

**МЕТОДИКА ЧИСЛОВОГО МОДЕЛЮВАННЯ ЗА МЕТОДОМ ГРАНИЧНИХ
ЕЛЕМЕНТІВ (МГЕ) РОЗВИТКУ ЗОН ГРАНИЧНОГО СТАНУ ҐРУНТУ
КІЛЬЦЕВОГО ФУНДАМЕНТУ**

Моргун А.С., д.т.н., професор,
Малачковська Р.І., аспірант,
Вінницький національний технічний університет
roksimalachkovska@gmail.com

Анотація. Так як надійність основ залежить від вміння оцінити інженерно-геологічні умови основ, їх гідрогеологічну ситуацію, зміну цих властивостей в процесі будівництва та експлуатації, то є потреба залучення для розрахунку надійності основ 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.

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

Ключові слова: інженерно-геологічні умови, кільцевий фундамент, розрахунок осідання основ, дилатансія, несуча спроможність, метод граничних елементів (МГЕ).

**МЕТОДИКА ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПО МЕТОДУ ГРАНИЧНЫХ
ЭЛЕМЕНТОВ (МГЭ) РАЗВИТИЯ ЗОН ПРЕДЕЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ ПОЧВЫ
КОЛЬЦЕВОГО ФУНДАМЕНТА**

Моргун А.С., д.т.н., профессор,
Малачковская Р.И., аспирант,
Винницкий национальный технический университет
roksimalachkovska@gmail.com

Аннотация. Так как надежность оснований зависит от умения оценить инженерно-геологические условия оснований, их гидрогеологическую ситуацию, изменение этих свойств в процессе строительства и эксплуатации, то есть потребность привлечения для расчета надежности оснований последних достижений механики грунтов, современных численных методов и ЭВМ. Большой разброс инженерно-геологических условий, многообразие конструкций сооружений исключает стандартный подход к проектированию оснований и фундаментов и требует творческого осмысления.

В статье по методу граничных элементов оптимизирован кольцевой свайный фундамент силоса. Приведена методика расчета несущей способности кольцевого ростверка и кольцевого свайного поля. Для сравнения работы свай в кусте и одиночной сваи по МГЭ спрогнозирована нелинейную задачу поведения одиночной сваи под нагрузкой.

Ключевые слова: инженерно-геологические условия, кольцевой фундамент, расчет осадок оснований, дилатансия, несущая способность, метод граничных элементов (МГЭ).

METHODOLOGY OF NUMERICAL MODELING BY BOUNDARY ELEMENT METHOD (BEM) OF DEVELOPMENT OF SOIL BORDER CONDITION ZONES OF THE RING FOUNDATION

Morgun A.S., Doctor of Engineering, Professor,
Malachkovska R.I., post-graduate,
Vinnitsia National Technical University
roksimalachkovska@gmail.com

Abstract. Since reliability of foundations depends on the ability to assess engineering and geological conditions of bases, their hydrogeological situation, change in these properties during construction and operation, there is a need to attract latest advances in soil mechanics, modern numerical methods and computers to calculate reliability of the bases. A wide dispersion of engineering-geological conditions, a variety of building structures excludes standard approach to the design of bases and foundations and requires creative reflection.

Ring foundations (like chimneys, cooling towers, silos towers, radar stations, towers) are the most suitable and economically advantageous for round in plan constructions. They are less material-intensive and reduce the cost. These factors are important for an investor.

The distribution of pressure in the soil base of the ring foundations has quantitative and qualitative differences from foundation structures of another form (round, rectangular, belt), which requires their reliable calculation.

In the article, the ring pile foundation of the silos is optimized by the method of boundary elements. The technique for calculating bearing capacity of a ring grill and an annular pile field is presented. To compare the work of piles in a bush and a single pile using the BEM, a nonlinear problem of the behavior of a single pile under load is predicted.

Key words: engineering and geological conditions, ring foundation, calculation of base subsidence, dilatancy, bearing capacity, boundary element method (BEM).

Вступ. Всі споруди в кінці-кінців передають навантаження на ґрунт. В деяких випадках ця передача здійснюється через багаточисленні послідовно розташовані елементи споруди, в інших випадках, як в дорожніх покриттів, контакт є безпосереднім. Та у всіх випадках основне значення має реакція ґрунту на дію прикладеного навантаження. Одним з головних завдань при проектуванні споруд є технічна та економічна доцільність влаштування конкретних видів фундаментів з урахуванням специфічних природніх умов будівельного майданчика. Адже кошторисна вартість підземної частини споруд при складних інженерно-геологічних умовах 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 при проектуванні сучасних досягнень механіки ґрунтів та ЕОМ.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Для сьогодення математичне прогнозування – одне із головних і найбільш економічних прийомів теоретичних і прикладних досліджень актуальних проблем фундаментобудування. Теоретичним та експериментальним дослідженням роботи кільцевих фундаментів присвячено роботи Тугаєнка Ю.Ф., Головка О.С. [1], Шаповала В.Г., Бородіна М.А., Швеця В.Б. [2] та інших.

Метою дослідження є напрацювання нелінійної методики розрахунку напружено-деформованого стану (НДС) системи „кільцевий фундамент-дилатансійна основа” з урахуванням дилатансійних властивостей ґрунту та залученням числового МГЕ.

Постановка задачі, визначальні співвідношення. Прогнозування осідань основ фундаментів являється однією з найбільш складних задач механіки ґрунтів. Значний потенціал можливостей для отримання достовірної картини напружено-деформованого стану ґрунтової основи відкриває пружно-пластична модель роботи ґрунту під навантаженням [3-5], яку було

використано в роботі. 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 – один з найбільш дієвих числових методів розв'язання крайових прикладних задач геомеханіки. Перетворення розрахункової системи 15-ти диференціальних рівнянь в частинних похідних (рівнянь рівноваги, геометричних, фізичних) в інтегральне рівняння (1) та пошук його числового розв'язку – суть МГЕ. При розгляді задачі визначення несучої здатності кільцевого пального поля та кільцевого ростверку силосу зерносушарки, рис.1 розрахункове інтегральне рівняння рівноваги паль в ґрунті [6]:

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

яке пов'язує значення переміщення 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. Мінділіна для переміщень та напружень в пружній півплощині. Коефіцієнт $C(\xi) = 1/2$ для гладкої границі. Матричний вигляд рівняння (1):

$$A \cdot Y = F, \quad (2)$$

де A – матриця впливу МГЕ; Y – шуканий вектор напружень на границі палі (дотичні напруження τ_i по боковій поверхні та нормальні напруження під вістрям палі σ_1); F – заданий вектор переміщень.

Для числової реалізації задачі бокова поверхня фундаментної конструкції та нижня поверхня контакту (вістря) дискретизувались лінійними граничними елементами.

При компонуванні матриці впливу МГЕ точка прикладання навантаження ξ розташовувалась по черзі на боковій поверхні та вістрі всіх паль пального поля, що входили в активну зону кожної палі, це дало можливість відслідковувати взаємовплив активних зон сусідніх паль.

Матриця впливу МГЕ $A = \begin{vmatrix} KSS & KBS \\ KSB & KBB \end{vmatrix}$ складалась із чотирьох підматриць,

коефіцієнти яких є переміщення точок бокової поверхні та вістря від дії одиничних сил $P=1$, прикладених по граничних елементах бокової поверхні та вістря. Для визначення осідань та оптимізації кільцевого фундаменту силосів для сушіння зерна (рис. 1) з залученням числового МГЕ напрацьовано пружно-пластичну дилатансійну модель [3, 5].



Рис.1. Вигляд силосів для сушіння зерна

Модель базується на теорії пластичної течії в формі неасоційованого закону, використання дилатансійних співвідношень В.Н. Ніколаєвського та І.П. Бойка [3, 4], процедури крокового навантаження по методу пружних рішень О.А. Ільюшина. В якості критерія переходу ґрунту в пластичний стан використано критерій Мізеса-Шлейхера-

Боткіна, який в просторі головних напружень описується поверхнею, що складається із конічної та циліндричної частин, рис. 2.

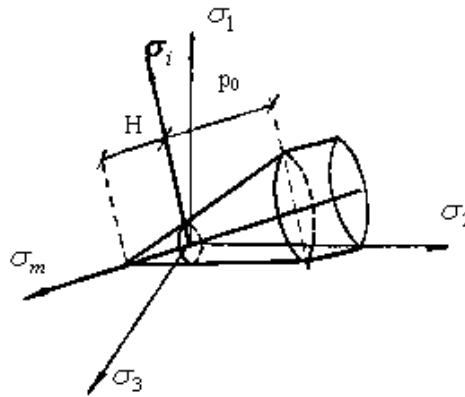


Рис. 2. Критерій текучості Мізеса-Шлейхера-Боткіна

Циліндрична частина критерію описує стан ґрунту при досягненні в ньому максимальної щільності, рахується, що ґрунт в такому стані працює як суцільне середовище. Таким чином, пороговий характер пластичних деформацій:

$$\begin{aligned} f &= \sigma_i + \sigma_m \operatorname{tg} \psi - \tau_s && \text{при } \sigma_m \leq p_0, \\ f &= \sigma_i + p_0 \operatorname{tg} \psi - \tau_s && \text{при } \sigma_m > p_0, \end{aligned} \quad (3)$$

де σ_i – інтенсивність девіатора напруг; σ_m – гідростатичний тиск; ψ , τ_s – кут внутрішнього тертя та зчеплення на октаедричній площині, p_0 – межа переходу від конуса до циліндра.

Для розв’язання задачі теорії пружності крім звичайних рівнянь рівноваги вводилось ще два додаткові. Перше формулювалось для компонент тензора напружень, друге – для компонент швидкостей пластичних деформацій:

$$F_\sigma(\sigma_{ij}, \alpha, \chi \dots) = 0; \quad F_e(e^p_{ij}, \Lambda, \chi \dots) = 0; \quad (4)$$

де α – коефіцієнт внутрішнього тертя, χ – параметр зміцнення, $\Lambda = d\varepsilon_v / d\gamma$ – швидкість дилатансії. Перше з цих рівнянь в просторі напружень визначає миттєву поверхню текучості, друге – орієнтацію в тій же точці вектора швидкостей приростів пластичних деформацій.

Пальові фундаменти спроможні забезпечити найбільш раціональне 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. З метою оптимізації кільцевого пальового поля силосу за числовим МГЕ [5] спочатку було спрогнозовано поведінку одиночної забивної палі С100.35 (з них складалось кільцеве пальове поле силосу) в ґрунтах з середньозваженими фізико-механічними характеристиками: $E = 9.52 \text{ МПа}$, $\varphi = 0.152$ р., $\rho = 1.87 \text{ т/м}^3$; $\rho^{\max} = 2.24 \text{ т/м}^3$; $\rho^{\min} = 1.59 \text{ т/м}^3$; $\vartheta = 0.35$; $C = 15.5 \text{ КПа}$.

За допомогою напрацьованої пружно-пластичної дилатансійної моделі [3, 5] отримано графік залежності навантаження-осідання палі С 100.35, (рис. 4) та наведено дискретизацію активної зони навколо пальової основи. Згідно даних прогнозування за МГЕ при осіданні $S=1$ см несуча спроможність одиночної палі для даних ґрунтів складала 256 кН. Несуча спроможність палі С 100.35 за методикою діючого ДБН [7] – 264 кН.

В першому початковому варіанті розрахунку в якості фундаментної конструкції силосу взято 248 паль С 100.35 (рис. 4) з кільцевим ростверком висотою 0,84 м та шириною 2,25 м. Конструкція кільцевого ростверку наведена на рис. 3.

При розрахунку за числовим МГЕ, з урахуванням взаємовпливу активних зон сусідніх паль [5], несучої спроможності I варіанту кільцевого пальового поля силосу зерносушарки

БУДІВЕЛЬНІ КОНСТРУКЦІЇ

виявлено, що несуча спроможність найбільш затиснутих паль складає 40-55 кН, що є лише 1/5 частина можливої несучої спроможності одиночної палі С 100.35, (рис. 4). Сумарна несуча спроможність кільцевого пальового поля при $S = 1$ см – 13392,4 кН. З огляду на те, що відстань між палями була $< 3d$, а чинні нормативні документи пропонують відстань між палями пальового поля приймати $> 3d$, проведено оптимізацію пальового поля.

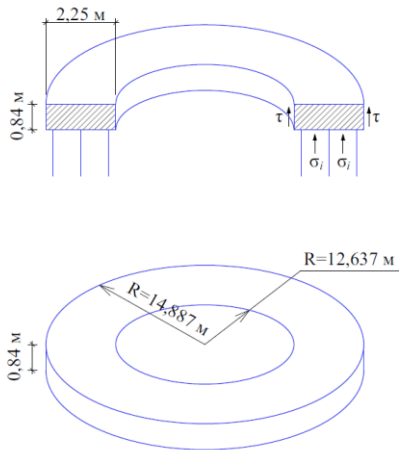


Рис. 3. Конструкція кільцевого ростверку

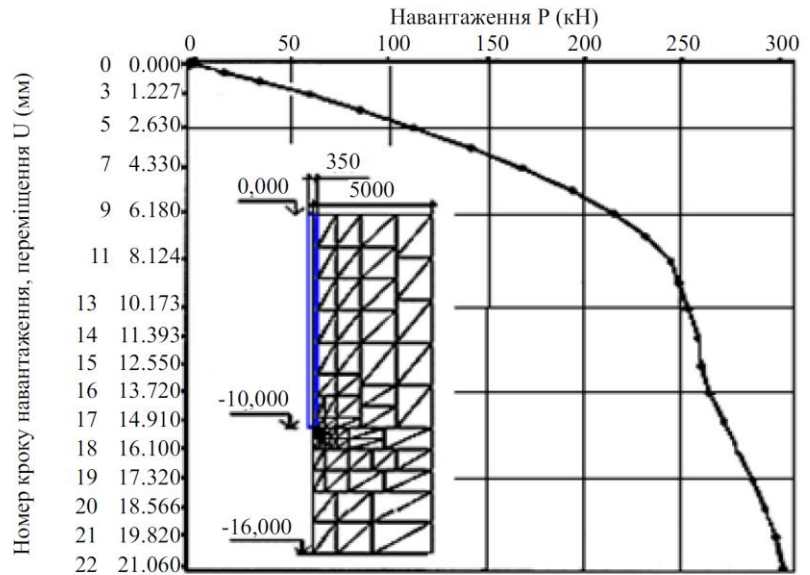


Рис. 4. Графік залежності навантаження-осідання для палі С 100-35 та дискретизація активної зони навколопальнової основи

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

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

В четвертому варіанті зменшено кількість паль на 94 штуки (рис. 5), несуча спроможність найбільш затиснених паль по зовнішньому радіусу зросла з 54 кН до 87 кН, саме таке розташування паль забезпечує рівномірне навантаження на кожен палею.

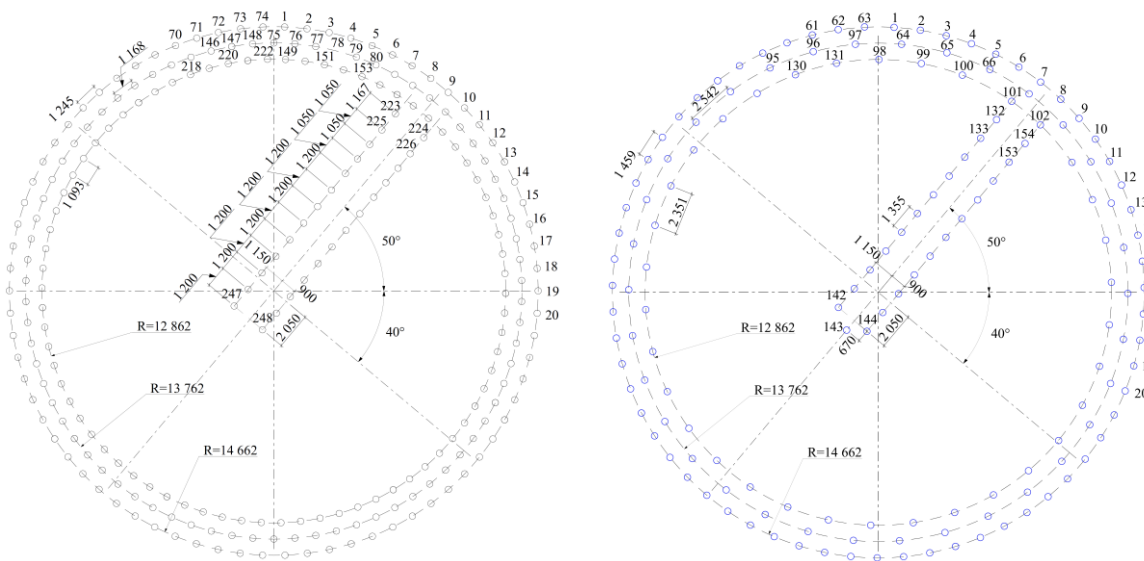


Рис. 5. План пальового поля силосу початковий та оптимізований по IV варіанту

Результати досліджень. За рахунок раціонального перерозподілу зусиль між палями кільцевого пальового поля значно вирівняно показники несучої спроможності кожної палі кільцевого пальового поля силосу. Результати розрахунків сумарної несучої спроможності кільцевого пальового поля наведені в табл. 1.

Таблиця 1 – Результати оптимізації кільцевого пальового поля силосу зерносушарки

№ варіанту розрахунку	Кількість палей С 100.35 (штук)	Сумарна несуча спроможність кільцевого пальового поля при S=1 см
1	248	13392 кН
2	248-37=211	13562,6 кН
3	248-37-36=175	13748,8 кН
4	248-94=154	14061,74 кН

При числовому розв’язанні розрахункового рівняння фундаменту (1, 2) для визначення несучої спроможності кільцевого ростверку пальового поля (рис. 3) матриця впливу МГЕ

складалась із дев’яти підматриць: $A = \begin{vmatrix} KS1S1 & KS2S1 & KBS1 \\ KS1S2 & KS2S2 & KBS2 \\ KS1B & KS2B & KBB \end{vmatrix}$, які є переміщеннями вузлових

точок граничних елементів (ГЕ) бокової поверхні (внутрішньої та зовнішньої поверхонь кільцевого ростверку) від дії $P = 1$ (фундаментальні рішення Р. Міндліна). Після визначення вектора напружень по границі фундаментної конструкції несуча спроможність визначалась інтегруванням по бокових поверхнях (зовнішній та внутрішній) та вістря палі.

Несуча спроможність такого ростверку при $S = 1$ см склала 4574 кН., рис. 6.

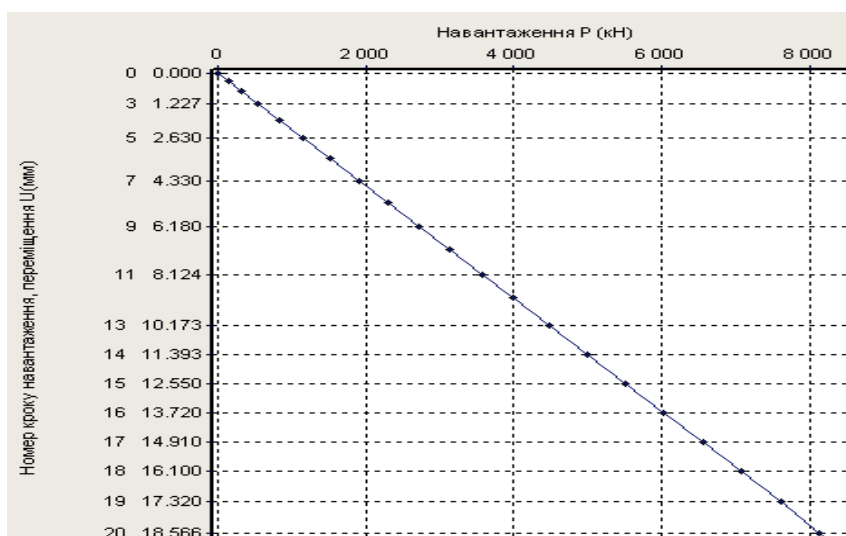


Рис. 6. Графік деформування кільцевого ростверку

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 кусочно-лінійна апроксимація. Числове інтегрування проводилося за схемою Гауса з автоматичним вибором кількості точок інтегрування, що дає можливість отримати числовий розв’язок нелінійної задачі механіки ґрунтів.

При зборі навантаження на кільцевий паливий 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 паль С 100.35 при $S = 1$ см – 14061,74 кН та несучої спроможності кільцевого ростверку при $S = 1$ см – 4574 кН. Загальна несуча спроможність $\Sigma = 18638$ кН при $S = 1$ см.

Очікуване осідання фундаменту: $147407,35:18,638 = 7,91$ см, що менше допустимого за ДБН [7], яке становить 10 см.

З огляду на те, що дно силосу не пов'язано жорстко 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 з дотриманням вимог надійності і довговічності конструкції, що будується.

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

Висновки та перспективи подальших досліджень. Запропонований покращений варіант оптимізації кільцевого пального поля силосу дозволяє зменшити кількість паль з 248 штук до 154, що сприятиме значному економічному ефекту. Напрацьована методика дозволяє на всіх етапах навантаження отримувати НДС системи «основа-фундамент», яка залежить як від властивостей ґрунту, так і від розмірів та форми фундаменту. Числовий прогноз осідань силосу зерносушарки за МГЕ дозволяє задовільно описувати процес розвитку деформацій фундаментних конструкцій, моделювати їх поведінку при статичному навантаженні. Це свідчить про адекватність закладених в основу моделі передумов і перспективність використання математичної моделі для рішення практичних задач фундаментобудування.

Література

1. Головка О.С. Крени фундаментів з кільцевою формою підшви на водонасиченому шарі кінцевої товщини : автореферат на здобуття ступеня канд. техн. наук / О.С. Головка. – Дніпропетровськ : ПДАБ, 2010. – 24 с.
2. Бородин М.А. Исследование осадок основания кольцевых фундаментов / М.А. Бородин, В.Г. Шаповал, В.Б. Швец // Основания, фундаменты и механика грунтов. – М. : НИИОСП, 2001. №1. – С. 12-15.
3. Бойко І.П. Напружено-деформований стан ґрунтового масиву при побудові нових фундаментів поблизу існуючих будинків / І.П. Бойко, О.В. Сахаров // Основи і фундаменти: Міжвідомчий науково – технічний збірник. – К. : КНУБА, 2004. – Вип. 28. – С. 3-10.
4. Николаевский В.Н. Современные проблемы механики грунтов / В.Н. Николаевский // Определяющие законы механики грунтов. – М. : Стройиздат, 1975. – С. 210-227.
5. 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.
6. Бенерджи П. Методы граничных элементов в прикладных науках / П. Бенерджи, Р. Баттерфилд, К. Телес. – Москва : «Мир», 1984. – 494 с.
7. Основи та фундаменти споруд. Основні положення проектування : ДБН В.2.1-10-2009. – [Чинний від 2009-07-01]. – К. : Мінрегіонбуд України, 2009. – 82 с. – (Національні стандарти України).

Стаття надійшла 23.04.2018