

**ДОСЛІДЖЕННЯ ОСІДАНЬ ФУНДАМЕНТНИХ ПЛИТ МЕТАЛЕВИХ СИЛОСІВ ПРИ ОДНОРЯДНОМУ РОЗТАШУВАННІ ТА МОДЕЛЮВАННІ ВАРІАНТІВ ЇХ ЗАВАНТАЖЕННЯ**

**INVESTIGATION OF SETTLEMENT OF METAL SILOS FOUNDATION SLABS IN A SINGLE-ROW ARRANGEMENT AND MODELING OF THEIR LOADING OPTIONS**

Підгурський М. І., д.т.н., проф., ORCID 0000-0002-0218-8874, Підгурський І. М., к.т.н., доц., ORCID 0000-0002-5937-7625, Сорочак А.П., к.т.н., доц., ORCID 0000-0001-8086-8173, Биків Д. З. (Тернопільський національний технічний університет ім. І. Пулюя, м. Тернопіль)

*Pidgurskyi M. I., doctor of technical sciences, professor, Pidgurskyi I. M., candidate of technical sciences, associate professor, Sorochak A.P., candidate of technical sciences, associate professor, Bykiv D. Z. (Ternopil Ivan Puluj National Technical University, Ternopil)*

Проведено дослідження сумісної роботи плитних фундаментів металевих силосів, розташованих в один ряд. Розрахунок проведено за допомогою чисельного моделювання методом скінчених елементів. Встановлено особливості осідань фундаментних плит від їх кількості та розташування в ряді.

An analysis of the grain storage elevators construction, in particular construction of metal silos, was carried out. Cyclic loading/unloading and dynamic effects on the structures of metal silos and foundations during such processes are characteristic features of the operation of silos. The analysis of mathematical models of the soil base, which are most often used for modeling the "soil-foundation-structure" system, as well as their application in numerical simulation of the structures operation taking into account their interaction with the soil, is presented. The use of the linear-deformation semi-space method is justified for the calculation of foundation slabs for metal silos. In this case, the computer model of the base is created using the soil bed coefficients  $C_1$  and  $C_2$ . This model was chosen taking into account the homogeneity of the soils under the foundation slab and the constant thickness of the soil layers, as well as the possibility of taking into account the spatial operation of the soil and the mutual influence of the foundation slabs in this model. Using computer modeling in the "LIRA" software complex, a study of the settlement of a single foundation slab in single-row arrangement was

carried out. It was established that the isofields of settlement differ significantly for the specified cases. The peculiarities of the settlement of foundation slabs depending on their number and position in a row have been established. It is noted that the largest tilts have furthest foundations or those located closest to the unloaded silos.

**Ключові слова:**

Металеві силоси, плитні фундаменти, варіанти навантаження, чисельне моделювання.

Metal silos, slab foundations, load options, numerical simulation.

**Вступ.** В Україні здійснюється будівництво нових елеваторів (особливо в західних областях та портах Дунаю), реконструкція та відновлення існуючих елеваторів (у зв'язку з їх руйнуванням під час війни), проте дефіцит сховищ для зберігання зернових та олійних культур становить близько 15-20 млн тонн [1-4].

Починаючи з 2000-х років на будівельному ринку елеваторів переважають тонкостінні металеві силоси. Перевагами металевих силосів у порівнянні з залізобетонними є їх менша маса, можливість заводського виготовлення конструкцій, доступне транспортування та швидкість виконання монтажних робіт за малих затрат праці [4], що є особливо важливим на теперішній час.

**Аналіз останніх досліджень.** Для металевих силосів залишається важливою проблема їх надійності, зокрема, як металевих корпусів (стінка і покрівля) [4, 5], так і фундаментних конструкцій [3, 6 - 8]. Сучасний металевий силос – це складна інженерна споруда, що конструктивно складаються з великої ємності для зберігання продукції рослинництва, у яку вбудовані механізми для завантаження, перемішування і вивантаження, вентиляційні системи, датчики та системи автоматизованого керування режимами роботи. Особливостями експлуатації силосів є їх циклічне завантаження/розвантаження та динамічні впливи на конструкції корпусів та фундаментів під час таких процесів [6, 7]. Важливими для надійної роботи металевих силосів є врахування періодичних вітрових впливів [5] на сталеві ємності, їх фундаменти та основи.

Більшість ускладнень та аварійних ситуацій при експлуатації металевих силосів викликані нерівномірними деформаціями ґрунтової основи та їхнім впливом на конструкції фундаментів внаслідок таких деформацій [3, 6 - 8].

У зв'язку з цим **метою роботи** є дослідження НДС основ фундаментів при моделюванні різних варіантів навантаження металевих силосів при їх однорядному розташуванні.

**Основна частина.** На теперішній час для врахування осідань будівель і споруд відсутня єдина загальновизнана методика математичного

моделювання властивостей ґрунтової основи, що пояснюється як різноманіттям і складністю інженерно-геологічних умов ділянок будівництва, так і широким діапазоном конструктивно-технологічних типів будівель і споруд, що зводяться на цих будівельних майданчиках [9, 10].

Серед моделей, що описують суцільну ґрунтову основу, можна виділити декілька основних, що найбільш широко застосовуються. До них відносять [11]:

- модель Вінклера та її модифікації;
- моделі пружного (лінійно-деформованого) півпростору і лінійно-деформованого шару скінченної товщини;
- нелінійні (пружнопластичні моделі).

Структуризований аналіз математичних моделей ґрунтів, які можуть бути застосовані при вирішенні ряду актуальних науково-практичних задач наведено у [9,10]. Зазначається, що застосування лінійної теорії пружності обґрунтовується тим, що, відповідно до вимог нормативної документації, тиск на ґрунт від фундаменту не повинен переважати 0,2 – 0,3 МПа [11]. Такий підхід дає можливість коректно застосовувати лінійні моделі для розрахунку осідань ґрунтових масивів. При збільшенні зусиль на ґрунтову основу лінійна залежність між напруженнями і деформаціями порушуються. У таких випадках застосовують нелінійні (пружнопластичні) моделі для розрахунку основ.

На сучасному етапі для моделювання систем “ґрунтова основа – фундамент – споруда” здебільшого використовують програмно-обчислювальні комплекси LIRA, SCAD Office, Plaxis, Robot Structural Analysis, ANSYS, ABAQUS та ін. У програмному забезпеченні зазначених програм застосовують наведені вище основні математичні моделі ґрунтів.

Об’єктом дослідження є ряд фундаментів зернозберігальних металевих силосів GS1-4032 великої ємності (20000 тонни кожен) (рис.1) та дослідження характеру їх завантаження на прогини і крен при спільній роботі з основою. Дослідження проведено за допомогою комп’ютерного моделювання методом скінчених елементів (МСЕ) в програмному комплексі LIRA-САПР.

Загальний вигляд силоса GS1 серії 4032 представлено на рис. 2, а, а скінчено-елементна модель його фундаменту – на рис. 2, б. Діаметр плити – 33,0 м, товщина – 0,5 м. По периметру фундаментної плити виконано потовщення для сприйняття навантаження від конструкцій силосу. Фундаментна плита змодельована із трикутних пластинчастих скінчених елементів із середнім розміром – 0,5 м, середня площа одного скінченого елемента – 0,13 м<sup>2</sup>, кількість скінчених елементів становить – 6 140 (рис. 2).

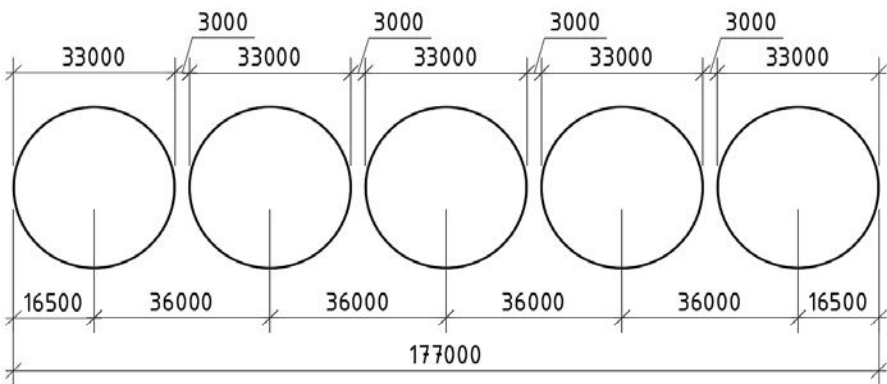
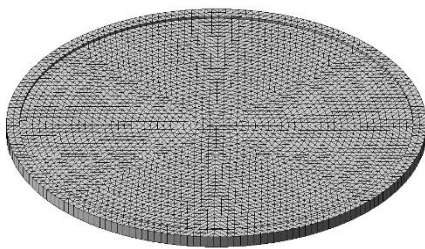


Рис. 1. Однорядне розташування п'яти фундаментних плит силосів



а)



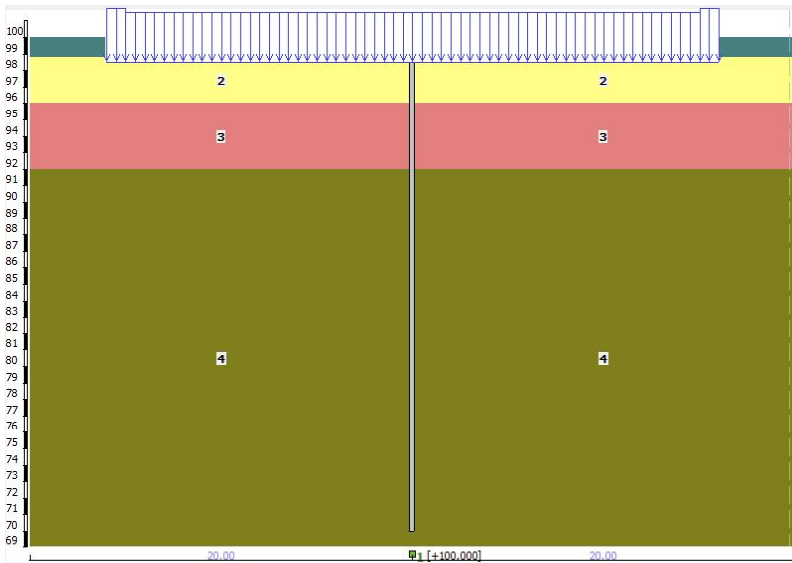
б)

Рис. 2. Загальний вигляд силоса GS1 серії 4032 (а) та скінчено-елементна модель фундаментної плити (б)

Інженерно-геологічні умови майданчика для спорудження силосів представлено на рис. 3.

Показники фізико-механічних властивостей ґрунтів наведено у табл. 1.

Розрахунок ґрунтової основи виконаний в системі ГРУНТ, де шари розбиті на скінчені елементи із розміром 0,5 м, а розрахункова схема представлена у вигляді лінійно-деформівного напівпростору (ЛДН). Нормативним документом для розрахунку обраний ДБН В.2.1-10:2009 «Основи та фундаменти споруд». Коефіцієнти для визначення розрахункового опору ґрунту взяті із таблиць даних норм.



ІГЕ	Найменування ґрунту	Абс.відм. підшови	Потужність шару	Глибина залягання
Свердловина 1				
Координати (0.00,0.00) Абсолютна відмітка устя 100.00 Глибина свердловини 30.00				
1	Насипний	98.80	1.20	1.20
2	Суглинок	96.00	2.80	4.00
3	Глина	92.00	4.00	8.00
4	Суглинок	70.00	22.00	30.00

Рис. 3. Поперечний переріз ґрунту основи

Аналіз показує, що ґрунтова основа під фундаментами складається з трьох інженерно-геологічних елементів (ІГЕ): напівтвердих суглинків та тугопластичної глини. При дослідженні ґрунтової товщі ґрунтових вод не виявлено. Глибина закладання плити (1,5 м), обрана з конструктивних міркувань, щоб уникнути промерзання та для можливості обпирання підшови на міцний шар ґрунту (рис. 3).

Таблиця 1.

Фізико-механічні властивості інженерно-геологічних елементів, що складають основу

№ ПЕ	Найменування	Потужність, м	Природна вологість, W	Показник текучості, I <sub>L</sub>	Коефіцієнт пористості, e	Питома вага, γ, кН/м <sup>3</sup>	Модуль деформування, E, МПа	Кут внутр. тертя, φ, °	Питома зчеплення, C, кПа
1	Насипний ґрунт	1,2	0,05	0,2	0,7	17,6	9,8	16	5
2	Суглинок напівтвер.	2,8	0,21	0,11	0,69	19,3	19,0	23	26
3	Глина тугопл.	4,0	0,23	0,3	0,69	19,9	20,0	17	50
4	Суглинок напівтвер.	необмеж.	0,22	0,25	0,66	19,1	20,0	24	31

Ґрунти під фундаментами є близькими до однорідних, досить міцними, зі сталого товщиною шарів. Навантаження на основу прийнято рівномірно розподіленим з розрахунковим середнім тиском 258,5 кПа.

Аналіз характеристик ґрунтів, умови їх залягання та навантаження, що діють на основу дозволяють вибрати модель на пружній основі [11-13].

У програмному комплексі ЛІРА-САПР у взаємодії із системою ГРУНТ пропонуються декілька математичних моделей для розрахунку осідання, розрахункового опору, напруження в ґрунті та модуля деформації по глибині). Комп'ютерна модель осідання у цьому випадку моделюється за допомогою коефіцієнтів жорсткості пружної основи (коефіцієнти осідання). Для порівняння результатів осідання коефіцієнти осідання визначали за моделлю Вінклера-Фусса та для модифікованої моделі Пастернака.

Модель Вінклера (метод місцевих пружних деформацій) базується на припущенні про прямо пропорційну залежність між осіданням і усередненим тиском  $p$  під подошвою фундаменту [9, 10]:

$$p = C_1 \cdot S, \quad (1)$$

де  $C_1$  – коефіцієнт осідання, який характеризує фізичні властивості ґрунтової основи.

Модель місцевих пружних деформацій рекомендується приймати для розрахунків гнучких фундаментних балок, що працюють за умов плоскої задачі на сильно стискуваних ґрунтах ( $E \leq 5$  МПа), лесових просідаючих і

при малій товщині шару, що стискається, і під яким знаходиться ґрунт, що несуттєво деформується. Для таких випадків результати розрахунку добре співпадають з натурними спостереженнями. Для випадку коли властивості ґрунту змінюються під подошвою фундаменту, доцільно застосовувати змінні коефіцієнти постелі. Проте така модель не дозволяє враховувати просторову роботу гнуту і взаємний вплив поверхонь навантаження. Для таких цілей застосовують двопараметричну модифіковану модель Пастернака.

Ця математична модель удосконалює модель Вінклера шляхом застосування двох коефіцієнтів постелі:  $C_1$  – коефіцієнт стиску і  $C_2$  – коефіцієнт зсуву [9, 10]:

$$\sigma = C_1 \cdot S_z \quad (2)$$

$$\tau = C_2 \cdot \frac{\partial S_x}{\partial x} \quad (3)$$

де  $\sigma$  – вертикальний відпір ґрунту,  $\tau$  – опір зсуву ґрунту.

Варто зазначити, що коефіцієнти моделі Пастернака відрізняються від коефіцієнта постелі Вінклера-Фусса. Особливості їх розрахунку наведено в довіднику ЛІРА-САПР. Застосування модифікованої моделі Пастернака запропоновано для уточнення розрахунків, виконаних за однопараметричними оцінками коефіцієнтів постелі в моделях Пастернака і Вінклера-Фусса. Зазначимо, що для визначення середнього модуля пружності вводиться поправковий коефіцієнт, що враховує наростання модуля деформацій по глибині параболічною залежністю. Варто зазначити, що застосування двопараметричної (модифікованої) моделі Пастернака обмежуються однорідною в плані одно- або багат шаровою ґрунтовою основою з шарами ґрунту сталої товщини [13].

Для порівняння методів було розраховано ряд фундаментів із трьох плит (для зменшення часу розрахунку та трудоемності досліджень) та визначено для них осідання (рис. 4). За методом Вінклера-Фусса ці значення становлять – 156 мм, а за модифікованим методом Пастернака – 63,3 мм. Значення осідань, отриманих за двома моделями розрахунку суттєво відрізняються. Аналогічний розрахунок осідань ґрунтового масиву за методикою лінійно-деформованого півпростору з умовним обмеженням глибини (до 13,4 м) товщі, що стискається становить 68,2 мм, що є близьким до значень осідання за двопараметричною моделлю Пастернака.

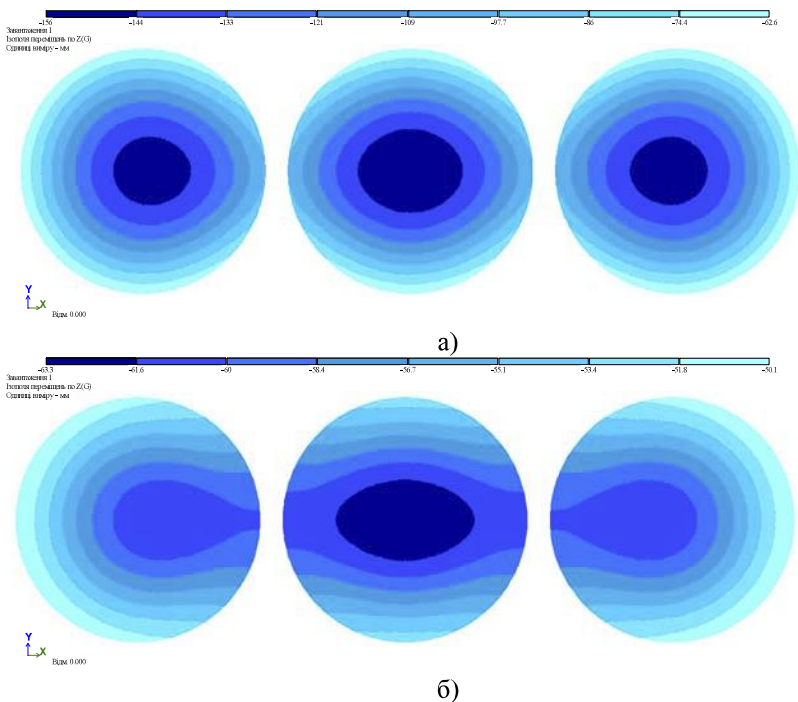


Рис. 4. Ізополя переміщень (осідання) ряду фундаментних плит:  
 а) метод розрахунку – модель Вінклера-Фусса;  
 б) метод розрахунку – модифікована модель Пастернака

Також аналізуючи ізополя осідань (рис. 4), бачимо взаємний вплив навантажень ґрунтових поверхонь на осідання фундаментних плит (рис 4, б), у той час як модель Вінклера-Фусса (рис. 4, а) не дозволяє враховувати просторову роботу ґрунту. Проведене моделювання підтвердило наведені вище висновки щодо особливостей використання кожної з досліджуваних моделей [11-13].

Зважаючи на однорідність ґрунтів, що залягають під фундаментною плитою та сталу товщину шарів ґрунту, для подальшого моделювання застосуємо модифіковану модель Пастернака, яка дозволяє також враховувати просторову роботу ґрунту та взаємний вплив фундаментних плит.

Проведено розрахунок одиначної фундаментної плити та ряду фундаментних плит при максимальному заповненні силосів зерном. Результати розрахунку представлено на рис. 5 і 6 та табл. 2. Ізополя вертикальних переміщень окремої фундаментної плити представляють



собою концентричні кола. Максимальні осідання локалізуються в центрі фундаментної плити. Відносний коефіцієнт нерівномірності, який визнається як відношення різниці максимального і мінімального переміщення до граничного осідання [14] складає 6,3 %.

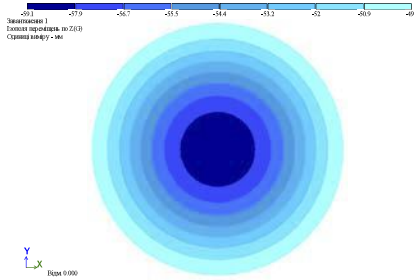
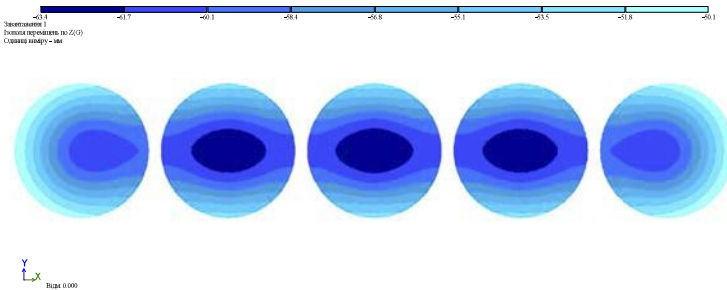


Рис. 5. Ізополя вертикальних переміщень (осідань) одиначної фундаментної плити



a)

Рис. 6. Ізополя вертикальних переміщень (осідання) ряду фундаментних плит

Ізополя осідань ряду фундаментних плит суттєво відрізняються від окремої плити. Взаємний вплив фундаментних основ приводить до видовження ізоліній осідань вздовж ряду. Максимальні значення осідань спостерігаються для фундаментних плит, що знаходяться всередині ряду (рис. 6, табл. 2). Результати моделювання показують, що максимальний прогин крайньої плити в ряді становить – 61,6 мм, а центральної – 63,4 мм, тоді як крен даних конструкцій становить – 0,031% і 0% відповідно. Зазначимо, що осідання та крени не перевищують гранично допустимих: 150 мм та 0,3% [15].

Результати дослідження окремої фундаментної плити і ряду таких конструкцій, для металевих силосів ( $\frac{\text{максимальні}}{\text{мінімальні}}$  значення).

Параметри	одиночна плита	ряд фундаментів (повне завантаження)		ряд фундаментів (без завант. центрального)	
		крайня плита	центральна плита	крайня плита	центральна плита
осідання, мм	59,3	61,6	63,4	61,6	2,19
крен, %	0	0,031	0	0,030	0
коефіцієнт постелі, $C_1$ кН/м <sup>3</sup>	6340	6290	6080	6300	8510
	3980	3850	3750	3840	8510
коефіцієнт постелі, $C_2$ кН/м	102000	105000	108000	106000	46400
	62800	63300	65600	63200	46400

Аналізуючи епюру осідань (рис. 7), зауважимо, що осідання фундаментної плити залежить від кількості фундаментів в ряді і від їх розташування. Максимальне значення осідання мають фундаменти, що знаходяться в центральній частині ряду, оскільки на них впливають навантаження від інших плит. Оскільки, навантаження симетричне, то крен цих фундаментів рівний нулю. Крайні ж фундаменти зазнають менших осідань, але значення крену для них є найбільшим, оскільки одна частина фундаменту осідає з усім рядом, а інша працює без цього впливу.

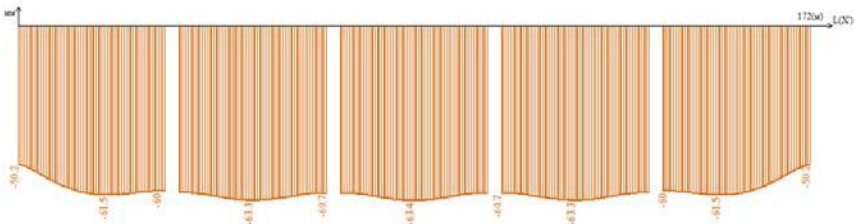


Рис. 7. Епюра осідань плит вздовж поздовжньої осі в ряді фундаментів при завантажених силосах, мм

Варто також зазначити, що розрахунки коефіцієнтів нерівномірності осідання середніх (внутрішніх) плит вздовж поздовжньої осі розташування силосів показують їхнє суттєве зменшення до 1,7 % у порівнянні з

коефіцієнтом нерівномірності осідань окремої фундаментної плити, який становить 6,3 %. Для крайніх фундаментних плит цей коефіцієнт дещо збільшується (до 7,5 %).

При моделюванні ряду металевих силосів з незавантаженим середнім силосом (рис. 8) спостерігається збільшення нерівномірностей осідання фундаментних плит двох інших середніх силосів (подібно до крайніх фундаментів ряду).

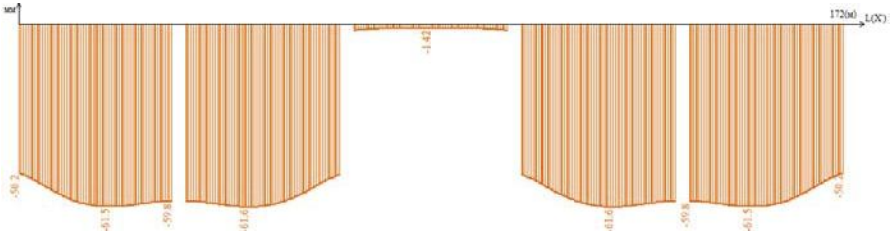


Рис. 8. Епюра осідань плит вздовж поздовжньої осі фундаментів, при незавантаженому центральному силосі, мм

Для центрального фундаменту силосу результати осідань кардинально відрізняються. Значення його максимального прогину вздовж поздовжньої осі (рис. 8) становлять 2,19 мм і вони знаходяться не в центрі плити, а в крайніх точках, а значення прогинів в центрі плити становить 1,42 мм. Тут очевидним є вплив додаткових тисків сусідніх силосів на ґрунти під центральним фундаментом. Зауважимо, що для окремого фундаменту найбільші осідання спостерігаються посередині плити (рис. 5). Крен для центральних фундаментів, включаючи ненавантажений, відсутній.

**Висновки.** Проведено аналіз математичних моделей та методик для розрахунку сумісної роботи системи “споруда-ґрунтова основа” за допомогою програмно-обчислювальних комплексів, зокрема “ЛІРА-САПР”. Зазначено, що обґрунтований вибір моделі та методики дозволяють забезпечити найбільш точне відображення реальних властивостей ґрунтової основи споруди. На основі порівняльного аналізу підтверджено застосування до розрахунку основи з близькими до однорідних ґрунтами, які є досить міцними зі сталою товщиною шарів ґрунту методу пружного (лінійно-деформівного) півпростору з моделюванням піддатливості основи за допомогою коефіцієнтів постелі  $C_1$  та  $C_2$ .

Досліджено особливості осідання та крен плитних фундаментів при сумісній роботі основи та фундаментів металевих силосів при їх однорядному розташуванні за умов повного та часткового завантаження споруд.

1. Менейлюк О. І., Нікіфоров О. Л. Управлінська та організаційно-технологічна багатовимірність умов будівництва та реконструкції елеваторів / Нові технології в будівництві, 2018. — 2017. — № 35. — С. 11-16.

Meneiliuk O. I., Nikiforov O. L. Upravlinska ta orhanizatsiino-tekhnologichna bahatovymirnist umov budivnytstva ta rekonstruktsii elevatoriv / Novi tekhnolohii v budivnytstvi, 2018. — 2017. — № 35. — S. 11-16.

2. Гонтаренко А. Будівельний ринок України в умовах війни: аналітика, оцінки та перспективи / Prof Build, 2023. — т.33 — № 1. — С. 28-32.

Hontarenko A. Budivelnnyi rynek Ukrainy v umovakh viiny: analityka, otsinky ta perspektyvu / Prof Build, 2023. — t.33 — № 1. — S. 28-32.

3. Елеваторна промисловість: традиції та інновації. Вітчизняний та світовий досвід [Електронний ресурс] : наук.-допом. бібліогр. покажч. / [упоряд. Т. П. Фесун] ; Нац. ун-т харч. технол., Наук.-техн. б-ка. — Київ, 2021. — 180 с.

Elevatorna promyslovist: tradytsii ta innovatsii. Vitshyzniani ta svitovyi dosvid [Elektronnyi resurs] : nauk.-dopom. bibliohr. pokazhch. / [uporiad. T. P. Fesun] ; Nats. un-t kharch. tekhnol., Nauk.-tekhn. b-ka. — Kyiv, 2021. — 180 s.

4. Пічугін С.Ф., Шульгін В.В., Оксененко К.О. Експериментальне дослідження напруженодеформованого стану стінки сталевого спіральнотальцевого силосу / Сучасні будівельні конструкції з металу і деревини: Збірник наукових праць. Випуск №27. — Одеса: ОДАБА, 2023 — С. 94-103.

Pichuhin S.F., Shulhin V.V., Oksenenko K.O. Eksperymentalne doslidzhennia napruzhenodeformovanoho stanu stinky stalevoho spiralfaltsevoho sylosu / Suchasni budivelnni konstruktsii z metalu i derevyny: Zbirnyk naukovykh prats. Vypusk №27. — Odesa: ODABA, 2023 — S. 94-103.

5. Махінко Н.О. Методологія розрахунку надійності сталевих емностей для зберігання зерна. — Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.23.01 — Будівельні конструкції, будівлі та споруди. — Одеса, 2020. —44 с. Makhinko N.O. Metodolohiia rozrakhunku nadiinosti stalevykh yemnostei dlia zberihannia zerna. — Avtoreferat dysertatsii na zdobuttia naukovoho stupenia doktora tekhnichnykh nauk za spetsialnistiu 05.23.01 — Budivelnni konstruktsii, budivli ta sporudy. — Odesa, 2020. —44 s.

6. Дворник А. М., Любченко І. Г., Титаренко В. А., Шидловська О. В. Основи та фундаменти циліндричних силосів для зерна. Наука та будівництво, 2019. № 3. С. 12-18.

Dvornyk A. M., Liubchenko I. H., Tytarenko V. A., Shydlovska O. V. Osnovy ta fundamenti tsylindrychnykh sylosiv dlia zerna. Nauka ta budivnytstvo, 2019. № 3. S. 12-18.

7. Зоценко М.Л., Винников Ю.Л., Пічугін С.Ф., Бібік М.В., Марченко В.І., Лاپін М.І. Особливості визначення осідань основ плитних фундаментів зерносховищ силосного типу. Зб. наук. праць: галузеве машинобуд., буд-во. ПНТУ, 2009. Вип. 2 (27). С. 101 — 110.

Zotsenko M.L., Vynnykov Yu.L., Pichuhin S.F., Bibik M.V., Marchenko V.I., Lapin M.I. Osoblyvosti vyznachennia osidan osnov plytnykh fundamentiv zernoskhovyshch sylosnoho typu. Zb. nauk. prats: haluzeve mashynobud., bud-vo. PNTU, 2009. Vyr. 2 (27). S. 101 — 110.

8. Порівняння методів розрахунку плитних фундаментів з урахуванням результатів інженерно-геологічних вишукувань та геодезичних спостережень за процесом просідання / В. А. Пашинський, А. А. Тихий, М. В. Пашинський [та ін.] // Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки : зб. наук. пр. - Кропивницький : ЦНТУ, 2022. - Вип. 5 (36). - Ч. 1. - С. 168-175

9. Бабич С. М. Механіка ґрунтів, основи та фундаменти : підручник / С. М. Бабич, Ю. О. Крус. - Рівне : Вид-во РДТУ, 2001. - 367 с.

Babych Ye. M. Mekhanika hruntiv, osnovy ta fundamenti : pidruchnyk / Ye. M. Babych, Yu. O. Krus. - Rivne : Vyd-vo RDTU, 2001. - 367 s.

10. Інженерна геологія. Механіка ґрунтів, основи і фундаменти: Підручник / М. Л. Зоценко, В. І. Коваленко, А. В. Яковлев, О. О. Петраков, В. Б. Швець, О. В. Школа, С. В. Біда, Ю. Л. Винников. – Полтава: ПНТУ, 2003. – 446 с.: іл.

Inzhenerna heolohiia. Mekhanika gruntiv, osnovy i fundamenti: Pidruchnyk / M. L. Zotsenko, V. I. Kovalenko, A. V. Yakovliev, O. O. Petrakov, V. B. Shvets, O. V. Shkola, S. V. Bida, Yu. L. Vynnykov. – Poltava: PNTU, 2003. – 446 s.: il.

11. Barabash M.S. Grabovskij A.L., Bashynska O.U. Methods of numerical modeling and calculations of building sediments. / Int. J. for Computational civil and Structural Engineering. 2015, N 11(2). – pp. 69-78.

12. Жупаненко І.В. Чисельний аналіз методів розрахунку ґрунтової основи та методів визначення коефіцієнтів постелі. / І.В. Жупаненко // Основи і фундаменти: Міжвідомчий науково-технічний збірник. – К.: КНУБА. – 2020. – Вип. 41. – С. 64-71.

Zhupanenko I.V. Chyselnyi analiz metodiv rozrakhunku gruntovoi osnovy ta metodiv vyznachennia koefitsiientiv posteli. / I.V. Zhupanenko // Osnovy i fundamenti: Mizhvidomchyi naukovo-tekhnichnyi zbirnyk. – K.: KNUBA. – 2020. – Vyr. 41. – S. 64-71.

13. Жупаненко І.В. Чисельне дослідження збіжності методів визначення коефіцієнтів жорсткості при різних інженерно-геологічних умовах основи. Основи і фундаменти. К.: КНУБА. 2021. Вип. 42. С. 46-52.

Zhupanenko I.V. Chyselne doslidzhennia zbizhnosti metodiv vyznachennia koefitsiientiv zhorstkosti pry riznykh inzhenerno-heolohichnykh umovakh osnovy. Osnovy i fundamenti. K.: KNUBA. 2021. Vyr. 42. S. 46-52.

14. Підгурський М. І., Підгурський І. М., Підвисоцький О. І., Биків Д. З. Дослідження впливу конструктивних рішень пальово-плитного фундаменту металевого силосу на особливості деформування фундаментної плити / Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди. – Рівне, 2023. - Вип. 43. - С. 244-254.

Pidhurskyi M. I., Pidhurskyi I. M., Pidvysotskyi O. I., Bykiv D. Z. Doslidzhennia vplyvu konstruktyvnykh rishen palovo-plytneho fundamentu metalevoho sylosu na osoblyvosti deformuvannia fundamentnoi plyty / Resursoekonomni materialy, konstruktssii, budivli ta sporudy. – Rivne, 2023. - Vyr. 43. - S. 244-254.

15. ДБН В.2.6-221:2021 Конструкції силосів сталевих з гофрованою стінкою для зерна. Основні положення – К.: Міністерство України, 2022. 11 с.

DBN V.2.6-221:2021 Konstruktsii sylosiv stalevykh z hofrovanoi stinkoiu dlia zerna. Osnovni polozhennia – K.: Minrehion Ukrainy, 2022. 11 s.