладных науках / П. Бенерджи, Р. Баттерфилд. — М. : Мир, 1984. — 494 с.
2. Моргун А. С. Комп'ютерні технології розрахунку фундаментних конструкцій на основі методу граничних елементів / А. С. Моргун, І. М. Меть, А. В. Ніцевич. — Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2002. — 162 с.

Рекомендована кафедрою промислового та цивільного будівництва

Стаття надійшла до редакції 29.05.2013  
Рекомендована до друку 10.07.2013

**Моргун Алла Серафимівна** — завідувач кафедри промислового та цивільного будівництва; **Франчук Ольга Василівна** — студент Інституту магістратури, аспірантури та докторантури, **Довгопол Дмитро Сергійович** — студент Інституту будівництва, теплоенергетики та газопостачання.

Вінницький національний технічний університет, Вінниця