



Doi: <https://doi.org/10.33644/scienceandconstruction.v2i3.111>

УДК 624.15:725.36:631.24



**ДВОРНИК А.М.**  
Зав. лабораторії  
ДП «Державний науково-  
дослідний інститут будівельних  
конструкцій»,  
м. Київ, Україна,  
e-mail: [dvornyka@gmail.com](mailto:dvornyka@gmail.com)  
тел.: +38 (050) 415-36-29  
ORCID: 0000-0003-0266-8429



**ЛЮБЧЕНКО І.Г.**  
Канд. технічних наук, доцент,  
старший науковий співробітник  
ДП «Державний науково-  
дослідний інститут будівельних  
конструкцій»  
e-mail: [ivanndibk@gmail.com](mailto:ivanndibk@gmail.com),  
тел.: +38 (097) 494-13-45  
ORCID: 0000-0002-3329-4725



**ТИТАРЕНКО В.А.**  
Канд. технічних наук, старший  
науковий співробітник, заведу-  
вач відділу ДП «Державний  
науково-дослідний інститут  
будівельних конструкцій»  
e-mail: [0679199507@ukr.net](mailto:0679199507@ukr.net)  
тел.: +38 (067) 919-95-07  
ORCID: 0000-0001-9746-2399



**ШИДЛОВСЬКА О.В.**  
Молодший науковий спів-  
робітник ДП НДІБК  
e-mail: [shidoksana@gmail.com](mailto:shidoksana@gmail.com)  
тел.: +38 (044) 249-37-72  
ORCID: 0000-0002-7126-9133

## ОСНОВИ ТА ФУНДАМЕНТИ ЦИЛІНДРИЧНИХ СИЛОСІВ ДЛЯ ЗЕРНА

### АНОТАЦІЯ

До створення підприємств для зберігання та переробки зерна в Україні із застосуванням тонкостінних металевих силосів, крім вітчизняних, залучені закордонні виробники, розрахункові передумови яких, щодо розроблення конструкції та проектування металевих силосів, не є загально доступними. При експлуатації мають місце не поодинокі значні осідання та крени фундаментів силосів, що не були передбачені проектом. Особливості проектування основ та фундаментів силосів з металевих конструкцій недостатньо відображені в чинних нормативних документах. За розрахунком, методом еквівалентного шару осідання варіантів фундаментів циліндричного силосу СМБУ 220, показано, що при кільцевому фундаменті в не завантаженому зерном силосі підлога корпусу силосу відокремлюється від фундаменту. За аналізом геометричних характеристик показано, що круглий фундамент сприяє зменшенню крену фундаменту та корпусу силосу в 1.3 рази порівняно із кільцевим фундаментом, а в залежності від ґрунтових умов може і більше. Розрахунком осадки фундаменту силосу СМБУ 220 показано, що при наявності в основі суглинків м'якопластичних

необхідні заходи щодо збільшення жорсткості фундаменту та жорсткості ґрунтів з проведенням розрахунків взаємного впливу поряд розташованих силосів та спільної роботи фундаментів і основи. Інженерно-геологічні вишукування мають включати обов'язкові лабораторні випробування модуля деформації ґрунтів, враховуючи циклічне навантаження та динамічний вплив. Фундаменти циліндричних силосів слід проектувати на круглій плиті, з розрахунковим армуванням кільцевої арматури у верхній зоні фундаменту та розраховувати як просторову систему «корпус силосу – фундамент – основа». В проектах силосів мають бути вказані допустимі осідання та крени силосів, а також режим первісного експлуатаційного навантаження і розвантаження силосів.

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** силос, стисливість ґрунтів, осідання, момент опору, крен фундаменту

### BASES AND FOUNDATIONS FOR GRAIN CYLINDRICAL SILOS

**DVORNYK A.M.** Head of Laboratory, SE "State Research Institute of Building Constructions" (SE NDIBK), Kyiv, Ukraine



e-mail: dvornyka@gmail.com  
ORCID: 0000-0003-0266-8429

**LIUBCHENKO I.H.** Candidate of Technical Sciences,  
Assoc.Prof., Senior Research Scientist, SE NDIBK  
e-mail: ivanndibk@gmail.com,  
тел. +38 (097) 494-13-45  
ORCID: 0000-0002-3329-4725

**TYTARENKO V.A.** Candidate of Technical Sciences,  
Senior Research Scientist, Head of Department,  
SE NDIBK  
e-mail: 0679199507@ukr.net  
+38 (067) 919-95-07  
ORCID 0000-0001-9746-2399

**SHYDLOVSKA O.V.** Junior Research Scientist,  
SE NDIBK  
e-mail: shidoksana@gmail.com  
ORCID: 0000-0002-7126-9133

#### ABSTRACT

The creation of grain storage and processing enterprises with thin-walled metal silos in Ukraine, in addition to the domestic manufacturers, involves the foreign ones, whose design preconditions for the metal silos structural engineering and designing are not generally available. During the silos operation, quite often the significant foundations settlements and tilts, which were not foreseen in design documents, occur. The features of the silos bases and foundations designing from metal structures are not sufficiently reflected in the current regulatory documents. Based on the calculations, the method of equivalent settlement layer in the cylindrical silo SMVU 220 foundations versions shows that in the case of a ring foundation, if the silo is not loaded with grain, its body floor disengages from the foundation. The geometric characteristics analysis shows that a circular foundation contributes to the foundation and silo body tilt reduction by 1.3 times compared to the ring foundation, and depending on the soil conditions the reduction can be even more tangible. The SMVU 220 silo foundation settlement calculation shows that, if a soft loam is present in the base, it is necessary to take measures to increase the foundation and soils rigidity with an analysis of the nearby silos mutual influence and the foundations and base joint work. The geological engineering surveys should include the mandatory laboratory tests of a soil deformation module with cyclic loading and dynamic impacts being taken into account. The foundations for cylindrical silos should be designed on a circular plate with the design strengthening of hoop reinforcement in the foundation upper zone and calculated as a "silo body - foundation - base" spatial system. The silo designs shall specify the permissible silo settlements and tilts, as well as the mode of silo initial operational loading and unloading.

**KEY WORDS:** silo, soil compressibility, settlement, moment of resistance, foundation tilt

#### ВСТУП

Попит на металеві силоси для зберігання зерна помітно зростає. Мають місце випадки, коли особливості ґрунтових умов і конструктивні рішення фундаментів призводить до надмірних осідань та кренів корпусів, обмежують умови експлуатації силосів і завдають значних економічних збитків. Тому, актуальним є розроблення практичних рекомендацій щодо проектування основ та фундаментів силосів з металевих конструкцій.

#### АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Науково-технічний супровід зведення металевих силосів для зерна в Україні відсутній. За оцінкою експерта [ 1 ]: «За статистикою до причин аварій відносять 25.1% - невдале проектне рішення, 15.7% - неправильна експлуатація, 4.0% - недоліки норм проектування. На сьогоднішній день достовірна статистика відсутня, оскільки найчастіше аварії замовчуються власниками підприємств, щоб уникнути проблем з представниками дозвільних інстанцій».

Можна зазначити, що вказані причини пов'язані з нормами проектування ДБН В.2.2-8-98 [2], ДСТУ-Н Б EN 1991-4:2012 (EN 1991-4:2006, IDT) [3], в яких відсутні практичні вказівки щодо врахування особливостей інженерно-геологічних умов. В ДБН В.2.1-10-2018 [4] унормовані осідання та крени елеваторів (силосів) тільки із залізобетонних конструкцій, які за роботою відрізняються від силосів із металевих конструкцій за розмірами та жорсткістю стін.

#### ПОСТАНОВКА ЗАВДАННЯ

Метою роботи є порівняльні розрахунки варіантів фундаментів силосу СМВУ 220 та підготовка практичних рекомендацій щодо проектування основ і фундаментів циліндричних силосів для зерна.

#### *Розрахунок осадки фундаментів циліндричного силосу методом еквівалентного шару*

Навантаження для розрахунку осадки фундаментів за другим граничним станом:

- вага зерна, завантаженого силосу СМВУ 220, висотою 20 ярусів – 7600 т,
- власна вага корпусу силосу з обладнанням та галереєю – 100 т,
- фундаменти заглиблені до позначки -2.9 м, додаткове навантаження на основу від фундаменту  $2.9 \times 2.3 = 6.67 \text{ т/м}^2$ ,  
де  $2.3 \text{ т/м}^3$  – усереднена вага ґрунту та фундаменту;



- побутовий тиск на рівні підшви фундаменту  $1.71 \times 2.1 = 3.6 \text{ т/м}^2$ ,  
де  $1.71 \text{ т/м}^3$  – питома вага ґрунту,  $2.1 \text{ м}$  заглиблення фундаменту в ґрунт.

При зведенні циліндричних силосів для зерна можливі два типи фундаментів у вигляді круглої суцільної плити або кільцевого фундаменту.

Площа кругового фундаменту діаметром  $24.6 \text{ м}$  –  $A = 475.3 \text{ м}^2$ .

Площа кільцевого фундаменту з шириною плити  $2.6 \text{ м}$  з підсиленою галереєю  $A = 179.7 + 3 \times 19.4 = 237.9 \text{ м}^2$ .

Тиск на основу від повністю завантаженого силосу для кругового фундаменту,  $P_0 = (7600 + 100) / 475.3 + 6.67 - 3.6 = 19.27 \text{ т/м}^2 = 0.197 \text{ МПа}$ .

Тиск на основу від не завантаженого силосу для кільцевого фундаменту,  $P_0 = 100 / 237.9 + 6.38 - 3.6 = 3.2 \text{ т/м}^2 = 0.032 \text{ МПа}$ .

За методом еквівалентного шару [ 5 ] просторова задача розрахунку осадки може замінитися одномірною, розрахункова схема показана на рис. 1.

Перевагою методу є врахування коефіцієнту поперечного лінійного розширення (коефіцієнт Пуассона –  $\nu$ ), що впливає на потужність товщі, яка стискається. Потужність еквівалентного шару –  $h_e$  в залежності від коефіцієнту Пуассона –  $\nu$ , коефіцієнта форми площі і жорсткості фундаменту –  $\omega$  та його ширини –  $b$  визначається за формулою

$$h_e = A \cdot \omega \cdot b$$

де  $A = (1 - \nu)^2 / (1 - 2\nu)$ .

Осадку однорідної основи –  $S$  визначають за формулою

$$S = P_0 \cdot h_e \cdot m_v$$

де  $m_v$  – коефіцієнт відносної стисливості ґрунту основи.

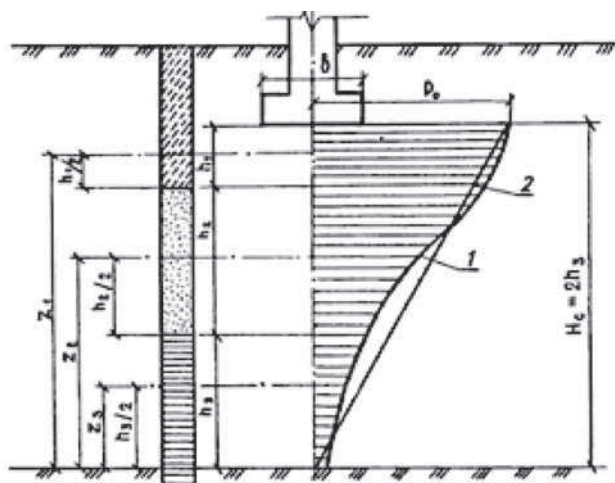


Рис. 1. Розрахункова схема визначення осадки методом еквівалентного шару

Коефіцієнт відносної стисливості ґрунту основи –  $m_v$  має визначатися через випробування в лабораторних умовах показника стисливості зразків ґрунтів, шляхом їх ущільнення під статичним навантаженням без можливості бічного розширення (в жорсткому кільці).

За відсутності таких досліджень скористаємося залежністю між коефіцієнтом відносної стисливості ґрунту –  $m_v$  та модулем загальної деформації ґрунту –  $E_0$ .

$$m_v = \beta_0 / E_0$$

де  $\beta_0 = 1 - 2\nu^2 / (1 - \nu)$ .

Сполучення  $A\omega$  називають коефіцієнтом еквівалентного шару. Значення  $A\omega$  для різних типів ґрунтів і площі завантаження наведені в [ 5 ].

Значення  $A\omega$  для круглого фундаменту приймаються як для квадратного фундаменту, помноженого на  $(\pi/4)^{1/2} = 0.886$ .

Для оцінки осідань та роботи фундаментів скористаємося усередненими показниками найбільш поширених, двох типів ґрунтових умов, що зустрічаються при зведенні силосних споруд для зберігання зерна:

- суглинки тверді і напівтверді або піщані ґрунти з коефіцієнтом Пуассона  $\nu = 0.2$ ,
  - глини і суглинки м'яко-пластичні та значно поширені лесоподібні суглинки, в яких навіть при обводненні у верхніх шарах без зовнішнього навантаження просадка не відбулася, з коефіцієнтом Пуассона  $\nu = 0.4$ .
- Результати розрахунків осідань жорстких фундаментів силосу СМВУ 220 наведені в табл. 1, 2.

Порівняння результатів розрахунків (табл. 1, 2) показує, що в основах, складеними глинами і суглинками м'яко-пластичними з коефіцієнтом Пуассона  $\nu = 0.4$ , межа стисливої товщі складе  $38.87 \text{ м}$ , тобто межа стисливої товщі може збільшитися в  $1.68$  рази, порівняно із ґрунтами з коефіцієнтом Пуассона  $\nu = 0.2$ , із стисливою товщею  $23.12 \text{ м}$ . Виконані розрахунки також показують, що в не завантаженому зерном силосі кільцевий фундамент при осіданні відокремитися від плити підлоги під корпусом силосу, до завантаження силосу зерном майже на  $1 \text{ см}$ .

#### Оцінка роботи різних фундаментів циліндричного силосу для зерна

Крени фундаментів циліндричних силосів можуть бути обумовлені нерівномірним напластунням ґрунтів в основі силосу, а також взаємним впливом поряд розташованих силосів. Для циліндричних силосів застосовуються два типи фундаментів – суцільна плита у вигляді круга та кільцевий фундамент, як круг з круглим отвором. Розглянемо, як впливає форма фундаменту на роботу та на величину можливих деформацій основи



Таблиця 1. Осідання круглого фундаменту діаметром 24.6 м, силосу повністю завантаженого зерном,  $P_0=0.197$  МПа

	$\nu = 0.2$	$\nu = 0.4$
$\beta_0 = 1 - 2\nu^2/(1-\nu)$ ,	0.9	0.467
$E_0$ , МПа	15	8
$m_\nu = \beta_0/E_0$ 1/МПа	0.06	0.0583
$A\omega - [5]$ .	0.94	1.58
$h_c = A\omega b$ , м	$0.94 \cdot 24.6 = 23.12$	$1.58 \cdot 24.6 = 38.87$
$S = P_0 h_c m_\nu$ м	$0.886 \cdot 0.197 \cdot 23.12 \cdot 0.06 = 0.24$ м	$0.886 \cdot 0.197 \cdot 38.87 \cdot 0.0667 = 0.45$ м

Таблиця 2. Осідання кільцевого фундаменту шириною плити 2.6 м, силосу не завантаженого зерном,  $P_0=0.032$  МПа

	$\nu = 0.2$	$\nu = 0.4$
$\beta_0 = 1 - 2\nu^2/(1-\nu)$ ,	0.167	0.133
$E_0$ , МПа	15	8
$m_\nu = \beta_0/E_0$ 1/МПа	0.06	0.0584
$A\omega - [5]$ .	2.26	3.82
$h_c = A\omega b$ , м	$2.26 \cdot 2.6 = 5.88$	$3.82 \cdot 2.6 = 9.93$
$S = P_0 h_c m_\nu$ м	$0.886 \cdot 0.032 \cdot 5.88 \cdot 0.06 = 0.01$ м	$0.886 \cdot 0.032 \cdot 9.93 \cdot 0.0667 = 0.019$ м

в основі розподіляються нерівномірно. Крім вертикального навантаження на основу впливає момент. Для якісної оцінки роботи круглого і кільцевого фундаментів циліндричного силосу порівняємо крени через визначення геометричних характеристик фундаментів та врахування роботи силосів в різних ґрунтових умовах.

Геометричні характеристики кільцевого фундаменту.

Площа фундаменту  
 $A = \pi/4(D^2 - d^2) = \pi/4(24.6^2 - 19.4^2) + 3.0 \cdot 19.4 = 234,0$  м<sup>2</sup>.

Момент опору кільцевого фундаменту буде різним вздовж (ось Y) та впоперек (ось X) підземної підсилосної галереї, розмірами  $b \times h = 3 \times 19.4$  м.

$$I_x = \pi D^4/64(1 - d^4/D^4) + bh^3/12 = 11023.6 + 1825.4 = 12849.0 \text{ м}^4.$$

$$I_y = \pi D^4/64(1 - d^4/D^4) + b^3h/12 = 11023.6 + 43.6 = 11067.2 \text{ м}^4.$$

силосу. Робота кільцевого фундаменту при повному завантаженні, зразу після зведення окремого розташованого силосу, буде мало відрізнятися від роботи круглого фундаменту.

На рис. 2 зображено план кільцевого фундаменту силосу СМВУ 220, діаметр зовнішнього кола фундаменту  $D=24.6$  м, діаметр внутрішнього кола  $d=19.4$  м, ширина плити кільцевого фундаменту 2.6 м.

За розрахунком осідання кільцевого фундаменту, в незавантаженому зерном силосі під власною вагою та вагою корпусу силосу (табл. 2), складе 2 см. Плита підлоги відокремлюється від кільцевого фундаменту, таке спостерігається в процесі експлуатації силосів. При поперемінному завантаженні та розвантаженні поряд розташованих силосів відокремлення плити підлоги від фундаменту збільшується і виникають крени фундаментів і відповідно корпусів силосів. При виникненні крену напруження

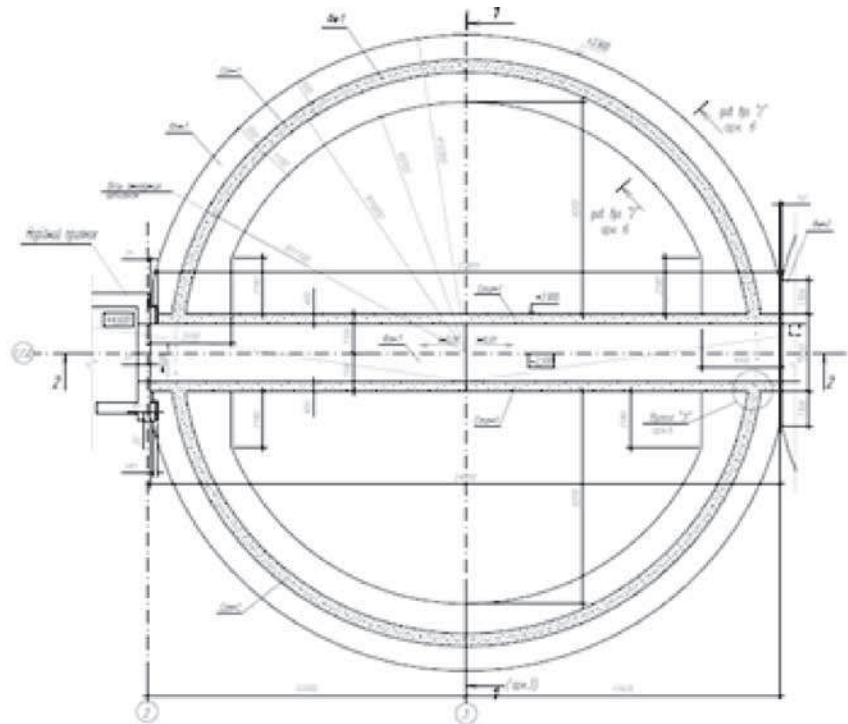


Рис. 2. План кільцевого фундаменту силосу СМВУ 220.



$$W_x = 12849.0/9.7 = 1324.6 \text{ м}^3$$

$$W_y = 11067.2 / 9.4 = 1141 \text{ м}^3.$$

Геометричні характеристики круглого фундаменту:

площа фундаменту

$$A = \pi/4D^2 = \pi/4 \times 24.6^2 = 475.3 \text{ м}^2;$$

момент опору круглого фундаменту

$$W = \pi D^3/32 = \pi \times 24.6^3/32 = 1461.5 \text{ м}^3.$$

Величини напружень від моменту визначаються в зворотній залежності від величини моменту опору. Напруження в основі від моменту в кільцевому фундаменті порівняно з круглим фундаментом будуть помітно збільшуватися в напрямку паралельних рядів силосів  $1461.5/1141 = 1.28$  рази.

При мало стисливих ґрунтах з модулем деформації понад  $150 \text{ кгс/см}^2$  та витриманих по горизонталі напластуваннях ґрунтів взаємний крен близько розташованих силосів буде мало помітний.

В ДСТУ-Н Б EN 1991-4:2012, п. В.2.13 [3] наведено застереження, що навантаження від осідання необхідно враховувати, якщо протягом служби споруди можна очікувати появи нерівномірних осідань.

Практичні вказівки щодо оцінки впливу типу ґрунтів на величину крену корпусів силосів наведені в ДБН В.2.2-8-98, п. 3.34, п. 5.43 [2]. «Для зменшення крену пропонується попереднє рівномірне початкове навантаження тривалістю не менше 2 місяців. Проекти силосів і силосних споруд повинні мати вказівки щодо режиму первісного експлуатаційного навантаження і розвантаження силосів. При визначенні крену фундаментів за умови попереднього обтискання ґрунтів модуль деформації ґрунту  $E'_{mt}$  слід приймати за формулою

$$E'_{mt} = k_e E_{mt}$$

де  $E_{mt}$  - середній модуль деформації ґрунту у межах стиснутої зони;  $k_e$  - підвищення коефіцієнту модуля деформації ґрунту, що приймається рівним: для піщаних ґрунтів – 1.5; для пілувато-глинистих ґрунтів з показником текучості  $I_L \leq 0.25$  – 1.3; для пілувато-глинистих ґрунтів з показником плинності  $0.25 < I_L \leq 0.5$  – 1.2; для ґрунтів інших видів – 1.0».

Це свідчить про те, що за різних ґрунтових умов різниця кренів кільцевого та круглого фундаментів силосів може досягати  $1.28 \cdot 1.5 = 1.92$ , а може і більше.

Коли напластування шарів ґрунтів основи на ділянці споруд силосів відрізняється нерівномірністю, ймовірність крену фундаментів силосів зростає. Для зменшення кренів фундамент циліндричних силосів доцільно проекту-

вати як круглу плиту.

### **Розрахунок осадки фундаменту силосу СМВУ 220 з урахуванням просторової роботи конструкції**

Розглянуто реальне напластування ґрунтів на ділянці споруд силосів, яке переважно складене суглинками та пухкими глинами з модулем деформації  $E = 7 \text{ МПа}$ .

Розрахунки виконані для силосу СМВУ 220 з фундаментом у вигляді круглої плити, діаметром  $D = 24.6 \text{ м}$ , товщиною  $\delta = 0.4 \text{ м}$ .

Розрахунки з оцінки напружено-деформованого стану ґрунтового масиву виконувалися ітераційним способом. Змодельована поведінка ґрунтів при складних траєкторіях навантаження з наступними параметрами: модуль деформації ( $E$ ), коефіцієнт Пуассона ( $\nu_{ur}$ ), питоме зчеплення ( $c$ ), кут тертя ( $\varphi$ ), кут дилатансії ( $\psi$ ), об'ємна вага ґрунту в сухому ( $\gamma_{unsat}$ ) і водонасиченому ( $\gamma_{sat}$ ) станах, коефіцієнти фільтрації  $K_x$  та  $K_y$ .

Ґрунтовий масив моделюється 15-ма вузловими елементами. Граничні умови в нижній частині моделі представлені в вигляді суцільного защемлення, а вертикальні стінки – в вигляді шарнірних опор. На рис. 3 показана розрахункова схема для визначення осідань фундаменту силосу.

Розрахунок осідань виконувався за наступними фазами:

фаза 1 – гравітаційне навантаження масиву ґрунту;

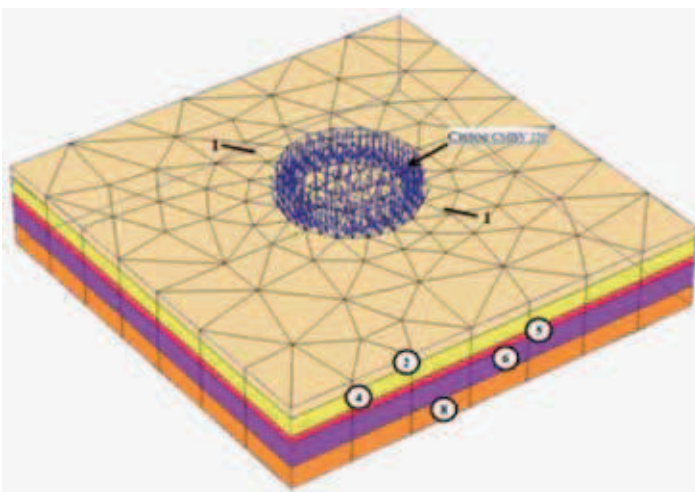
фаза 2 – влаштування фундаментної плити та прикладання навантажень від власної ваги конструкції силосу;

фаза 3 – поступове заповнення силосу зерном на 20 ярусів;

фаза 4 – поступове спустошення силосу від зерна;

фаза 5 – повторне заповнення силосу зерном на 20 ярусів, рис. 4.

За результатами розрахунків осідань фундаменту силосу в реальних ґрунтових умовах, можна



**Рис. 3.** Розрахункова схема для визначення осідань фундаменту



зробити наступні висновки:

- при першому заповненні силосу зерном осідання плити становить  $s=42.5$  см;
- при спустошенні силосу осідання фундаментної плити рівне  $s=30$  см;
- при повторному заповненні силосу зерном на 20 ярусів осідання в центрі фундаментної плити складає  $s=38$  см.

Осідання ґрунту за межами фундаменту, тобто в зоні фундаменту сусіднього силосу досягають 5-6 см. Взаємний вплив фундаментів двох поряд розташованих силосів призведе до збільшення крену фундаментів і корпусів силосів.

При поперемінному повному завантаженні та розвантаженні силосу взаємний вплив та крен фундаментів буде зростати.

Деформації основи силосів складаються з непружних (невідновлюваних) осідань, пружних (повністю відновлюваних) осідань та консолідаційних осідань, спричинених коливаннями рівня ґрунтових вод. Для розрахунку осідань можна використовувати результати моніторингу деформацій споруди в процесі завантаження-розвантаження або результати лабораторних досліджень ґрунтів модуля циклічного стиску та пружності ґрунту.

Порівняння результатів розрахунків осідань фундаментів силосів, виконаних з урахуванням просторової роботи конструкцій та методу еквівалентного шару, дозволяє зробити наступні висновки.

За методом еквівалентного шару розраховується осідання жорсткого фундаменту як штампа, за просторовим розрахунком враховується спільна робота фундаменту та масиву ґрунтів в основі силосу. Для зменшення величини осідань необхідно збільшувати жорсткість фундаменту.

В ґрунтових умовах, із наявністю в основі суглинків м'якопластичних насичених водою, можна очікувати осідання фундаментів понад 30 см та появи значних, непрогнозованих кренів корпусів силосу. В таких ґрунтових умовах необхідні заходи щодо збільшення жорсткості масиву ґрунтів в основі силосу з розрахунком спільної роботи фундаменту та основи силосу.

Особливості конструкції фундаменту циліндричних силосів

Загальний вигляд кільцевого фундаменту силосу СМВУ 220, подібно до якого зводяться фундаменти циліндричних силосів, наведено на рис. 2. Поперечний переріз такого кільцевого фундаменту наведено на рис. 5.

У верхній зоні такий фундамент армується трьома сітками із стержнів поз. 16 –  $\text{Ø}10\text{A}500\text{C}$ , кільцева арматура поз. 14 –  $\text{Ø}12\text{A}500\text{C}$ . Таке армування призводить до того, що при завантаженні силосу зерном розпірні зусилля не сприймаються кільцевою арматурою, анкери через розпірні зусилля розривають фундамент, рис. 6.

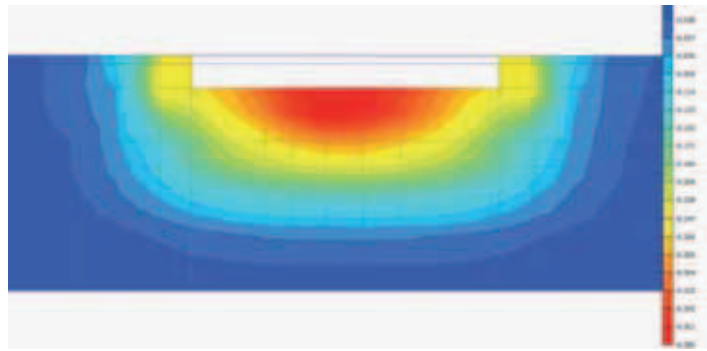


Рис. 4. Розріз 1-1, ізополя вертикальних переміщень (м) під фундаментною плитою, повторне заповнення силосу зерном – фаза

Корпус силосу підтримується ребрами жорсткості, розпірні зусилля через ребра жорсткості передаються на фундамент. Після руйнування фундаменту розпірні зусилля сприймаються нижнім ярусом кільцевих панелей корпусу силосу.

Розпірні зусилля, які передаються на верхній обріз фундаменту силосу через ребра жорсткості мають бути сприйняті анкерними болтами, що працюють на зріз. Взаємодія корпусу силосу і фундаменту складає статично не визначену задачу. Має розраховуватися спільна робота корпусу і фундаменту силосу. Однозначно, що у верхній частині фундамент силосу слід армувати як залізобетонний пояс із перепуском або зварюванням кільцевих стрижнів на сприйняття розрахункового розтягувального зусилля.

Закріплення ребер жорсткості в фундаменті впливає на оболонку корпусу силосу, створюється так званий «крайовий ефект». Нижня кільцева панель буде навантажена меншим розтягуваль-

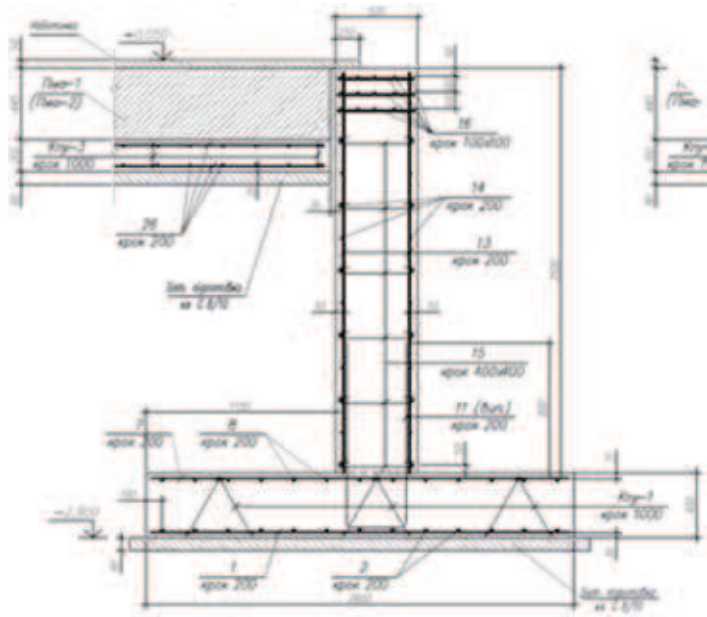
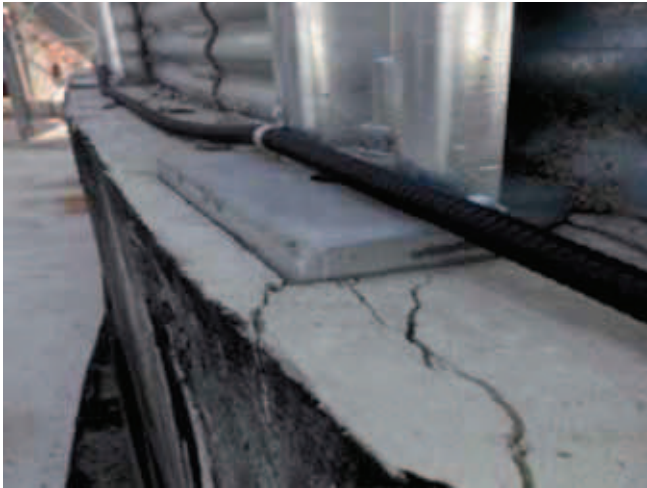


Рис. 5. Поперечний переріз кільцевого фундаменту

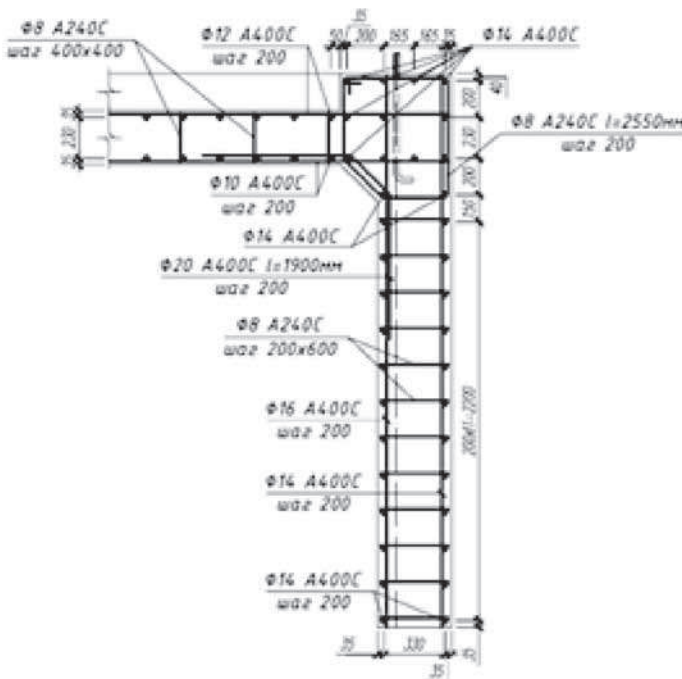


**Рис. 6.** Розрив стінки фундаменту при недостатньому армуванні

ним зусиллям, ніж наступна.

Окремі конструктори враховують розпірні зусилля і застосовують фундаменти із силовою плитою підлоги, що сприймає розпірні зусилля. Поперечний переріз фундаменту із зоною армування на розпірні зусилля показано на рис. 7.

Конструкція фундаменту силосу, що зображена на рис. 7 має недоліки. Такий фундамент не передбачає влаштування вентиляційних каналів для нагнітання повітря та для охолодження зерна. Позитивне збільшення жорсткості фундаменту, з наближенням до жорсткого штампа, відбудеться при застосуванні круглого фундаменту з плитою, розташованою в рівні нижньої плити транспортної галереї.



**Рис. 6.** Поперечний переріз фундаменту з силовою плитою підлоги, армованої на розпірні зусилля

## ВИСНОВКИ

1. Новизна результатів роботи – оцінка залежності величини кренів фундаментів від ґрунтових умов та різних типів фундаментів циліндричних силосів.

2. Інженерно-геологічні вишукування мають включати обов'язкові лабораторні випробування модуля деформації ґрунтів, враховуючи циклічне навантаження та динамічний вплив.

3. В ґрунтових умовах, із наявністю в основі суглинків м'якопластичних насичених водою, необхідні заходи щодо збільшення жорсткості масиву ґрунтів основи з проведенням розрахунків взаємного впливу поряд розташованих силосів та спільної роботи фундаментів і основи.

4. Для зменшення кренів фундаменти циліндричних силосів слід проектувати на круглій плиті з розрахунковим армуванням кільцевої арматури у верхній зоні фундаменту.

5. Фундаменти слід розраховувати як просторову систему «корпус силосу – фундамент – основа».

## БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Бутенко А. Уроки аварій сталевих силосів. Elevatorist веб-сайт. URL: <https://elevatorist.com/blog/read/323-uroki-avariy-stalnyih-silosov> (дата звернення: 17.07.2017).
2. ДБН В.2.2-8-98 Підприємства, будівлі і споруди по зберіганню та переробці зерна.
3. ДСТУ-Н Б EN 1991-4:2012 Єврокод 1. Дії на конструкції. Частина 4. Бункери і резервуари (EN 1991-4:2006, IDT)
4. ДБН В.2.1-10-2018 Основи і фундаменти будівель та споруд.
5. Цытович Н.А. Расчет осадки методом эквивалентного слоя. веб-сайт drillings.su. URL: <http://drillings.su/ekvsloi.html> (дата звернення: 21.10.2013).

## REFERENCES

1. Butenko, A. Steel silos failures lessons. Retrieved from <https://elevatorist.com/blog/read/323-uroki-avariy-stalnyih-silosov> [in Russian].
2. Enterprises, buildings and structures for the storage and processing of grain. (1998). ДБН В.2.2-8-98 from 01<sup>st</sup> July 1998. Kyiv: Derzhbud Ukrainy [in Ukrainian].
3. Eurocode 1: Actions on structures. Part 4: Silos and tanks (2013). DSTU-N B EN 1991-4:2012 from 01<sup>st</sup> July 2013 (EN 1991-4:2006, IDT). Kyiv: SE "Ukrarkhbudinform" [in Ukrainian].
4. Bases and foundations of buildings and structures. Main principles. (2018). DBN V.2.1-10-2018 from 01<sup>st</sup> January 2019. Kyiv: SE "Ukrarkhbudinform" [in Ukrainian].
5. Tsytovich, N.A. The equivalent layer method for the settlement calculation. Retrieved from <http://drillings.su/ekvsloi.html> [in Russian].

Стаття надійшла до редакції 10.09.2019 року