

Аналіз експлуатаційної придатності фундаментів споруд для зберігання зерна

Юрій Винников¹, Максим Харченко², Валентин Марченко³, Олексій Кічасов⁴

^{1,2} Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»
24, просп. Першотравневий, м. Полтава, Україна, 36011

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

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

^{3,4} ТОВ «Науково-технічне підприємство «АЛЬМАГРУП»

2-В, вул. Першотравнева, м. Кременчук, Полтавська область, Україна, 39600

³ marchenkovalentyn@gmail.com

⁴ oleksiikichasov@gmail.com

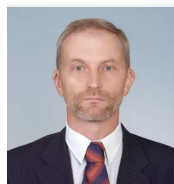
DOI: 10.32347/0475-1132.46.2023.63-72

Анотація. На прикладі складної системи підземної частини силосу типу «просадочна ґрунтова основа – фундаментна стрічка – підсилована галерея – ущільнена основа – плита днища» досліджено зміну її напружено-деформованого стану (НДС) як індикатору оцінювання експлуатаційної придатності такого виду промислової споруди.

На базі аналізу існуючої проектно-документації та натурних обстежень встановлено основні етапи роботи споруди протягом її зведення та подальшої експлуатації. Для оцінювання поточного технічного стану системи основ і фундаментів проведено моделювання її НДС методом скінченних елементів. При цьому, щоб отримати фактичний напружений стан системи за деформованою схемою, додатково було використано результати геодезичних вимірювань у часі.

В роботі зосереджено увагу на характері взаємного впливу окремих елементів складної системи фундаментів, висвітлено характерні зміни в конструктивній схемі та особливостях перерозподілу напружень всередині системи на різних етапах експлуатації (враховано локальні замкнення лесової просадочної товщі потужністю до 7,2 м, що було характерно для натурального дослідного об'єкту).

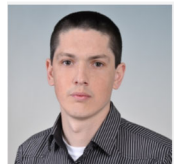
Зокрема, визначено зусилля в залізобетонних елементах підземної галереї силосу. Враховано вплив зміни НДС системи фундаментів на їх роботу при змінних навантаженнях і впливах.



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



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



Валентин Марченко
Інженер, к.т.н.



Олексій Кічасов
інженер

Встановлено, що проектування подібних складних систем все ще вимагає подальшого дослідження розрахункових схем і ситуацій. При проектуванні складних систем фундаментів силосів досить поширеною помилкою є невірне врахування жорсткостей підземної галереї, зворотної засипки під плитою днища й локально замклої лесової товщі під фундаментною стрічкою. Ці фактори суттєво впливають на загальний рівень надійності та безаварійної експлуатації промислової споруди в цілому.

Також показано, що необхідно враховувати вплив суміжних силосів і фактору несиметричності фундаменту вздовж та впоперек підземної галереї.

Ключові слова. Металевий силос, імітаційне чисельне моделювання, осідання, слабка ґрунтова основа, напружено-деформований стан, фундамент з підземною галереєю.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

На сьогоднішній день найбільш популярним типом споруд для зберігання зерна є металеві силоси. Більшість споруд такого типу експлуатуються двадцять і більше років. Тому наразі вже накопичено певна статистична інформація щодо їх зведення, але аналогічного досвіду відносно їх експлуатації, а особливо ремонту поки ще недостатньо, через що ця проблема потребує дослідження.

Аналіз аварій споруд цього типу вказує на те, що вони зазвичай викликані нерівномірними деформаціями ґрунтової основи та руйнуванням конструкцій фундаментів [1, 2].

В Україні для металевих силосів доволі поширеним є наступний тип фундаментів: залізобетонний стрічковий фундамент, на який спирається підземна залізобетонна галерея з днищем (зазвичай днище з'єднано з галереєю, але не з'єднано з фундаментною стрічкою).

Просторову схему даної системи фундаментів наведено на Рис. 1.

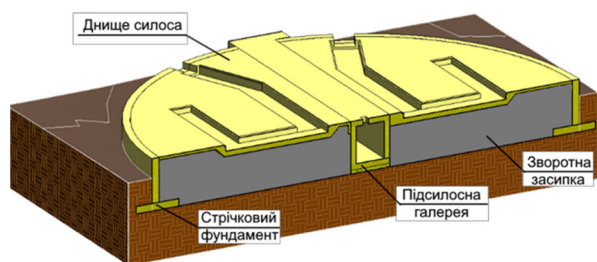


Рис.1. Просторова схема системи фундаментів силосу

Fig.1. General view of the silo foundation system

Додатковою особливістю цього типу фундаменту є спирання різних його складових частин на різну ґрунтову основу. Так фундаментна стрічка та підземна галерея спираються на природну основу (переважно на

слабкі чи лесові просадочні ґрунти), а днище – на пошарово ущільнену зворотну засипку.

Цей тип фундаментів є відносно економічним, що забезпечило його широке впровадження, але водночас для нього є характерним і порушення спільної роботи його окремих частин за нерівномірних деформаціях ґрунтової основи, та як наслідок – виникнення проблем при експлуатації промислового об'єкту через перекося надсилосних завантажувальних металевих галерей, виникнення тріщин у залізобетонних елементах розвантажувальних підземних галерей, перекося залізобетонної плити днища силосу і т. ін.

Таким чином, актуальними є питання аналізу експлуатаційної придатності фундаментів споруд для зберігання зерна з урахуванням усіх перелічених вище чинників з метою розроблення рекомендацій щодо їх подальшої безаварійної експлуатації цих споруд.

АНАЛІЗ ПОПЕРЕДНІХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Для фундаментів силосу даної конструкції вже проводили дослідження розподілу контактних напружень і визначення осідань й прогинів їх окремих елементів, а також оцінювали залежності величини кренів споруд від різних ґрунтових умов [3, 4].

Зокрема, було встановлено, що для коректного оцінювання деформацій системи «просадочна ґрунтова основа – фундаментна стрічка – підсилосна галерея – ущільнена основа – плита днища» необхідно враховувати особливості зміни жорсткості як для штучних основ, так і для локально замкнених і ще незамкнених лесових ґрунтів [5, 6], у т. ч. й основ, армованих жорсткими вертикальними елементами [7, 8].

Використання методу скінченних елементів (МСЕ) для моделювання НДС системи фундаментів дозволило, зокрема, враховувати: взаємний вплив їх окремих елементів; стадійність прикладання навантаження та його повторюваність; нелінійний характер деформації основи, тощо [7-10], – а також

уточнити характеристики основи за результатами геодезичних вимірювань у часі [11-13].

Також важливо брати до уваги й просторову мінливість залягання ґрунтів у межах ділянки та імовірнісну природу їх характеристик [14-16].

МЕТА РОБОТИ

Тому за мету роботи прийнято – проаналізувати зміну НДС складної системи «просадочна ґрунтова основа – фундаментна стрічка – підсилована галерея – ущільнена основа – плита днища» (далі «системи фундаментів») на різних етапах експлуатації силосів для зберігання зерна.

Для досягнення мети вирішувалися такі задачі:

- виконання комплексного аналізу факторів, які не враховано при складанні розрахункових моделей складних систем фундаментів типу «просадочна ґрунтова основа – фундаментна стрічка – підсилована галерея – ущільнена основа – плита днища»;
- розроблення розрахункової моделі системи фундаментів і чисельне моделювання їх роботи на різних етапах експлуатації;
- обстеження технічного стану силосів із урахуванням різних етапів їх експлуатації для оцінювання впливу ряду факторів на НДС системи фундаментів;
- уточнення параметрів розрахункової моделі з урахуванням фактично отриманих даних при натурних обстеженнях та оцінювання впливу окремих чинників на зміну НДС системи фундаментів.

ОСНОВНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ

Натурні польові дослідження виконано на прикладі силосної групи з шести силосів, кожен з яких мав діаметр 23,78 м і ємність 7760 м³ (Рис. 1).

У кожного силосу, що досліджувався, система фундаментів складається із залізобетонних монолітних складових: фундаментної стрічки; підсилової галереї; плити

днища. Стрічка складається зі стінки товщиною 400 мм і висотою 2,8 м та підшви товщиною 400 мм і шириною 2,4 м. Навантаження від зерна передається на стінки силосу та бетонне днище товщиною 150 мм.

Основою днища служить ущільнений ґрунт зворотної засипки. За центром силосу знаходиться підземна галерея, що з'єднана з днищем та спирається на стрічку. Галерея в перерізі має коробчасту форму 2,2×2,6(н) м з товщиною стінок 300 мм. Глибина закладання підшви фундаментної стрічки від рівня планування складе 1,8 м.

Геологічна будова майданчика до 20 м представлена четвертинними важкими та легкими пілуватими суглинками, які з глибини близько 15 м підстиляються легкими пілуватими глинами. При цьому з глибини 1,7-2,2 м четвертинні відклади перекриті насипним ґрунтом. До глибини 7,2 м лесові суглинки мають просадочні властивості.

Інженерно-геологічний розріз ділянки з прив'язкою до нього системи фундаментів силосу наведено на Рис. 2.

У Табл. 1 виділено три основних етапи експлуатації натурних силосів (у т. ч. роботи системи фундаментів).

Для обґрунтування фактичної роботи всіх елементів системи фундаментів проведено порівняння їх НДС на різних етапах експлуатації, отриманих при обстеженнях (тріщини в залізобетонних елементах, прогини, перекося, нерівномірні деформації, тощо) та за результатами моделювання МСЕ, так званім, зворотнім розрахунком (ітераційні розрахунки зі зміною жорсткості ґрунтової основи до моменту отримання фактичного стану елементів системи фундаментів).

На Рис. 3 подано розрахункову модель системи фундаментів із відповідними навантаженнями та впливами.

Результати аналітичних розрахунків основи фундаментної стрічки для конкретних інженерно-геологічних умов і навантажень наступні.

За першою групою граничних станів сума вертикальних складових усіх розрахункових граничних навантажень і впливів ($\Sigma F_{vi} \times \gamma_i = 697,5$ кН) більша за вертикальну складову граничного опору ґрунту основи

($\gamma_c \times N_u / \gamma_n = 681,4$ кН) з коефіцієнтом перевантаження 1,02. Тобто величини тисків під подошвою фундаментів з боку днища споруди за повного завантаження силосів наближаються до їх гранично допустимих значень.

За другою групою граничних станів максимальний тиск під подошвою фундаменту складає $p_{max} = 346,8$ кПа, а мінімальний

$p_{min} = 46,1$ кПа. При цьому коефіцієнт перевищення тиску над розрахунковим опором ґрунту складає 0,86.

Величина осідання ґрунтової основи фундаментної стрічки, визначена за методом лінійно деформованого напівпростору [17], склала $S_{max} = 12$ см.

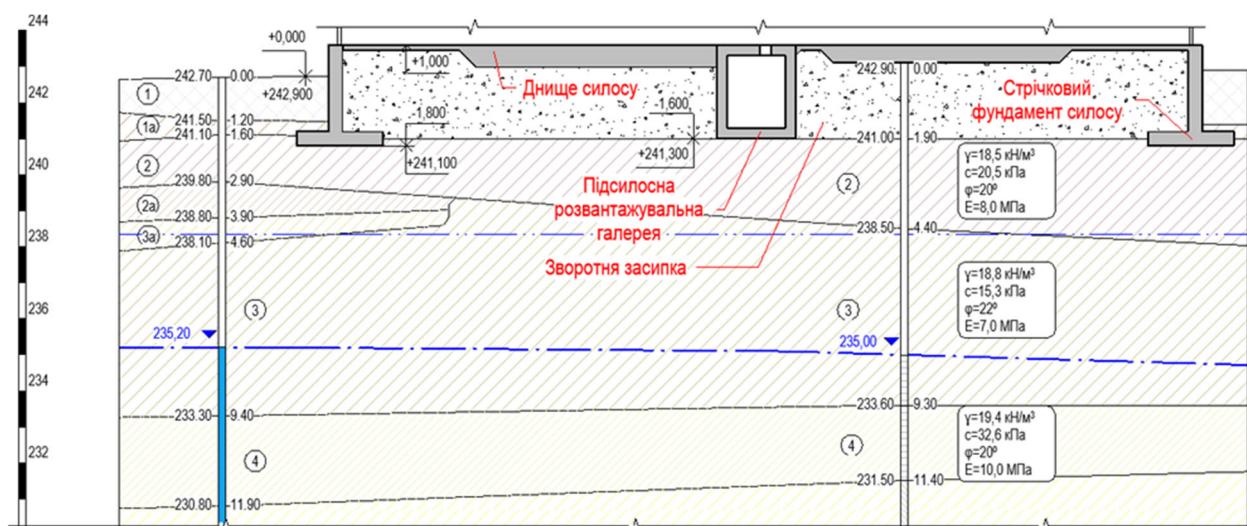


Рис.2. Інженерно-геологічний розріз майданчика, на якому експлуатується силосна група
Fig.2. Engineering geological cross sections of the silo site

Табл. 1. Етапи експлуатації натурних силосів
Table 1. Exploitation stages of the silos

№ етапу	Опис етапу	Чинники, що визначали НДС системи фундаментів
1	Будівництво та початок експлуатації	<ul style="list-style-type: none"> - невірно враховане додаткове навантаження від плити днища на внутрішній виступ подошви фундаментної стрічки; - неякісне виконання зворотної засипки і як наслідок довантаження підсилосної галереї.
2	З моменту замокання лесових просадочних ґрунтів під фундаментною стрічкою на ранніх етапах експлуатації	<ul style="list-style-type: none"> - ущільнення зворотної засипки під плитою днища від ваги продукції і як наслідок перекося плити днища; - локальні замкнення лесової просадочної товщі й початкові нерівномірні осідання основи фундаментної стрічки силосів; - утворення в локальних зонах пластичних шарнірів у плиті днища вздовж галереї; - ущільнення ґрунтової основи під фундаментною стрічкою.
3	Деградація лесової просадочної товщі під фундаментною стрічкою й перехід технічного стану споруд у незадовільний до нормальній експлуатації	<ul style="list-style-type: none"> - тривале нерівномірне замкнення ґрунтової основи фундаментної стрічки; - збільшення нерівномірних й абсолютних осідань основи фундаментної стрічки та відповідно перерозподіл напружень і деформацій у системі фундаментів; - утворення тріщин у підсилосних галереях; - перекося у стійках і мостових конструкціях надсилосних транспортних завантажувальних галереях.

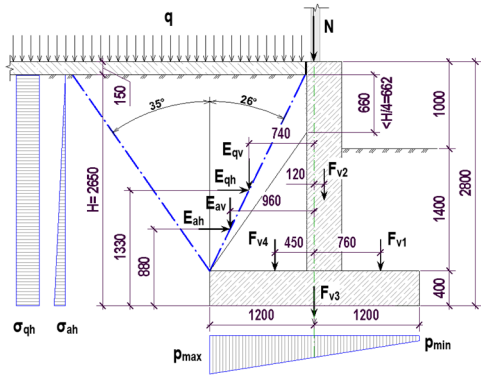


Рис.3. Розрахункова модель системи фундаментів

Fig.3. Foundation system design scheme

Ця розрахункова модель коректно описує розрахункову ситуацію за відсутності локальних замочань просадочної товщі основи фундаментів і відповідно не враховує нерівномірні деформації фундаментів у процесі експлуатації силосів. З іншого боку дана модель враховує перерозподіл між різними елементами системи за умови коректно реалізованих проектних рішень фундаментів. Тобто є сенс використовувати її для проектування силосів з метою прийняття основних рішень із відповідними коефіцієнтами надійності, але для врахування нелінійної поведінки основи й локального замочання просадочної товщі під фундаментами слід додатково застосовувати моделювання МСЕ.

Тому для порівняння даних, отриманих аналітично та при обстеженнях, було додатково проведено моделювання НДС системи фундаментів МСЕ.

Основні передумови скінченоелементної моделі такі: всі залізобетонні конструкції фундаментів змодельовано пластинами відповідних жорсткостей; поведінка ґрунтів і залізобетонних елементів вважається пружною; локальне замочання ґрунтової основи в різних її частинах враховано ітераційними методами шляхом зниження величини жорсткості.

Параметри ґрунтів зворотної засипки визначено зворотним розрахунком МСЕ шляхом аналізу характеру осідання днища в процесі експлуатації силосу.

Розрахункову скінченоелементну модель системи фундаментів наведено на Рис. 4.

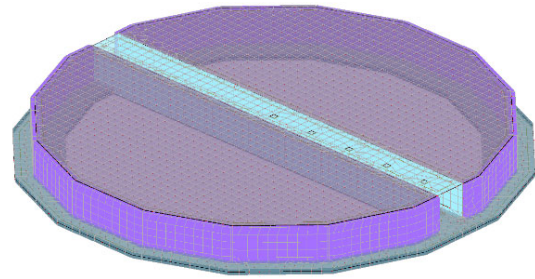


Рис.4. Розрахункова схема просторової системи «просадочна основа – фундаментна стрічка – підсилосна галерея – ущільнена основа – плита днища»

Fig.4. Design scheme of the spatial system “subsidence soil base – foundation strip – underground gallery – compacted base – slab”

Одна з основних задач розрахунку – отримання внутрішніх зусиль в елементах з урахуванням фактично вимірних і розрахованих деформацій, а також зафіксованих обстеженнями пошкоджень, що виникли в процесі експлуатації споруди. Окрема складова цієї задачі – визначення зусиль у галереї як в балочному елементі. Аналіз проводився відповідно етапів роботи системи фундаментів (див. Табл. 1).

На етапі 1 змодельовано розрахункову ситуацію до моменту замочання просадочної товщі й до моменту ущільнення зворотної засипки під днищем від ваги зерна. Для цього періоду характерні значно більші коефіцієнти жорсткості основи під стрічкою та дном галереї порівняно з основою під днищем. Це призводить до значної різниці між деформаціями основи під стрічкою та галереєю і днищем (Рис. 5).

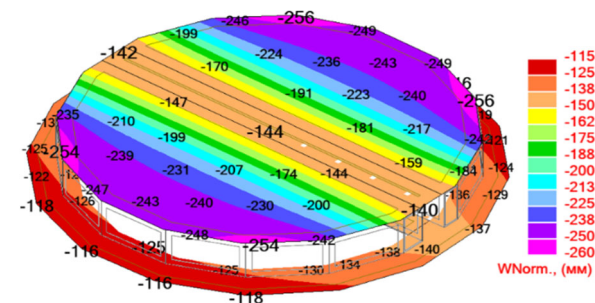


Рис.5. Карта осідань системи фундаментів на першому етапі експлуатації, мм

Fig.5. Vertical deformation map of the foundation system at the first stage of exploitation, mm

Розраховані осідання галереї та стрічки коливалися від 12,5 см до 14,1 см, а деформації плити днища знаходились в межах 14,2...25,4 см.

Тобто галерея виявилась суттєво довантаженою плитою днища, що також добре помітно за розподілом тисків під підошвою фундаментів (Рис. 6).

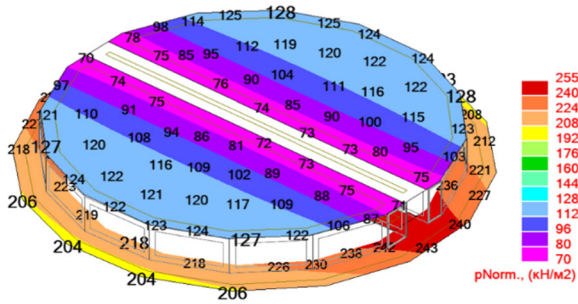


Рис.6. Карта розподілу тисків під елементами системи фундаментів на першому етапі експлуатації, кПа

Fig.6. Stresses map in the silo foundation base system at the first stage of exploitation, kPa

На цій стадії максимальне значення згинального моменту в галереї як в балочному елементі склало 3537 кНм (Рис. 7).

Перевірочний розрахунок перерізу галереї за міцністю показав, що вона перевантажена в 1,6 разів.

При обстеженні галереї виявлено опоясуючі тріщини за днищем і стінках у центральній її частині, які ймовірно виникли на даному етапі експлуатації через суттєве перевантаження.

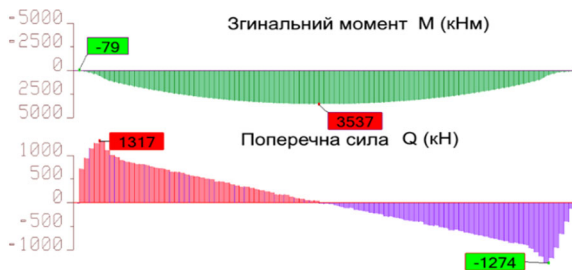


Рис.7. Внутрішні зусилля в галереї на першому етапі експлуатації

Fig.7. Forces in the underground gallery at the first stage of exploitation

У розрахункові моделі для другого та третього етапів експлуатації силосів враховано утворення тріщин у конструкціях галереї, а також замокання лесової основи фундаментної стрічки. Для цього періоду характерним було зниження коефіцієнтів жорсткості основи під стрічкою та дном галереї порівняно з основою плити днища силосу (враховано ущільнення зворотної засипки з часом).

Абсолютні осідання системи фундаментів збільшуються, однак відбувається зменшення різниці між значеннями деформацій окремих елементів системи (Рис. 8).

Розраховані осідання фундаментної стрічки складають 17,3...17,8 см, галереї – 17,8...18,0 см. Деформації плити днища коливаються в межах 18,0...24,5 см.

Схожі процеси можна спостерігати і на картах розподілу тисків (Рис. 9).

Максимальне значення згинального моменту в галереї на другому й третьому етапах експлуатації зменшується до 1591 кНм (Рис. 10). Тобто порівняно з першою стадією експлуатації величини згинального моменту зменшилися майже вдвічі.

При цьому вплив тріщин у галереї, що виникли на першому етапі, враховано за рахунок зниження на 30% жорсткості нижньої грані галереї. На цьому етапі коефіцієнт використання несучої здатності підземної галереї складає 1,0.

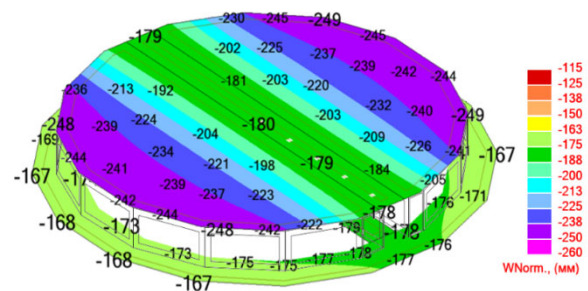


Рис.8. Карта осідань елементів системи фундаментів на другому та третьому етапах експлуатації (значення в мм)

Fig.8. Vertical deformation map of the foundation system at the second stage of exploitation, mm

ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ

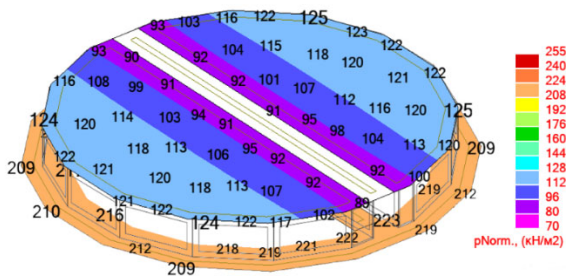


Рис.9. Карта розподілу тисків під елементами системи фундаментів на другому та третьому етапах експлуатації, кПа

Fig.9. Stresses map in the silo foundation base system at the second stage of exploitation, kPa

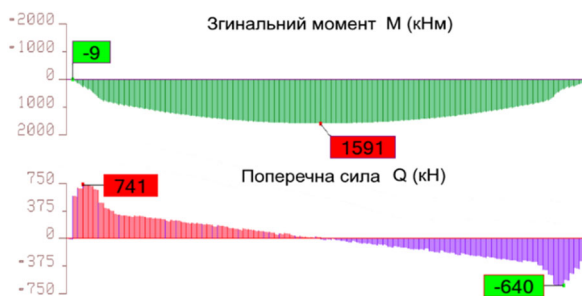


Рис.10. Внутрішні зусилля в галереї на другому етапі експлуатації

Fig.10. Forces in the underground gallery at the second stage of exploitation

На третьому етапі експлуатації у плиті днища в зоні примикання до стінок галереї утворилися тріщини. Тобто відбулося утворення пластичних шарнірів і незначне розвантаження галереї від ваги зерна, що припадає на плиту днища.

При погіршенні умов експлуатації (наприклад, подальше замокання лесової просадочної товщі) ймовірним є початок руйнування всієї системи фундаментів через подальше руйнування залізобетонних конструкцій галереї, оскільки вона забезпечує сумісну роботу днища та фундаментної стрічки.

Тому для можливості подальшого безпечного використання промислових споруд слід дотримуватися обмеженого режиму їх експлуатації.

При цьому найбільш простим рішенням є зменшення завантаження силосів до значень, при яких всі елементи системи будуть мати необхідну несучу здатність.

В результаті комплексного аналізу факторів, які не враховано при складанні розрахункових моделей складних систем фундаментів типу «просадочна ґрунтова основа – фундаментна стрічка – підсилююча галерея – ущільнена основа – плита днища» та обстеження технічного стану силосів із врахуванням різних етапів їх експлуатації встановлено, наступне.

1. Не достатньо вивченим поки є питання перерозподілу НДС у зонах контакту різних елементів системи фундаментів, особливо за умов локального замокання їх просадочних основ.

2. Необхідно враховувати вплив суміжних силосів і фактору несиметричності фундаменту вздовж та впоперек підземної галереї.

3. Невірно оцінюється фактична жорсткість підземної галереї та зворотної засипки під плитою днища силосу, що при нерівномірності деформацій кільцевого фундаменту суттєво впливає на внутрішні зусилля в елементах підземної галереї, а відповідно й на повний перерозподіл НДС в усіх елементах системи.

4. Поки ще відсутні методики для врахування: жорсткості залізобетонних елементів із тріщинами; нерівномірних деформацій фундаментів при локальних замоканнях просадочної товщі основи; ущільнення ґрунтової основи при тривалому завантаженні розвантаженні промислової споруди. Це є дуже необхідним інструментом для оцінювання експлуатаційної придатності силосів і розроблення рекомендацій щодо подальшої їх безпечної експлуатації, особливо за умови їх незадовільного чи аварійного технічного станів.

Тому за результатами аналізу експлуатаційної придатності фундаментів споруд для зберігання зерна є сенс запропонувати наступні рекомендації.

1. На стадії проектування нової споруди можливо використовувати аналітичні розрахункові моделі, схему яких наведено на рис. 3, за умови суттєвого обмеження вели-

чини тисків під подошвою стрічкового фундаменту та відповідно обмеження розрахункових осідань і просідань їх основи. Зокрема, рекомендується обмежити максимальні краєві тиски величиною 200 кПа. При цьому слід якісно виконувати та контролювати ущільнення ґрунту зворотної засипки під днище чи виконувати деформаційний шов по підземній галереї, щоб уникнути її безпосереднє спирання на стрічковий фундамент.

2. При використанні чисельних моделей МСЕ на стадії проектування нової споруди слід виконувати ітераційні розрахунки із врахуванням усіх можливих розрахункових ситуацій і стадій експлуатації споруди. Зокрема, важливим фактором є врахування жорсткості ґрунтової основи під різними елементами системи, особливо слід врахувати можливі локальні замокання просадочної товщі, повну деградацію лесового масиву, можливість неякісного ущільнення ґрунтової основи під днище, а також найбільш несприятливі сполучення описаних вище чинників.

3. Для оцінювання НДС елементів системи фундаментів споруд, які експлуатуються, слід враховувати фактичний деформований стан їх елементів за даними геодезичних вимірювань, а також порівнювати отримані розрахунком напруження з місцями розташування фактичних пошкоджень (тріщини, перекося, сколи, тощо). Тобто лише при порівнянні даних обстежень із даними за розрахунками можливо отримати коректну розрахункову модель, яка придатна для розроблення рішень щодо подальшої їх безпечної експлуатації. При цьому важливими також є дані щодо врахування фактичних механічних характеристик ґрунтової основи, яка знаходиться в тривалому циклічному процесі завантаження-розвантаження.

ЛІТЕРАТУРА

1. Carson J. Silo failures: why do they happen? / J. Carson, T. Holmes // *Task Quarterly*. 2003-7(4). – pp. 499-512.
2. Dutta A. Study of Types of Failures in Silos / A. Dutta // *GRA - Global research analysis*. 2013.

ISSN No 2277-8160. – pp. 41-43. doi: 10.36106/GJRA.

3. Дворник А.М. Основи та фундаменти циліндричних силосів для зерна / А.М. Дворник, І.Г. Любченко, В.А. Титаренко, О.В. Шидловська // *Наука та будівництво*. – 2019. – №3. – С. 12-18.
4. Мозговий А.О. Особливості конструкцій залізобетонних фундаментів силосів збільшених розмірів / А.О. Мозговий, А.А. Бутенко // *Збірник наук. пр. [УкрДУЗТ]. Сер.: Будівництво та цивільна інженерія*. – 2022. – Вип. 199. – С. 54-67.
5. Винников Ю.Л. Проблеми визначення модуля деформації замочлих лесоподібних ґрунтів / Ю.Л. Винников // *Зб. наук. праць (галузево машинобуд., буд-во) / Полт. нац. техн. ун-т ім. Юрія Кондратюка*. Вип. 3 (28). – Полтава: ПНТУ, 2010. – С. 62-68.
6. Зоценко М.Л. Особливості визначення осідань основ плитних фундаментів зернохосвищ силосного типу / М.Л. Зоценко, Ю.Л. Винников, С.Ф. Пічугін, М.В. Бібік, В.І. Марченко, М.І. Лапін // *Зб. наук. Праць (галузево машинобуд., буд-во)*. – Полтава: ПНТУ, 2009. – Вип. 2 (27). – С. 101-110.
7. Винников Ю.Л. Розрахунок фундаментної плити силосів на армованій стохастичній основі / Ю.Л. Винников, М.О. Харченко, В.І. Марченко // *Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика*. – Дніпро: ДНУЗТ, 2012. – Вип. 3. – С. 26 – 32.
8. Dhaybi M. Foundations reinforced by soil mixing: Physical and numerical approach / M. Dhaybi, A. Grzyb, R. Trunfio, F. Pellet // *Proc. of Intern. Symp. "Recent research, advances & execution aspects of ground improvement works"*. – Brussels 2012 – vol. 3 pp. 137-145.
9. Марченко В.І. Напружено-деформований стан армованих за бурозмішувальною технологією слабких глинистих основ з урахуванням чиннику часу: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.02 / Марченко Валентин Іванович. – Полтава: ПолтНТУ, 2012. – 230 с.
10. Підлуцький В.Л. Формування НДС у фундаментах зерносушильних комплексів при зміні параметрів ґрунтів / В.Л. Підлуцький, О.В. Литвин // *Основи та фундаменти: Міжвід. наук.-техн. збірник*. – К.: КНУБА. – 2020. – Вип. 41. – С. 55-63.
11. Calvello M. Selecting parameters to optimize in model calibration by inverse analysis / M. Calvello, R.J. Finno // *Computers and*

- Geotechnics*. – Evanston: Northwestern University, 2004. – 31(5), pp. 411-425. doi:10.1016/j.compgeo.2004.03.004.
12. Носенко В. Визначення напружено-деформованого стану групи паль шляхом числового моделювання їх взаємодії з основою за даними польових досліджень / В. Носенко, О. Кашоїда // *Основи та фундаменти: Міжвід. наук.-техн. збірник*. – К.: КНУБА. – 2021. – Вип. 43. – С. 87-100.
 13. Бойко І.П. Ідентифікація параметрів ґрунтів на основі результатів натурних випробувань паль / І.П. Бойко, Л.О. Скочко, М.В. Хоронжевський // *Основи і фундаменти: Міжвід. наук.-техн. збірник*. – К.: КНУБА. – 2021. – Вип. 42. – С. 9-18.
 14. Luo Z. Influence of site sampling plan on differential shallow foundation settlement prediction using conditional-random-field-based finite element method / Z. Luo, N. Luo, B. Das // *Proc. of the 20th Intern. Conf. on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*. – Sydney: Australian Geomechanics Society. – 2022. – p. 4583-4587.
 15. Ching J. Is the scale of fluctuation the only important parameter in geotechnical spatial variability? / J. Ching // *Proc. of the 20th Intern. Conf. on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*. – Sydney: Australian Geomechanics Society. – 2022. – p. 4531-4536.
 16. Dareeju B. Probabilistic modelling of shear strength parameters for tailings dam design / B. Dareeju, T. Rowles, Y. Xu // *Proc. of the 20th Intern. Conf. on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*. – Sydney: Australian Geomechanics Society. – 2022. – p. 4537-4541.
 17. ДБН В.2.1-10:2018. Основи і фундаменти будівель та споруд. – К.: Мінрегіонбуд, 2018. – 40 с.
 - 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).
 5. Vynnykov Yu.L. (2010). Problemy vyznachennia modulia deformatsii zamoklykh lesopodibnykh gruntiv [Problems of determining the modulus of deformation of dense loess soils]. *Zb. nauk. prats (haluzeve mashynobud., bud-vo)*. Poltava: PNTU, 3(28), 62-68 (in Ukrainian).
 6. Zotsenko M.L., Vynnykov Yu.L., Pichuhin S.F., Bibik M.V., Marchenko V.I., Lapin M.I. (2009). Osoblyvosti vyznachennia osidan osnov plytnykh fundamentiv zernoskhovyshch sylosnoho typu [The comparison results of determination of settlement of poor-bearing clay bases of slab foundation of the granary of silo type the method of layer-by-layer summing up and modeling by method of ultimate elements with dates of geodetic observation after total stress of the silos are presented]. *Zb. nauk. Prats (haluzeve mashynobud., bud-vo)*. Poltava: PNTU, 4(27), 101-110 (in Ukrainian).
 7. Vynnykov Yu.L., Kharchenko M.O., Marchenko V.I. (2012). Rozrakhunok fundamentnoi plyty sylosiv na armovanii stokhastychnii 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).
 8. Dhaybi M., Grzyb A., Trunfio R., Pellet F. (2012). Foundations reinforced by soil mixing: Physical and numerical approach. *Proc. of Intern. Symp. "Recent research, advances & execution aspects of ground improvement works"*. Brussels, 3, 137-145.
 9. Marchenko V.I. (2012). Napruzhenodeformovanyi stan armovanykh za burozmishuvalnoiu tekhnolohiieiu slabkykh hlynistykh osnov z urakhuvanniam chynnyku chasu [The stress-stain 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).
 10. Pidlutskyi V.L., Lytvyn O.V. (2020). Formuvannia NDS u fundamentakh zernosushlynykh kompleksiv pry zmini parametriv hruntiv [Formation of stress-strain state in the foundations of grain drying complexes when changing soil parameters]. *Osnovy ta fundamenty: Mizhvidomchyy naukovo-tekhnichnyi zbirnyk*. Kyiv: KNUBA, 41, 55-63 (in Ukrainian).

REFERENCES

1. Carson J., Holmes T. (2003). Silo failures: why do they happen? *Task Quarterly*. 7(4), 499-512.
2. Dutta A. (2013). Study of Types of Failures in Silos. *Global research analysis*. Nov. 2013. ISSN No 2277-8160, 41-43. doi: 10.36106/GJRA.
3. Dvornyk A.M., Liubchenko I.H., Tytarenko V.A., Shydlovska O.V. (2019). Osnovy ta fundamenty tsylindrychnykh sylosiv dlia zerna [Bases and foundations for grain cylindrical silos]. *Nauka ta budivnytstvo*. Kyiv: NDIBK, 3, 12-18 (in Ukrainian).
4. Mozghovyi A.O., Butenko A.A. (2022). Osoblyvosti konstruktsii zalizobetonnykh

11. Calvello M., Finno R.J. (2004). Selecting parameters to optimize in model calibration by inverse analysis. *Computers and Geotechnics*. Evanston: Northwestern University, 31(5), 411–425.
12. Nosenko V., Kashoida O. (2021). Vyznachennia napryjeno-deformovanogo stany grypi pal shliahom chislovogo modeliuvannia ih vzaie-modii z osnovoiv 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]. *Osnovu ta fundamenty: Mizhvidomchij naukovo-tekhnichnyj zbirnyk*. Kyiv: KNUBA, 43, 87-100 (in Ukrainian).
13. Boyko I.P., Skochko L.O., Khoronzhevskiy M.V. (2021). Vyznachennya parametriv gruntu za rezul'tatamy pol'ovykh vyprobuvan' pal' [Identification of soil parameters based on the results of field tests of piles]. *Osnovu i fundamenty: Mizhvidomchij naukovo-tekhnichnyj zbirnyk*. Kyiv: KNUBA, 42, 9-18 (in Ukrainian).
14. Luo Z., Luo N., Das B. (2022). Influence of site sampling plan on differential shallow foundation settlement prediction using conditional-random-field-based finite element method. *Proc. of the 20th Intern. Conf. on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*. Sydney: Australian Geomechanics Society, 4583-4587.
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. Dareeju B., Rowles T., Xu Y. (2022). Probabilistic modelling of shear strength parameters for tailings dam design. *Proc. of the 20th Intern. Conf. on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*. Sydney: Australian Geomechanics Society, 4537-4541.
17. DBN V.2.1-10:2018. (2018). *Osnovy i fundamenty budivel ta sporud*. Kyiv: Minrehionbud, 40 (in Ukrainian).

Serviceability analysis of the grain storage facilities foundations

Yuriy Vynnykov,
Maksym Kharchenko,
Valentyn Marchenko,
Oleksii Kichasov

Summary. The change in the stress-strain state is analyzed on the example of a complex underground part of silo "loess soil base – foundation strip – undersilo tunnel gallery – compacted soil base – bottom silo slab" system as an indicator for assessing the serviceability of this type of industrial structure.

Based on the analysis of existing design documentation and field surveys, the main stages of the structure's operation during its construction and subsequent operation have been identified. Finite element analysis was performed to evaluate the current technical condition of the system of bases and foundations. At the same time, the results of geodetic measurements over time were additionally used to obtain the actual stress-strain mode of the system according to the deformed scheme.

The paper focuses on the nature of the mutual influence of individual elements of the complex foundation system. The study highlights the characteristic changes in the structural scheme and the peculiarities of stress redistribution within the system at different stages of operation. Has been taken into account local soaking of the loess soil with a thickness of up to 7.2 m that was typical for the full-scale experimental object.

Particularly, the forces in the reinforced concrete members of the underground tunnel gallery of the silo have been determined. The influence of changes in the stress-strain mode of the foundation system on their operation under variable loads and impacts has been taken into account.

It has been established that the design of such complex systems still requires further research on the design schemes and situations. When designing complex foundation systems of silo, a common mistake is to incorrectly take into account the stiffness of the underground tunnel gallery, backfill under the bottom slab, and locally locked loess soils under the foundation strip. These factors have a significant impact on the overall level of reliability and faultless operation of the industrial structure as a whole.

It is also shown that it is necessary to take into account the influence of adjacent silos and the factor of asymmetry of the foundation along and across the underground gallery.

Key words. Metal silo, numerical simulation, settlement, poor-bearing soil base, stress-strain state, foundation with underground galleries.