

Особливості роботи силосів за складних геотехнічних умов

Юрій ВИННИКОВ¹, Максим ХАРЧЕНКО², Олексій КІЧАСОВ³, Валентин МАРЧЕНКО⁴

^{1, 2, 3} Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»

24, просп. Першотравневий, м. Полтава, Україна, 36011

⁴ ТОВ «Науково-технічне підприємство «АЛЬМАГРУП»

122, вул. Небесної Сотні, м. Полтава, Україна, 36000

¹ vynnykov@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0003-2164-9936>

² kharchenkomo@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0002-1621-2601>

³ oleksiikichasov@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0009-6719-7892>

⁴ design@almagroup.com.ua, <https://orcid.org/0009-0006-9614-1765>

DOI: 10.32347/0475-1132.50.2025.32-44

Анотація. Доведено, що робота металевих силосів з гофрованою стінкою для зберігання зерна за складних геотехнічних умов суттєво залежить від діаметру силосу та співвідношення його діаметру до висоти. Основним фактором є тиск від зерна на днище, який зі збільшенням діаметру силосу теж зростає. Тому авторами запропоновано поділити всі силоси заводського виготовлення на 3 групи: 1) малого діаметру $d = 11 \dots 16$ м з висотою $h = 11 \dots 18,7$ м (при співвідношенні $h/d = 0,75 \dots 1,6$), для яких тиск на днище від зерна коливається в межах $80 \dots 120$ кПа; 2) середнього діаметру від 16 до 22 м з висотою $14,3 \dots 24,2$ м (співвідношення $h/d = 0,65 \dots 1,5$), для яких тиск на днище від зерна – $120 \dots 160$ кПа; 3) великого діаметру від 22 до 28 м з висотою $18,7 \dots 24,2$ м (співвідношення $h/d = 0,67 \dots 1,1$), для яких тиск на днище від зерна – $160 \dots 200$ кПа. Обґрунтовано, що кожна група силосів у відповідності до наведеного критерію має свою особливість роботи у складних геотехнічних умовах. Зокрема, для силосів першої групи на слабких і просадочних основах можливо використовувати фундаменти на природній основі, а також на ґрунтових подушках.

Встановлено, що для силосів другої групи доцільно армувати слабкі та просадочні ґрунти чи прорізати їх пальовими фундаментами, особливо для основи днища, або застосовувати коректно обґрунтовані розрахункові моделі спільної роботи складових частин системи «просадочна (слабка) ґрунтова основа – кільцевий фундамент – підсилосна галерея – ущільнена основа – плита днища» (ОФС).



Юрій ВИННИКОВ

Завідувач кафедри буріння та геології, д.т.н., проф.



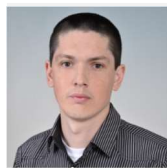
Максим ХАРЧЕНКО

Доцент кафедри буріння та геології, к.т.н., доцент



Олексій КІЧАСОВ

аспірант



Валентин МАРЧЕНКО

Провідний інженер, к.т.н.

Для силосів третьої групи за умови їх будівництва в складних геотехнічних умовах рекомендовано зводити фундаментну плиту (при її спиранні на пальову або армовану основу), яка стане спільним фундаментом під стінки, днище й підсилосну галерею.

Результати обстежень і числового моделювання підтверджують, що друга група силосів є найбільш схильною до експлуатаційних ускладнень, особливо за умов недотримання геотехнічного контролю при ущільненні зворотної засипки під днищем.

Запропоновано комплекс рекомендацій, що враховують вплив співвідношення h/d , рівень навантажень та тип ґрунтової основи при виборі типу фундаментів, що підвищує надійність і довговічність конструкцій.

Ключові слова. Металевий силос з гофрованою стінкою, слабка і просадочна ґрунтова основа, напружено-деформований стан, кільцевий фундамент, фундаментна плита днища з підземною галереєю, діаметр і висота силосу, навантаження на плиту днища.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Останнім часом для зберігання зерна найбільш широко використовують металеві силоси з гофрованою стінкою заводського виробництва. Даний тип силосів має ряд переваг, зокрема зменшення товщини металу стінки, краща стійкість елементів оболонки, зниження вартості та спрощення монтажу. Основною специфікою такої конструкції силосів є зовсім інше значення коефіцієнтів торта об стінки гофрованого профілю, що в 1,5-2 рази більші, ніж за гладкою поверхнею. Це спричиняє зміну в розподілі навантажень на стінку та днище.

Неврахування перелічених особливостей призводить до ситуацій, коли відбувається зниження експлуатаційних характеристик силосу, зокрема, споруда зазнає наднормативного крену, нерівномірних осідань за периметром кільцевого фундаменту під стінкою силосу, нерівномірних осідань між його окремими частинами (кільцевим фундаментом, підсилосною галереєю та днищем), що супроводжується утворенням тріщин у залізобетонних конструкціях, перекосом металевих елементів надсилосних галерей, виходом з ладу технологічного обладнання, зміною напружено-деформованого стану (НДС) всіх елементів силосу та відповідно зниженням загального терміну нормальної експлуатації. Особливо подібні наслідки характерні для експлуатації силосів за складних геотехнічних умов, зокрема за наявності просадочних і слабких масивів.

Згідно з аналізом літературних джерел (Coduto et al., 2015) і норм інших країн (АСІ 313-16:2016, 2016) не виявлено чітких реко-

ментацій щодо вибору конструктивних систем фундаментів силосів для зерна. З досвіду власних досліджень роботи силосів у складних геотехнічних умовах можливо зробити певне узагальнення, що суттєвим чинником є вибір конструкції елементів системи ОФС. На нашу думку, на вибір коректного (надійного) рішення найбільше впливає співвідношення h/d , де h – висота циліндричної частини силосу, а d – діаметр силосу. Тому в межах цієї статті буде обґрунтовано роботу силосів з гофрованою стінкою заводського виготовлення для зберігання зерна в складних геотехнічних умовах (слабкі та просадочні ґрунтові масиви) та запропоновано раціональні конструктивні рішення основ і фундаментів і моделі їх розрахунку залежно від співвідношення h/d .

АНАЛІЗ ПОПЕРЕДНІХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Серед основних напрямів досліджень, присвячених функціонуванню металевих силосів, важливе місце займають вивчення розподілу тиску на їх стінки та днище (Махінко & Махінко, 2021). Результати натурних геодезичних вимірювань засвідчили суттєву нелінійність у розподілі навантажень між стінками й днищем у процесі завантаження силосів (Fank et al., 2018), що має відображення і в нормативних документах деяких країн (AS 3774, 1996).

Надійна експлуатація силосів залежить від стану основи їх фундаментів, особливо за наявності просадочних властивостей у ґрунтів. Досвід показує, що зведення споруд на просадочних або слабких ґрунтах не рідко супроводжується наднормативними і подеколи нерівномірними деформаціями (осіданнями, кренами) різних частин споруд, що може призводити до ускладнень при їх експлуатації та навіть аварій (Laier et al., 2008).

Для зниження величин деформацій основ застосовують ефективні конструктивні рішення фундаментів, зокрема пальові та корбчасті (Мозговий & Бутенко, 2022; Bernardes et al., 2021; Дворник та ін., 2019; Носенко & Кашоїда, 2021; Підлуцький &

Литвин, 2020). Широко апробовано й підсилення основ силосів вертикальними ґрунтоцементними елементами (ГЦЕ), які підвищують жорсткість основи і зменшують нерівномірність деформацій (Butenko et al., 2024; Dhaybi et al., 2012). Водночас стохастичний характер ґрунтових параметрів потребує застосування імовірнісного підходу до оцінювання ефективності цих рішень (Винников та ін., 2012; Ching, 2022).

Окрему увагу приділяють дослідженню взаємного впливу споруд у багатосилосних системах. Показано, що осідання окремого силоса залежить від стану заповнення суміжних споруд і наявності жорстких включень в основі, бо ці фактори перерозподіляють напруження (Rebolledo et al., 2022).

Загалом, результати попередніх досліджень підкреслюють необхідність комплексного підходу до аналізу роботи системи ОФС з урахуванням просторового характеру навантажень, складних геотехнічних умов, підсилення основи та взаємного впливу споруд, тощо.

МЕТА РОБОТИ

Тому за мету роботи прийнято обґрунтувати роботу силосів з гофрованою стінкою заводського виробництва для зберігання зерна в умовах слабкої та просадочної ґрунтової основи залежно від співвідношення висоти силосу до його діаметру.

Для досягнення мети вирішувалися такі задачі:

- аналіз основних типорозмірів металевих силосів із гофрованою стінкою заводського виготовлення;
- аналіз методик визначення навантажень на стінки силосу та на його днище від зерна залежно від типорозмірів металевих силосів із гофрованою стінкою;
- визначення факторів впливу на роботу основ і фундаментів силосів у складних геотехнічних умовах;
- узагальнення результатів розрахунків й обстеження технічного стану силосів з різними типорозмірами в складних геотехнічних умовах;

– підбір раціональних конструкцій фундаментів залежно від типорозмірів силосів для їх безпечної експлуатації у складних геотехнічних умовах;

– більш детальний аналіз роботи силосів, для яких виявлено найбільший відсоток ускладнень при експлуатації в складних геотехнічних умовах, а саме для другої групи (з тиском від зерна на днище $120 \leq p_{vsq} < 160$ кПа).

ОСНОВНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ

Коректне урахування фактичних навантажень від зерна на стінки силосу та на його днище – це один із найбільш важливих чинників для прийняття вірного рішення за конструктивною схемою залізобетонної частини даної споруди. Просторова схема різних елементів залізобетонної частини споруди, в т. ч. системи її фундаментів, наведено на Рис. 1.

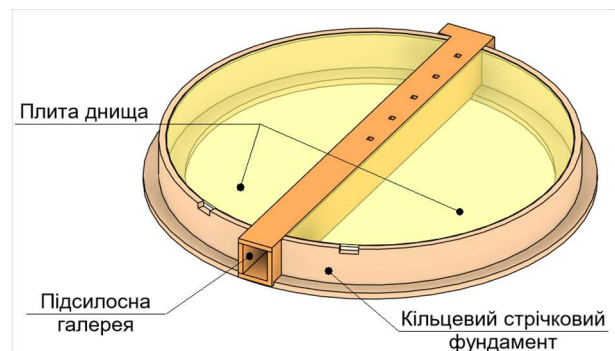


Рис. 1. Принципова конструкція фундаментів силосу, що розглядається

Fig. 1. Basic design of the silo foundations in question

Класичною схемою є така система, коли під стінки силосу роблять кільцевий фундамент, а під днище – окремо фундаментну плиту, яку з'єднують з підсилосною галереєю. Таким чином, конструкція та габарити кільцевого фундаменту залежать від навантажень на стінки силосу й ґрунтів його основи. Конструкцію днища та підсилосної галереї, зазвичай, приймають незалежно від навантажень на неї та геотехнічних умов, ураховують при цьому лише технологічні рішення (конструкцію системи аерації підлоги, центральне вивантаження продукції,

розміщення транспортерів і т. ін.). При цьому основою днища, зазвичай, служить ущільнена піщана подушка. Крім того, інколи передбачають деформаційний шов між стінкою кільцевого фундаменту та плитою днища, в деяких випадках цей стик роблять жорстким, є пропозиції (Butenko та ін., 2024) щодо шарнірного виконання такого вузла. Звісно, що ці рішення суттєво залежать від фактичних і розрахункових навантажень та впливів на ці конструктивні елементи. З досвіду авторів саме вплив роботи плити днища не враховується в більшості випадків, що призводить до суттєвого ускладнення експлуатації силосів, а інколи навіть до аварійних ситуацій.

Підхід у визначенні навантажень у ДБН В.2.2-8-98 (нині не діючий, але його ще використовували при проектуванні значної частини споруд, які наразі в експлуатації) та ДСТУ-Н Б EN 1991-4:2012 суттєво відрізняється як за філософією розрахунку, так і за деталізацією вихідних даних. Зокрема, ДБН В.2.2-8-98 базується на спрощених нормативних навантаженнях без урахування специфіки роботи сучасних тонкостінних металевих силосів, у т. ч. не враховує вплив стану та форми поверхні стінок. Сума загальних навантажень на днище й стінки силосу в будь-який момент часу залишається рівною вазі зерна. Проміжні стани (завантаження та розвантаження) не враховуються.

Натомість ДСТУ-Н Б EN 1991-4:2012 передбачає більш деталізований підхід, що враховує сценарії завантаження, фізико-механічні властивості сипкого матеріалу та геометричні особливості конструкції силосу (у т. ч. стан поверхні металевих стінок). Зокрема, введено категорії шорсткості поверхні (від D1 до D4), де категорія D4 відповідає гофрованим стінкам, що має суттєвий вплив на величину горизонтального тиску з боку зернової маси.

Також при зборі навантажень враховується мінливість фізико-механічних параметрів продукції (його кут внутрішнього тертя, кут природного укусу, вага, тощо). Коefіцієнти тертя об стіни також отримують свої мінімальні та максимальні значення. При цьому сумарна величина навантаження

на стінку й днище завжди буде вище, ніж загальна вага продукції.

Такий підхід враховує різноманітні ситуації, які виникають на різних стадіях завантаження та розвантаження силосу, непрямыми методами враховуючи зміну розподілу навантажень між днищем і стінкою для сипучих матеріалів, які ще завантажуються та, які ущільнились під власною вагою після досягнення необхідних значень тиску.

Такий підхід дозволяє отримати більш реалістичні розрахункові навантаження на різні елементи сучасних силосів.

Авторами проведено аналіз основних типорозмірів металевих силосів із гофрованою стінкою заводського виробництва. Для аналізу взято типорозміри силосів на базі каталогу одного із підприємств-виробників (KMZ Industries, б. д., 2025).

При цьому розглянуто лише випадок, коли вивантаження зерна відбувається центрально через підсилосну галерею, а відношення висоти до діаметру силосу знаходиться в межах $0,65 < h/d < 1,6$, де h – висота циліндричної частини силосу, а d – діаметр силосу.

Співвідношення h/d має суттєвий вплив на перерозподіл навантажень від зерна на стінки та на днище для металевих силосів із гофрованою стінкою.

Для всіх типорозмірів силосів із гофрованою стінкою заводського виготовлення було визначено величину рівномірно розподіленого навантаження на днище при повному завантаженні силосу. Прийняті в розрахунку геометричні позначення та схему прикладання навантажень на верхньому обрізі фундаменту силоса показано на Рис. 2.

Збір навантажень виконано для пшениці за типовими характеристиками, які наведено у Додатку Е табл. Е1 ДСТУ-Н Б EN 1991-4:2012.

Зокрема, вертикальний тиск на плоскі днища визначено згідно з вказівками п. 6.2.2 за формулою

$$p_{vsq} = p_{vb} + \Delta p_{sq} \left(\frac{2,0 - h_c/d_c}{2,0 - h_{tr}/d_c} \right), \quad (1)$$

де Δp_{sq} – різниця між вертикальними тисками, визначеними за двома методами, для бункера малої гнучкості;

p_{vb} – вертикальний тиск на рівні основи бункера малої гнучкості;

h_{tr} – загальна висота насипного конуса на поверхні сипкого матеріалу;

h_c – висота вертикального ствола бункера від перехідного вузла до еквівалентної поверхні сипкого матеріалу

d_c – характеристичний розмір внутрішнього поперечного перерізу бункера.

Результати розрахунку навантажень на днище на етапі повного завантаження для всіх типорозмірів розглянутих силосів заводського виготовлення наведено в Табл. 1. Пропонується згрупувати силоси залежно від рівня навантажень на днище (Табл. 1). Зокрема, передбачено три групи, котрі виділено в Табл. 1 кольоровою індикацією.

Кожна з виділених груп має свої характерні особливості взаємодії в межах системи

ОФС, що необхідно враховувати шляхом адаптації конструкції фундаменту відповідним чином.

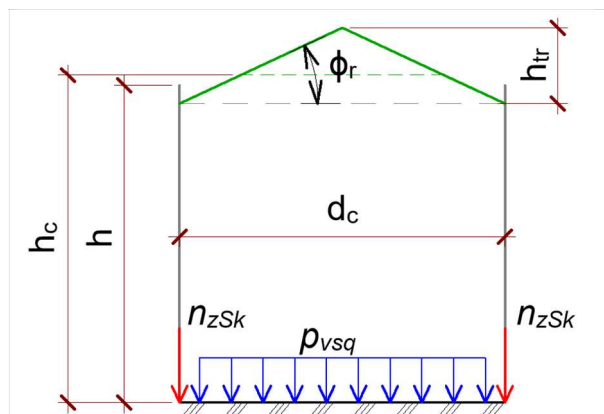


Рис.2. Геометричні параметри силосу та навантаження, що діють на рівні верхнього обрізу фундаменту силоса

Fig. 2. Geometric parameters of the silo and the load acting at the level of the top of the silo foundation

Табл. 1. Значення розподіленого навантаження на днище силосу p_{vsq} залежно від його розмірів на етапі його повного завантаження

Table 1. The value of the distributed load p_{vsq} on the silo bottom depending on its size at the stage of its full loading

d, m h, m	11,0	14,7	16,0 (16,5)	18,0 (18,3)	20,0	22,0	28,0 (27,5)
11,0	82	101					
12,1	84	103	110				
13,2	86	106	113				
14,3	87	109	116	126	135	144	
15,4	89	111	118	128	138	148	
16,5	91	113	120	131	141	151	
17,6	92	115	122	133	144	154	
18,7		117	124	136	146	157	185
19,8			126	138	149	159	189
20,9			128	140	151	162	192
22,0			129	142	153	164	195
23,1			131	143	155	166	198
24,2			132	145	157	168	200
d – діаметр силоса, м; h – висота циліндричної частини силоса, м							
Групи силосів за рівнем навантаження на плиту днища p_{vsq} , кПа:							
Група 1 – $p_{vsq} < 120$ кПа; Група 2 – $120 \leq p_{vsq} < 160$ кПа; Група 3 – $p_{vsq} > 160$ кПа;							
Типорозміри силосів, що не відповідають умові $0,8 < h/d < 1,5$							

Так базовою умовою для всіх трьох груп є досягнення близькості в значеннях деформацій окремих частин ОФС (кільцевого стрічкового фундаменту, підсилосної галереї та плити днища). Додатковою умовою є необхідність коректного урахування деформативності зворотної засипки під плиту днища, оскільки для всіх типів розглянутих силосів днище працює за ґрунтом.

Дуже часто при укладанні зворотної засипки (піщаної подушки) з пошаровим ущільненням допускають суттєві відхилення (похибки щодо гранулометричного складу матеріалу, відсутність контролю якості ущільнення і т. ін.) і як наслідок вже при першому завантаженні силосу плита днища отримує нерівномірні деформації та наднормативні прогини.

Це, у свою чергу, викликає значний перерозподіл навантажень між днищем і стінками силосу, а також до суттєвого перевантаження основи кільцевого фундаменту та підсилосної галереї.

Для першої групи силосів навантаження на днище не перевищує 120 кПа. Це характерно для відносно невеликих силосів діаметром 11...16 м з висотою 11,0...18,7 м, тобто співвідношення $h/d = 0,75...1,6$.

У таких силосах розміри поперечного перерізу підсилосної галереї та кільцевого фундаменту більшою мірою задаються конструктивними й технологічними вимогами та є значними порівняно з розмірами самої споруди.

Зокрема, товщина плити днища, як правило, складає 150...400 мм і збільшується разом з діаметром силосу. Для забезпечення менших прогинів і згинальних моментів у плиті днища для силосів цього типу доцільним виконувати обпирання днища за контуром на кільцевий стрічковий фундамент.

При цьому перевагу необхідно надавати саме шарнірному з'єднанню (Butenko et al., 2024).

За таким рішенням додатково довантажено основу кільцевого фундаменту й вирізняно осідання (у т. ч. прогини) краю плити днища та кільцевого фундаменту.

При врахуванні значної згинальної жорсткості плити днища (прольот невеликий, бо одна частина буде спиратися на галерею, а інша на стінку кільцевого фундаменту; діаметри силосів незначні) зворотна засипка під нею не буде мати дуже суттєвого фактору впливу.

Тому майже все навантаження від зерна буде передаватися на основу кільцевого фундаменту й плиту підсилосної галереї та лише частково на зворотну засипку під днищем.

Для силосів першої групи, які характеризуються порівняно невеликими діаметрами і низьким рівнем навантаження на днище (до 120 кПа), за умов слабких чи просадочних ґрунтів (коли фундаменти на природній основі не відповідають умовам розрахунку) пальові фундаменти, зазвичай, економічно недоцільні.

Тому рекомендується підсилення природних основ, наприклад армуванням ґрунту (Винников та ін., 2012) чи влаштуванням піщаної подушки.

На Рис. 3 наведено приклад улаштування фундаментів силосів для першої групи. Зокрема, три силоси з розмірами $d = 11,0$ м і $h = 11,0$ м розташовано в смт. Дружба Тернопільської обл.

Основа фундаментів складена слабкими сильносилими ґрунтами товщиною до 9 м (модуль деформації $E = 6$ МПа), а тому під стрічковим фундаментом шириною 1,8 м влаштовано піщану подушку потужністю 1,4 м.

У цьому випадку примикання плити днища товщиною 200 мм до кільцевого фундаменту передбачено через деформаційний шов, а в якості основи влаштовано зворотну засипку з пошаровим ущільненням.

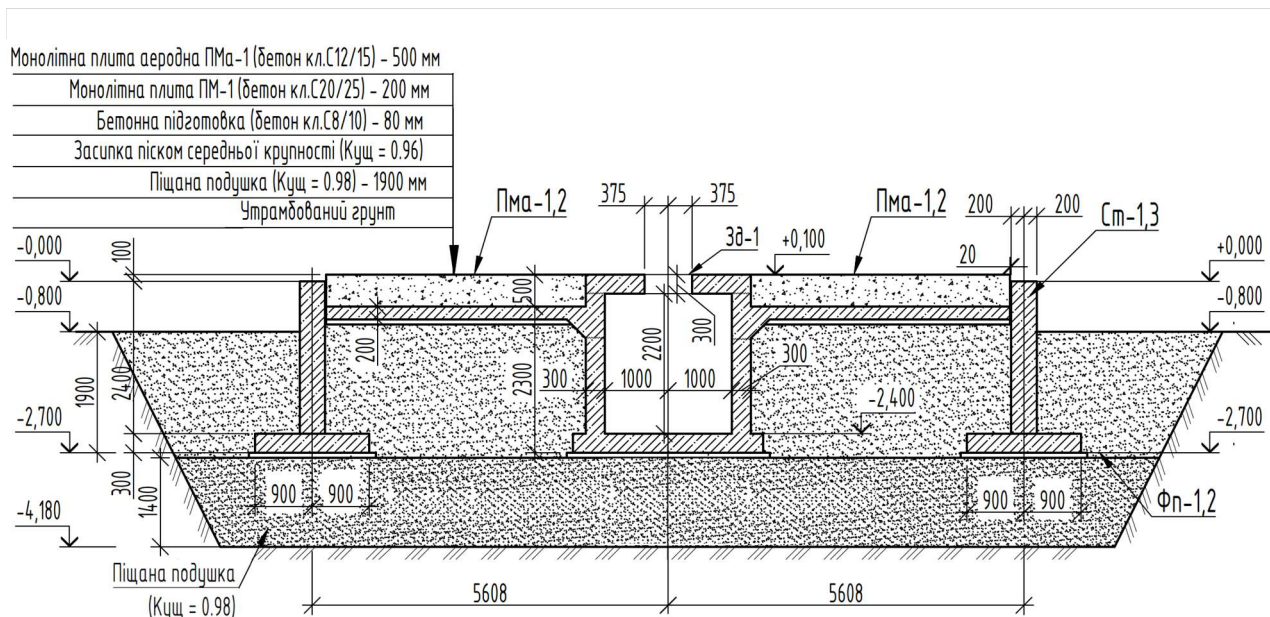


Рис.3. Конструкція системи ОФС для силосу діаметром 11,0 м (комплекс приймання зерна в смт. Дружба Тернопільської обл.)

Fig.3. Silo with a diameter of 11.0 m (Grain receiving complex, Ternopil region, Druzhba village)

При обстеженні даних споруд (загальний вигляд споруд наведено на Рис. 4) не виявлено значних кренів, нерівномірних деформацій і пошкоджень залізобетонних елементів їх фундаментів. Хоча споруди поряд (норійна вежа, зерносушарка) зазнали наднормативних кренів. Аналогічні дані виявлено і для інших споруд цього типу.



Рис.4. Загальний вид силосів у смт. Дружба Тернопільської обл.

Fig. 4. General view of silos in Druzhba village, Ternopil region.

Група 3 містить силоси, навантаження на днище у яких перевищує 160 кПа. Це характерно для великих силосів діаметром

22,0...28,0 м з висотою 18,7...24,2 м (співвідношення $h/d = 0,67...1,1$).

Великі розміри фундаменту в діаметрі, у т. ч. за периметром, вимагають значної уваги до рівномірності деформацій основ різних точок кільцевого фундаменту, на які спираються вертикальні стійки металевих силосів. Характерною особливістю силосів цього типу є великі діаметри плити днища й великі навантаження від зерна на неї. При цьому товщину плити днища збільшувати не раціонально. Спирати плиту днища на стінку кільцевого фундаменту категорично не рекомендується, оскільки через її дуже малу згинальну жорсткість будуть виникати локальні руйнування. Тому плита днища під навантаженням має суттєві прогини, особливо в зоні стику зі стінкою кільцевого фундаменту.

Збільшення ширини плити підземної галереї також є нераціональним і тому днище дуже часто має суттєві осідання як в центрі, так і на периферії порівняно з іншими елементами системи ОФС.

У разі некісного ущільнення зворотної засипки під днище всі вище перелічені проблеми суттєво прогресують. Особливо кри-

тичним є фактор перерозподілу навантаження зі стінок на перекошене днище та його подальше руйнування.

Тому для цієї групи силосів найбільш відповідальним є якість ущільнення засипки під днище. Більшість силосів цієї групи зазнають суттєвих ускладнень і навіть аварійних ситуацій при прийнятті в якості фундаментів окремо кільцевої стрічки та підсилоної галереї на природній основі й ущільненої подушки під плиту днища.

Оптимальним варіантом фундаментів для таких силосів є влаштування плитного фундаменту. Тоді всі навантаження від плити днища через ущільнену подушку передаються на спільну фундаменту плиту, на яку спираються кільцевий фундамент стінок силосу та підсилосна галерея. Таким чином, забезпечується рівномірність осідань всіх елементів системи ОФС.

За наявності слабких або просадочних ґрунтів необхідно під фундаментною плитою передбачати їх прорізання пальовими фундаментами чи влаштовувати підсилення основи з високим відсотком армування. Інші варіанти можуть призводити до швидкої втрати експлуатаційної придатності силосів.

В силу того, що силоси даної групи мають значну місткість і відповідно вартість, то до їх спорудження на всіх етапах підходять відповідально. З практики обстеження таких споруд у складних геотехнічних умовах авторами статті в більшості випадків було виявлено їх пальові фундаменти і відсутність суттєвих проблем при експлуатації цих споруд, які могли бути викликані нерівномірними деформаціями різних елементів системи ОФС.

Для групи 2 навантаження на днище – в межах 120...160 кПа. Це характерно для силосів середнього розміру діаметром 16,0...22,0 м із висотою 14,3...24,2 м (співвідношення $h/d = 0,65...1,5$).

У другій групі силосів робочий проліт (відстань між підземною галереєю та кільцевим фундаментом) для плити днища стає доволі великим відносно можливої товщини

плити, тому на відміну від силосів першої групи доцільно від'єднувати плиту днища від кільцевого стрічкового фундаменту.

Крім того, кільцевий стрічковий фундамент у цій групі є сильно навантаженим через більшу висоту силосів, а тому з'єднання з плитою днища викликало б додаткове його перевантаження.

Водночас, у разі від'єднання плити днища ключову роль у забезпеченні однакових величин деформацій всієї фундаментної системи виконує зворотна засипка під днищем, а тому слід приділяти особливу увагу якості її виконання.

Силоси другої групи можуть бути зведені на природній основі, в т. ч. за умов слабких і просадочних ґрунтів.

Однак, для прийняття коректних проектних рішень слід використовувати чисельне моделювання НДС системи ОФС методом скінченних елементів (МСЕ), у т. ч. виконувати ітераційні розрахунки, враховувати всі можливі розрахункові сценарії та етапи експлуатації споруд (Винников та ін., 2023).

Так згідно з авторською методикою (Винников та ін., 2023) особливу увагу слід приділяти жорсткості ґрунтової основи під окремими елементами конструкції, а також впливу локального замокання просадочного шару ґрунту, втрати міцності лесових ґрунтів, можливих дефектів ущільнення під днищем і найбільш несприятливих комбінацій цих факторів.

У разі відсутності можливості виконання розрахунків чисельними ітераційними методами згідно з (Винников та ін., 2023) за умов слабких або просадочних ґрунтів для уникнення ускладнень і аварій при експлуатації силосів рекомендується приймати фундаменти на основі, підсиленій ГЦЕ (Марченко, 2012) чи пальовий фундамент з прорізанням слабких і просадочних ґрунтів.

Для ілюстрації роботи силосів другої групи розглянемо шість силосів, що знаходяться в с. Поминник Маньківського району Черкаської обл. показано на Рис. 5.

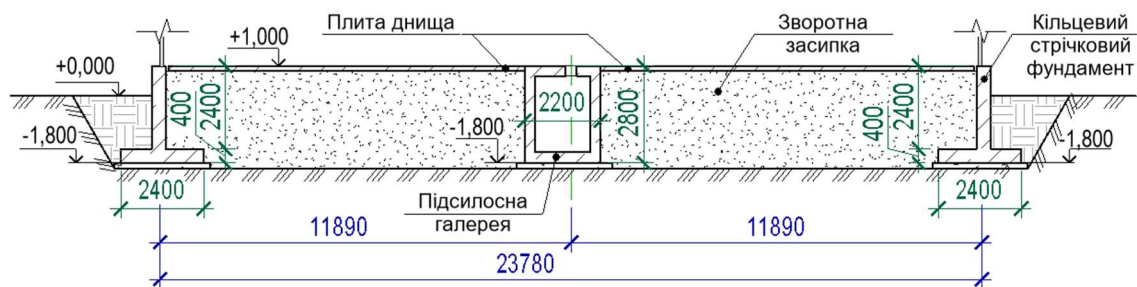


Рис.5. Конструкція системи ОФС силосів діаметром 23,78 м (с. Поминник Маньківського району Черкаської обл.)

Fig. 5. Silo with a diameter of 23.78 m (Pomynnyk village, Mankiv district, Cherkasy region)

На даному елеваторі всі силоси однакові з діаметром 23,78 м і висотою 17,1 м ($h/d = 0,72$). Основою фундаментів до глибини 7,2 м виступають лесові просадочні суглинки. Між плитою днища та стінкою кільцевого фундаменту передбачено деформаційний шов.

Для оцінювання характеру НДС системи фундаментів виконано чисельне моделювання МСЕ в плоскій (2D) постановці (див. Рис. 6).

При цьому було прийнято наступні головні передумови розрахунку:

- всі залізобетонні конструкції фундаментів змодельовані пластинами відповідних жорсткостей;
- НДС ґрунтів основи розраховано за добре апробованою пружно-пластичною моделлю ґрунту з критерієм міцності Мора-Кулона;
- поведінка залізобетонних елементів вважається пружною;
- в розрахунку було прийнято неякісно ущільнену піщану засипку, спираючись на результати натурних обстежень осідання днища силосів (Винников та ін., 2023).

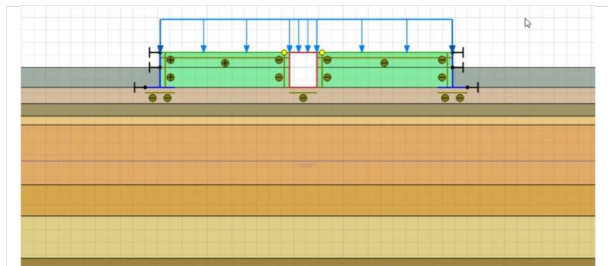


Рис.6. Розрахункова схема системи ОФС

Fig. 6. Design scheme of the silo foundation

В результаті чисельного 2D моделювання МСЕ встановлено, що осідання основи під

кільцевим фундаментом складає 20 см, а під плитою днища – до 25 см (максимальні значення біля стінки кільцевого фундаменту), а осідання основи галереї по її центру склали до 16,5 см показано на Рис. 7.

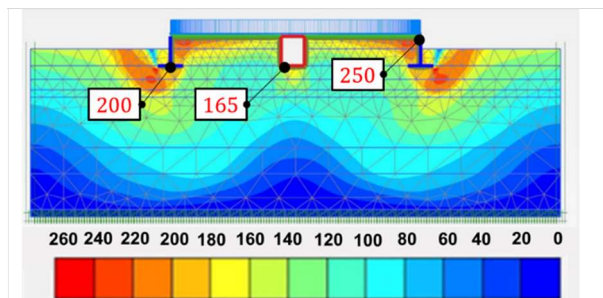


Рис.7. Ізополя вертикальних деформацій основи фундаменту силосу, мм

Fig.7. Vertical deformation map of the silo foundation base, mm

Ізополя загальних середніх напружень за результатами 2D моделювання МСЕ в основі фундаменту силосу наведено на Рис. 8.

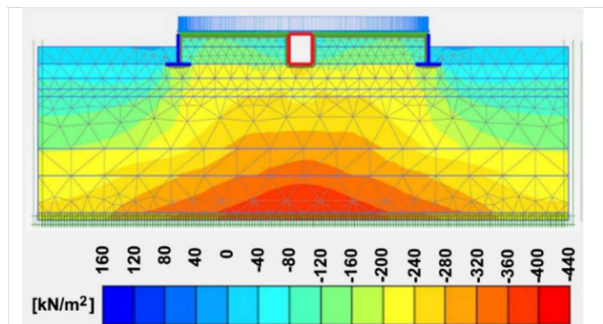


Рис.8. Ізополя загальних середніх напружень в основі фундаменту силосу, кПа

Fig.8. Total average stresses map in the silo foundation base, kPa

В іншій розрахунковій моделі передбачено підсилення основи плити днища вертикальними ГЦЕ на глибину 8 м. При цьому

зворотна засипка стане квазіоднорідною основою з підвищеними механічними властивостями наведено на Рис. 9, а саме – модуль загальної деформації підсиленої основи складе $E_{sc} = 15$ МПа.

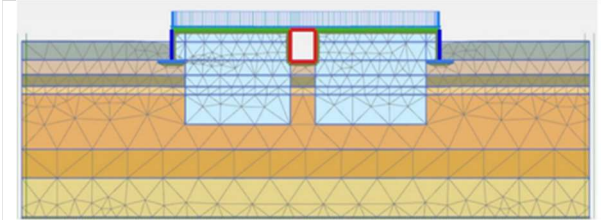


Рис.9. Розрахункова схема фундаменту силосу із підсиленою основою

Fig.9. Design scheme of the silos foundation with a reinforced base

В результаті моделювання отримано, що розподіл осідань підсиленої основи буде більш рівномірним і коливатиметься в межах 15,0...16,0 см наведено на Рис. 10.

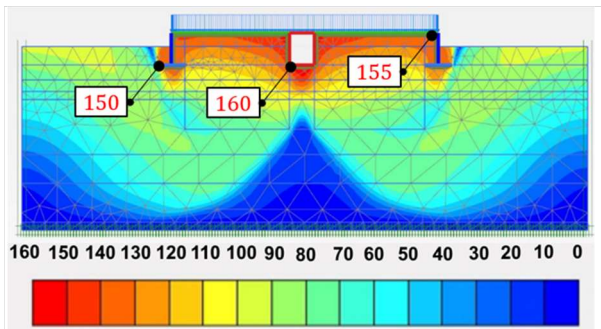


Рис.10. Ізополі вертикальних деформацій підсиленої основи фундаменту силосу, мм

Fig.10. Vertical deformations of the reinforced silo foundation, mm

ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ

Отже, за результатами проведених досліджень зроблено такі основні висновки:

1. Для металевих силосів з гофрованою стінкою для зберігання зерна обґрунтовано суттєвий фактор впливу рівня навантажень на днище на роботу і НДС системи ОФС. Рівень навантажень на плиту днища залежить від співвідношення висоти силосу до його діаметру h/d й зростає зі збільшенням діаметру та зменшенням h/d . Зокрема, виділено три групи силосів, для кожної з яких визначено характерні особливості роботи за умов слабкої та просадочної ґрунтової основи.

2. Проведено аналіз основних типорозмірів металевих силосів з гофрованою стінкою для зерна, які зараз знаходяться в експлуатації та використовуються для нового будівництва. При цьому визначено, що їх діаметр змінюється від 11 до 28 м, а висота від 11 до 24,2 м, тобто співвідношення коливається в межах $h/d = 0,75...1,6$.

3. Узагальнено результати обстежень технічного стану силосів різних груп за навантаженням на днище залежно від співвідношення h/d . За результатами комплексних обстежень технічного стану значної частини силосів у різних геотехнічних умовах і відповідному зборі статистичних даних виявлено, що найбільший відсоток ускладнень експлуатації спостерігається для силосів другої групи ($120 \leq p_{vsq} < 160$ кПа). Це зумовлено, головним чином, нерівномірністю деформацій окремих елементів системи ОФС. Значна частина споруд цього типу за умов просадочних ґрунтів зводилася без відповідних конструктивних рішень щодо підсилення чи прорізання просадочної товщі і зовсім не враховувала фактичні навантаження та впливи на різні елементи споруди. Як наслідок, десятки силосів другої групи експлуатуються в обмеженому режимі та потребують капітальних ремонтів чи виводу із експлуатації.

4. Обґрунтовано доцільність підбору типу фундаменту залежно від групи силосів.

Для першої групи силосів малого діаметру від 11 до 16 м (співвідношення $h/d = 0,75...1,6$), для яких тиск на днище від зерна коливається в межах 80...120 кПа, доцільно використання фундаментів на природній основі, для просадочних і слабких основ – улаштування ґрунтових подушок.

Для другої групи силосів середнього діаметру від 16 до 22 м (співвідношення $h/d = 0,65...1,5$), для яких тиск на днище від зерна коливається в межах 120...160 кПа, – необхідне чисельне й імітаційне моделювання НДС системи ОФС і, за потреби, підсилення природної основи ГЦЕ (особливо основи плити днища) чи використання палювих фундаментів.

Для третьої групи силосів великого діаметру від 22 до 28 м (співвідношення

$h/d = 0,67 \dots 1,1$), для яких тиск на днище від зерна коливається в межах 160...200 кПа, – доцільно влаштування плитного фундаменту зі спільною роботою з кільцевим фундаментом і підсилою галереєю. У разі слабкої чи просадочної основи доцільно її прорізати пальовими фундаментами чи виконувати її армування ГЦЕ.

Наведені висновки дозволяють сформулювати наступні рекомендації:

1. На етапі проєктування металевих силосів із гофрованою стінкою для зерна з метою оцінювання можливих варіантів фундаментів слід враховувати рівень розподіленого навантаження на днище та співвідношення висоти силосу до діаметру (h/d).

2. Особливу увагу слід приділяти оцінюванню деформативності ґрунтової основи (враховувати просадочні властивості на різних етапах експлуатації силосу з різним ступенем замокання, особливо локального) та зворотної засипки під плиту днища для силосів середнього і великого діаметру.

3. Для силосів другої та третьої груп ($p_{vsq} \geq 120$ кПа) слід використовувати оцінювання НДС системи ОФС за допомогою чисельного моделювання МСЕ з урахуванням просторової роботи її елементів.

4. У разі будівництва силосів у складних геотехнічних умовах для другої групи ($120 \leq p_{vsq} < 160$ кПа) рекомендується передбачати підсилення основи ГЦЕ чи застосовувати пальові фундаменти з прорізанням слабких і просадочних ґрунтів.

5. Для силосів третьої групи ($p_{vsq} > 160$ кПа) доцільно передбачати влаштування спільного плитного фундаменту під стінки, днище та підсилою галерею з можливим підсиленням основи ГЦЕ чи влаштування пальових фундаментів. Тут основним моментом є забезпечення спільної роботи плити днища з фундаментною плитою силосу.

6. Особливу увагу слід приділяти технології ущільнення зворотної засипки під днищем силосу для уникнення нерівномірних деформацій фундаментної системи. У разі відсутності можливості забезпечення геотехнічного контролю якості пошарового ущіль-

нення ґрунту слід використовувати вертикальне армування ГЦЕ як відносно не дороге, але досить ефективне рішення.

ЛІТЕРАТУРА

1. Coduto, D. P., Kitch, W. A., & Yeung, M.-c. R. (2015). *Foundation design: Principles and practices*. Pearson.
2. ACI 313-16:2016 (2016) Design Specification for Concrete Silos and Stacking Tubes for Storing Granular Materials and Commentary. *American Concrete Institute*.
3. Махінько, А., & Махінько, Н. (2021). *Сталеві ємності для зберігання зерна*. К.: Вид-во «Сталь».
4. Fank, M. Z., Nascimento, J. W. B. d., Cardoso, D. L., Meira, A. S., & Willrich, F. L. (2018). *Vertical pressures and compressive friction force in a large silo*. *Engenharia Agrícola*, 38(4), 498–503. doi:10.1590/1809-4430-eng.agric.v38n4p498-503/2018
5. AS 3774 (1996) *Loads on bulk containers*. Sydney: Australian Standard.
6. Laier, J. E., Cowles, G. D. E., & White, M. E. (2008). Anatomy of foundation performance involving three grain silos systematically loaded to impending failure. *Symposium honoring dr. john H. schmertmann for his contributions to civil engineering at research to practice in geotechnical engineering congress 2008*. Reston, VA: American Society of Civil Engineers. doi:10.1061/40962(325)19
7. Мозговий, А. О., & Бутенко, А. А. (2022). Особливості конструкцій залізобетонних фундаментів силосів збільшених розмірів. *Збірник наук. пр. [УкрДУЗТ]. Будівництво та цивільна інженерія*, (199), 54–67. doi:10.18664/1994-7852.199.2022.258797
8. Bernardes, H. C., de Souza Filho, H. L., Dias, A. D., & da Cunha, R. P. (2021). Numerical Analysis of Piled Raft Foundations Designed for Settlement Control on Steel Grain Silos in Collapsible Soils. *International Journal of Civil Engineering*. doi:10.1007/s40999-020-00586-5
9. Дворник, А. М., Любченко, І. Г., Титаренко, В. А., & Шидловська, О. В. (2019). Основи та фундаменти циліндричних силосів для зерна. *Наука та будівництво*, (3), 12-18.
10. Носенко В., & Кашоїда, О. (2021). Визначення напружено-деформованого стану групи паль шляхом числового моделювання їх взаємодії з основою за даними польових досліджень. *Основи та фундаменти*, (43), 87-100.

11. Підлущкий, В., & Литвин, О. (2020). Формування НДС у фундаментах зерносушильних комплексів при зміні параметрів ґрунтів. *Основи та Фундаменти / Bases and Foundations*, (41), 55–63. <https://doi.org/10.32347/0475-1132.41.2020.55-63>
12. Butenko, A. A., Mozgovyi, A. O., & Spirande, K. V. (2024). The improvement of the slab-ring foundation design with an under-silo gallery of a cylindrical steel silo on the grounds of the computer simulation results and those of field observations. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1376(1), 012024. doi:10.1088/1755-1315/1376/1/012024
13. Dhaybi, M., Grzyb, A., Trunfio, R., & Pellet, F. (2012). Foundations reinforced by soil mixing: Physical and numerical approach. In *Proc. of Intern. Symp. "Recent research, advances & execution aspects of ground improvement works"* (Vol. 3), 137-145.
14. Винников, Ю. Л., Харченко, М. О., & Марченко, В. І. (2012). Розрахунок фундаментної плити силосів на армованій стохастичній основі. *Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика*, 3, 26–32. doi:10.15802/bttrp2012/26411.
15. Ching, J. (2022). Is the scale of fluctuation the only important parameter in geotechnical spatial variability? *Proc. of the 20th Intern. Conf. on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*. Sydney: Australian Geomechanics Society. 4531–4536.
16. Rebolledo, J. F. R., Santiago, I. M., Bernardes, H. C., & Mendes, T. A. (2022). Performance evaluation of rigid inclusions for settlement control of grain silos in tropical soils. *Soils and Rocks*, 45, e2022004822.
17. KMZ Industries. (б. д.). (2025). Силоси з плоским днищем. Взято з <https://kmzindustries.ua/product/silosy-na-ploskom-osnovanii>
18. Винников, Ю., Харченко, М., Марченко, В., & Кічасов, О. (2023). Аналіз експлуатаційної придатності фундаментів споруд для зберігання зерна. *Основи та Фундаменти / Bases and Foundations*, 46, 63–72. doi:10.32347/0475-1132.46.2023.63-72
19. Марченко, В. І. (2012). *Напружено-деформований стан армованих за бурозмішувальною технологією слабких глинистих основ з урахуванням чиннику часу*. ПолтНТУ, 230.
20. ACI 313-16:2016 (2016) Design Specification for Concrete Silos and Stacking Tubes for Storing Granular Materials and Commentary. American Concrete Institute.
21. Makhinko, A., Makhinko, N. (2021). *Stalevi yemnosti dlia zberihannia zerna*. Kyiv: Vyd-vo «Stal» (in Ukrainian).
22. Fank, M. Z., Nascimento, J. W. B. d., Cardoso, D. L., Meira, A. S., & Willrich, F. L. (2018). Vertical pressures and compressive friction force in a large silo. *Engenharia Agricola*, 38(4), 498–503. doi:10.1590/1809-4430-eng.agric.v38n4p498-503/2018
23. AS 3774 (1996) *Loads on bulk containers*. Sydney: Australian Standard.
24. Laier, J. E., Cowles, G. D. E., & White, M. E. (2008). Anatomy of foundation performance involving three grain silos systematically loaded to impending failure. *Symposium honoring dr. john H. schmertmann for his contributions to civil engineering at research to practice in geotechnical engineering congress 2008*. Reston, VA: American Society of Civil Engineers. doi:10.1061/40962(325)19
25. Mozghovyi, A.O., Butenko, A.A. (2022). Osoblyvosti konstrukttsii zalizobetonnykh fundamentiv sylosiv zbilshenykh rozmiriv [The effective structures of reinforced concrete foundation of syloses at grain transfer terminals]. *Zbirnyk nauk. prats: Budivnytstvo ta tsyvilna inzheneriia. UkrDUZT*, 199, 54-67 (in Ukrainian).
26. Bernardes, H. C., de Souza Filho, H. L., Dias, A. D., & da Cunha, R. P. (2021). Numerical Analysis of Piled Raft Foundations Designed for Settlement Control on Steel Grain Silos in Collapsible Soils. *International Journal of Civil Engineering*. doi:10.1007/s40999-020-00586-5
27. Dvornyk, A.M., Liubchenko, I.H., Tytarenko, V.A. & Shydlovska, O.V. (2019). Osnovy ta fundamenti tsylindrychnykh sylosiv dlia zerna [Bases and foundations for grain cylindrical silos]. *Nauka ta budivnytstvo*. Kyiv: NDIBK, 3, 12-18 (in Ukrainian).
28. Nosenko, V., Kashoida, O. (2021). Vyznachennia napryjeno-deformovanogo stany grypi pal shliahom chislovogo modeliyvannia ih vzaie-modii z osnovoii za dannimi poliovih doslidjen [Determination of the stress-strain state of group of piles by numerical simulation of their interaction with the base according to field research data]. *Osnovy ta fundamenti: Mizhvidomchyj naukovy-tekhnichnyj zbirnyk*. Kyiv: KNUBA, 43, 87-100 (in Ukrainian).
29. Pidlutskyi, V.L., Lytvyn, O.V. (2020). Formuvannia NDS u fundamentakh zernosushylnykh kompleksiv pry zmini parametriv hruntiv [Formation of stress-strain state in the foundations of

REFERENCES

1. Coduto, D. P., Kitch, W. A., & Yeung, M.-c. R. (2015). *Foundation design: Principles and practices*. Pearson.

grain drying complexes when changing soil parameters]. *Osnovy ta fundamenty: Mizhvidomchyj naukovy-tekhnichnyi zbirnyk*. Kyiv: KNUBA, 41, 55-63 (in Ukrainian).

12. Butenko, A. A., Mozgovyi, A. O., & Spirande, K. V. (2024). The improvement of the slab-ring foundation design with an under-silo gallery of a cylindrical steel silo on the grounds of the computer simulation results and those of field observations. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1376(1), 012024. doi:10.1088/1755-1315/1376/1/012024
13. Dhaybi, M., Grzyb, A., Trunfio, R., & Pellet, F. (2012). Foundations reinforced by soil mixing: Physical and numerical approach. In *Proc. of Intern. Symp. "Recent research, advances & execution aspects of ground improvement works"* (Vol. 3), 137-145.
14. Vynnykov, Yu.L., Kharchenko, M.O., Marchenko, V.I. (2012). Rozrakhunok fundamentnoi plyty sylosiv na armovanii stokhastych-nii osnovi [Design of foundation plate of grain silage on reinforced stochastic soil base]. *Mosty ta tuneli: teoriia, doslidzhennia, praktyka*. Dnipro: DNUZT, 3, 26-32 (in Ukrainian).
15. Ching, J. (2022). Is the scale of fluctuation the only important parameter in geotechnical spatial variability? *Proc. of the 20th Intern. Conf. on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*. Sydney: Australian Geomechanics Society. 4531–4536.
16. Rebolledo, J. F. R., Santiago, I. M., Bernardes, H. C., & Mendes, T. A. (2022). Performance evaluation of rigid inclusions for settlement control of grain silos in tropical soils. *Soils and Rocks*, 45, e2022004822.
17. KMZ Industries. (b. d.). (2025). Sylosy z ploskym dnyshchem. Vziato z <https://kmzindustries.ua/product/silosy-na-ploskom-osnovanii> (date of request: 31.03.2025) (in Ukrainian).
18. Vynnykov, Y., Kharchenko, M., Marchenko, V., & Kichasov, O. (2023). Serviceability analysis of the grain storage facilities foundations. *Bases and Foundations*, (46), 63–72. <https://doi.org/10.32347/0475-1132.46.2023.63-72> (in Ukrainian).
19. Marchenko, V.I. (2012). Napruzhenno-deformovanyi stan armovanykh za burozmishuvalnoiu tekhnolohiieiu slabkykh hlynystykh osnov z urakhuvanniam chynnyku chasu [The stress-strain state of weak clay bases reinforced by drilling-mixing technology, taking into account the time factor]. *Dys. kand. tekhn. nauk*: 05.23.02. Poltava: PoltNTU, 230 (in Ukrainian).

Features of silo operation in difficult geotechnical conditions

Yuriy VYNNYKOV,
Maksym KHARCHENKO,
Oleksii KICHASOV,
Valentyn MARCHENKO

Summary. The performance of corrugated-wall steel silos for grain storage under complex geotechnical conditions depends significantly on the silo diameter and the height-to-diameter ratio. A key factor influencing foundation design is the vertical pressure exerted by the grain on the silo bottom, which increases with diameter. Based on pressure levels, all factory-made silos are divided into three groups: small ($d = 11\text{--}16\text{ m}$, $80\text{--}120\text{ kPa}$), medium ($d = 16\text{--}22\text{ m}$, $120\text{--}160\text{ kPa}$), and large ($d = 22\text{--}28\text{ m}$, $160\text{--}200\text{ kPa}$). Each group demonstrates different performance characteristics under weak or collapsible soils. For the first group, natural subsoil or compacted soil cushions may be sufficient even under poor conditions.

It has been established that for silos of the second group it is advisable to reinforce weak and subsid-ing soils or cut through them with pile foundations, especially for the bottom base, or to apply correctly substantiated calculation models of the joint operation of the components of the system “subsidence (weak) soil base – ring foundation – silo gallery – compacted base – bottom plate”.

For the third group, construction on a unified foundation slab that supports the silo walls, bottom, and under-silo gallery is recommended. This solution ensures more uniform deformation and reduces the risk of operational problems.

The results of surveys and numerical modeling confirm that the second group of silos is most prone to operational complications, especially if geotechnical control is not observed when compacting the backfill under the bottom.

A set of recommendations is proposed that take into account the influence of the h/d ratio, the level of loads, and the type of soil base when choosing the type of foundations, which increases the reliability and durability of structures.

Keywords. corrugated-wall metal silo, poor-bearing and collapsible soil base, stress–strain state, ring foundation, bottom slab with underground gallery, silo diameter and height, load on bottom slab.