

## МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

УДК 631.24:539.38-047.26

Ю. Л. ВИННИКОВ<sup>1</sup>, М. О. ХАРЧЕНКО<sup>2</sup>, О. С. КІЧАСОВ<sup>3\*</sup>, В. І. МАРЧЕНКО<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Кафедра «Буріння та геології», Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», Першотравневий пр., 24, Полтава, Україна, 36011, тел. +38 (067) 256 42 86, ел. пошта vunnykov@ukr.net, ORCID 0000-0003-2164-9936

<sup>2</sup> Кафедра «Буріння та геології», Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», Першотравневий пр., 24, Полтава, Україна, 36011, тел. +38 (066) 121 83 60, ел. пошта kharchenkomo@ukr.net, ORCID 0000-0002-1621-2601

<sup>3\*</sup> Кафедра «Будівництва та цивільної інженерії», Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», Першотравневий пр., 24, Полтава, Україна, 36011, тел. +38 (050) 672 16 76, ел. пошта oleksiikichasov@gmail.com, ORCID 0009-0009-6719-7892

<sup>4</sup> ТОВ «Науково-технічне підприємство «АЛЬМАГРУП», вул. Монастирська, 5а, офіс 404, м. Полтава, тел. +38 (097) 877 87 23, ел. пошта marchenkovalentyn@gmail.com, ORCID 0009-0006-9614-1765

### ДОСВІД СПОСТЕРЕЖЕННЯ ЗА СИЛОСАМИ ДЛЯ ЗЕРНА НА ПЕРІОД ВІДНОВЛЕННЯ ЇХ ЕКСПЛУАТАЦІЙНОЇ ПРИДАТНОСТІ

**Мета.** Впровадження в практику експлуатації споруд металевих силосів для довготривалого зберігання зерна комплексного підходу до моніторингу їх технічного стану, зокрема на період відновлення їх експлуатаційної придатності, а також отримання нових експериментальних даних у його процесі щодо характеру взаємного впливу групи силосів на замкнених основах, складених лесовими просадочними ґрунтами. **Методика.** На період режиму обмеженої експлуатації силосів моніторинг включав комплекс геодезичних, візуальних і інструментальних спостережень для контролю зміни технічного стану та експлуатаційних характеристик споруд. Улаштовано тимчасові ґрунтові реперні точки, прив'язані до постійних реперів, а також закріплено по 8 точок спостереження за деформаціями основ фундаментів кожного силосу. Їх осідання вимірювались шляхом геометричного нівелювання III класу точності за постійною схемою нівелірного ходу. Для визначення нерівномірності вертикальних деформацій використано метод умовної горизонтальної лінії, у якому прийнято, що на момент завершення будівництва та початку експлуатації всі характерні точки за периметром силосу знаходились на одній відмітці. На початку моніторингу графічно зафіксовано орієнтація, розміщення та ширина розкриття тріщин на поверхнях залізобетонних конструкцій вздовж підземної галереї кожного з силосів, а зміни в цих даних надалі доповнювали. **Результати.** На характерному натурному об'єкті апробовано методику геотехнічного моніторингу системи «просадочна ґрунтова основа – фундамент – металевий силос» у режимі обмеженої експлуатації разом з проведенням робіт із відновлення її експлуатаційної придатності. Шляхом недопущення подальшого замокання просадочної ґрунтової основи фундаментів силосів досягнуто зниження швидкості розвитку додаткових нерівномірних деформацій і подовження фактичного терміну експлуатації групи силосів. **Наукова новизна.** Отримано нові дані про особливості розвитку нерівномірних осідань локально замкленої просадочної ґрунтової основи фундаментів металевих силосів у часі. **Практична значимість.** Розроблено рішення щодо зменшення рівня нерівномірних деформацій просадочних основ фундаментів силосів і апробовано їх геотехнічною практикою разом із відповідною методикою геомоніторингу в режимі обмеженої експлуатації споруд.

**Ключові слова:** силос; замклена лесова просадочна основа; тріщина; нерівномірні деформації; осідання; крен; технічний стан; геодезичні спостереження; геотехнічний моніторинг

#### Вступ

Використання металевих силосів – один із найсучасніших способів для довготривалого зберігання зерна. Водночас металеві силоси є специфічним типом споруд, які мають притаманні лише їм особливості експлуатації, зокрема значна нерегулярність циклів завантаження-

розвантаження, що часто відбувається через технологічну необхідність переміщення зерна між силосами, наприклад, для його охолодження чи просушування. Також, на відміну від подібних до них резервуарів для рідин, гофровані стінки силосів для зерна (або інших сипучих матеріалів) сприймають і передають на фундаменти додаткові навантаження від тертя сипу-

чого продукту.

Крім того силоси, як правило, розміщують групами та поєднують між собою технологічними лініями, що сприяє взаємному впливові силосів, який проявляється в додаткових деформаціях їх конструкцій.

Вищезгадані особливості навантажень в поєднанні зі специфічними інженерно-геологічними та інженерно-гідрологічними умовами потребують спеціального підходу при проектуванні таких споруд, як-то врахування спільної роботи складових системи «грунтова основа – фундамент – споруда».

Нехтування таким підходом чи не врахування окремих складових системи при проектуванні, будівництві та експлуатації силосів нерідко призводить до нерівномірних осідань їх основи і порушення експлуатаційних характеристик самих силосів.

Виділимо найпоширеніші причини виникнення нерівномірних деформацій основ на різних етапах життєвого циклу силосів:

1) проектування – недостатньо повне врахування взаємовпливу складових системи (Butenko, Mozgovyi, & Spirande, 2024), некоректне врахування взаємного впливу сусідніх споруд, відсутність конструктивних заходів від замокань, у т. ч. локальних, основи, особливо за наявності просадочних ґрунтів в масиві (Santrač, Vajić, Grković, Kukaras, & Hegediš, 2015);

2) будівництво – нерівномірне ущільнення ґрунту зворотної засипки під плитою днища, недосягнення проєктного значення щільності скелету ґрунту зворотної засипки, технологічні помилки при влаштуванні водовідведення (неякісне вимощення, дренаж, тощо);

3) експлуатація – підтоплення основи внаслідок аварій водонесучих мереж або втрати спорудами водовідведення своїх експлуатаційних якостей (руйнування вимощення, замулення дренажних труб, дренажних засипок і т. ін.).

Нерівномірні осідання основ фундаментів силосів викликають крен цих споруд, що є критичним параметром експлуатаційної придатності надземних металевих елементів силосів (існує загроза втрати їх міцності та стійкості при значній втраті вертикальності). Крен є доволі поширеною проблемою для споруд, що знаходяться на підроблюваних територіях, схилах або зведені на ґрунтах з просадочними власти-

востями.

При влаштуванні фундаментів силосу на ґрунтах з особливими властивостями, у т. ч. і просадочних, щоб значно зменшити величини абсолютних і відносних осідань їх основ, доцільно використовувати пальові фундаменти, які прорізають товщу слабких чи просадочних ґрунтів.

Останнім часом у світі для використання фундаментів неглибокого закладання також вдаються до зміцнення ґрунтів їх основи. Зокрема, доволі ефективним для даного класу споруд зарекомендував себе метод армування їх основ із використанням ґрунтоцементних елементів (ГЦЕ) як при новому будівництві (Dhaybi, Grzyb, Trunfio, & Pellet, 2012; Винников, Харченко, & Марченко, 2012), так і для підсилення основ існуючих споруд.

Але перелічені популярні підходи досить складно, а іноді й неможливо, застосувати саме на етапі експлуатації споруд, які вже отримали нерівномірні осідання внаслідок помилок на різних етапах життєвого циклу об'єкта. Тому іноді доцільно використовувати й альтернативні методи «вирівнювання» споруд силосів.

Так одним з таких апробованих методів є вибурювання горизонтальних свердловин (Самченко, & Юхименко, 2020), що є доволі універсальним шляхом усунення нерівномірностей осідань основ фундаментів.

Однак практичне застосування будь-якого із методів усунення нерівномірних деформацій вимагає перш за все розуміння роботи системи «основа – фундамент – споруда», що у випадку деяких конструкцій фундаментів силосів може бути досить ускладнено.

З одного боку невизначеною є взаємодія складових елементів фундаменту (наприклад, плити днища силосу та кільцевого стрічкового фундаменту, що не з'єднані між собою), а з іншого – складністю інженерно-геологічних умов ділянки.

Варто також відмітити, що більша частина металевих силосів для зерна були споруджені ще при дії вимог ДБН В.2.2-8-98 (2005) (втратив чинність у 2022 р.), в якому обмеження на максимальну відносну різницю осідань основ фундаментів окремого металевого силосу встановлювались на рівні 0,004 (для діаметрально протилежних точок фундаменту це значення еквівалентно крену споруди).

Натомість діючим з 2022 року нормативним документом ДБН В.2.6-221:2021, що поширюється саме на металеві силоси з гофрованою стінкою, допустимі граничні значення крену фундаменту обмежуються до рівня  $i_u \leq 0,002$ . А отже, дуже значна кількість існуючих силосів можуть потребувати проведення спеціальних спостережень шляхом геотехнічного моніторингу (ДСТУ 9273:2024, 2024; ДСТУ-Н Б В.1.2-17:2016, 2017).

Організація таких спостережень виконується після складання програми моніторингу. Склад та об'єм робіт із геотехнічного моніторингу визначається відповідною програмою робіт. При складанні програми робіт слід враховувати конструктивні й експлуатаційні особливості об'єкту (Винников, & Манжалій, 2020; Butenko, Mozgovyi, & Spirande, 2024; Katzenbach, Leppla, Seip, & Kurze, 2015).

Проведення геотехнічного моніторингу включає в себе наступні етапи:

1) Підготовчий, тобто розробка і погодження технічного завдання, ознайомлення з проектом споруди та його конструктивними рішеннями, результатами інженерних вишукувань тощо.

2) Основний, який включає в себе:

- спостереження технічним станом споруди, змінами в інженерно-геологічних умовах території за періоди будівництва, експлуатації та реконструкції;

- аналіз отриманих даних, проведення розрахунків і моделювання спільної роботи системи «грунтова основа – фундамент – споруда»;

- складання прогнозу розвитку осідань і кренів фундаментів споруди;

- проведення необхідних заходів при виявленні небажаної динаміки інженерно-геологічних процесів.

3) Складання проміжних і підсумкових звітів за результатами виконання спостережень (висновки, проміжні звіти, акти, а також розрахунки та матеріали обстежень технічного стану споруди).

Для об'єктів класу наслідків (відповідальності) СС3 передбачено використовувати автоматичні системи моніторингу (ДСТУ-Н Б В.1.2-17:2016, 2017).

З розвитком технології стають доступними й нові методи отримання та відображення інформації результатів геотехнічного моніторин-

гу (Самченко, & Юхименко., 2020); Бегічев, & Ішутіна, 2023).

Наприклад, вже набуває поширення метод створення цифрових двійників (Digital twins) з інтеграцією отриманих результатів вимірювань (Pawlik, Rudolph, Bernsdorf, Goerke-Mallet, Hegemann, & GeLLendin, 2023).

Підхід до визначення особливостей геотехнічного моніторингу за станом основ і фундаментів металевих силосів повинен проводитись не лише, виходячи з набору конструкцій певного типу чи відповідно до матеріалу їх виготовлення (ДСТУ 9273:2024, 2024), але й адаптуватись під конструктивні та технологічні особливості об'єкта, в т. ч. з урахуванням можливого впливу сусідніх споруд.

Однак для металевих силосів наразі відсутня достатня кількість матеріалів, що відображають ці особливості для різних етапів їх експлуатації.

Діючими нормами (ДБН В.2.2-8-98, 2005) передбачено проведення геодезичних спостережень при первинному циклі завантаження-розвантаження, яке проводять для забезпечення рівномірного обтиснення конструкцій та основ силосів, уникнення виникнення перекосів і перевантаження окремих конструкцій.

На сьогодні будівництво нових або розширення існуючих потужностей для зберігання зернових у багатьох регіонах призупинено, що робить питання підтримання чи відновлення експлуатаційної придатності існуючих силосів ще більш актуальним.

## Мета

Тому за мету роботи прийнято впровадження в практику експлуатації споруд металевих силосів для довготривалого зберігання зерна комплексного підходу до моніторингу їх технічного стану, зокрема на період відновлення їх експлуатаційної придатності, а також отримання нових експериментальних даних у його процесі щодо характеру взаємного впливу групи силосів на замкнених основах, складених лесовими просадочними ґрунтами.

## Методика

На період режиму обмеженої експлуатації групи силосів було розроблено програму моніторингу, що включала в себе проведення ком-

## МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

плексу геодезичних, а також групи візуальних та інструментальних спостережень для контролю зміни технічного стану й експлуатаційних характеристик споруд.

Проведення геодезичного моніторингу, зокрема, передбачало створення системи тимчасового спостереження.

На першому етапі було проведено розробку її топографічної основи, що включала також вибір конструкції геодезичних знаків висотної основи та місця їх встановлення.

Для нівелювання III класу точності, в якості геодезичних знаків висотної основи, передбачено улаштування вже апробованих конструкцій ґрунтових реперів (ДСТУ Б В.2.1-30:2014, 2015).

При цьому основа репера закладається нижче рівня сезонного промерзання ґрунтів. На території підприємства було встановлено три реperi (рис. 1).

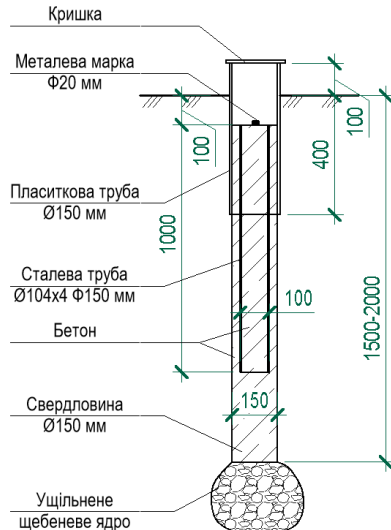


Рис. 1. Конструкція ґрунтового репера

При виборі місця влаштування реперів було враховано наступні вимоги (ДБН В.1.3-2:2010, 2010; ДСТУ Б В.2.1-30:2014, 2015):

- осторонь від проїздів, підземних комунікацій, складських та інших територій, де є можливим руйнування чи зміна положення репера;
- поза зоною поширення тиску від будинку або споруди;
- поза межами впливу явищ осідання, зсувних схилів, нестабілізованих насипів, торф'яних боліт, підземних виробок, карстових утворень та інших несприятливих інженерно-

геологічних і гідрогеологічних умов;

- на відстані від споруди (будинку), яка не менша, ніж величина потрійної сумарної товщини шарів просадочних ґрунтів;

- на відстані, яка виключає вплив вібрації від транспортних засобів, машин, механізмів;

- у місцях, де протягом усього періоду спостережень є можливим безперешкодний і зручний підхід до реперів для установки геодезичних інструментів.

Ця група тимчасових реперів була прив'язана до системи постійних реперів, що вже знаходились на території підприємства та були попередньо прив'язаними до пунктів державної геодезичної мережі.

Наступним кроком стало закріплення точок спостереження за деформаціями основ фундаменту силосів.

Для цього за периметром кожного силосу рівномірно розміщено 8 точок спостереження, які були замарковані на стінці силосу фарбою у вигляді цифр біля відповідного вертикального ребра жорсткості (рис. 2).

Кількість вимірюваних точок обиралась з огляду на особливості конструктивної схеми фундаментів споруди.



Рис. 2. Приклад маркування постійних точок вимірювання осідань фундаменту силосів

#### Методика проведення геодезичних спостережень

Вертикальні переміщення основ фундаментів силосів вимірювались шляхом геометричного нівелювання.

Згідно (ДСТУ Б В.2.1-30:2014, 2015) та результатів інженерно-геологічних вишукувань прийнято нівелювання III класу точності. Для

цього використано точний нівелір типу Н-2 й інвентарну телескопічну рейку з вбудованим водним рівнем.

Задля зменшення кількості можливих похибок, вимірювання на майданчику проводили за постійною схемою нівелірного ходу (рис. 3). Різниця перевишень, одержаних по передній і задній сторонах рейки, не перевищувала  $\pm 3$  мм, а допустима нев'язка у замкненому ході не пе-

ревищувала  $\pm 1,5\sqrt{n}$ , де  $n$  – кількість станцій в ході.

По завершенню кожного циклу вимірювань проводилась камеральна обробка отриманих результатів. Вона включала в себе фіксацію висотних відміток точок спостереження та визначення величин вертикальних деформацій порівняно з попередніми стадіями спостереження.

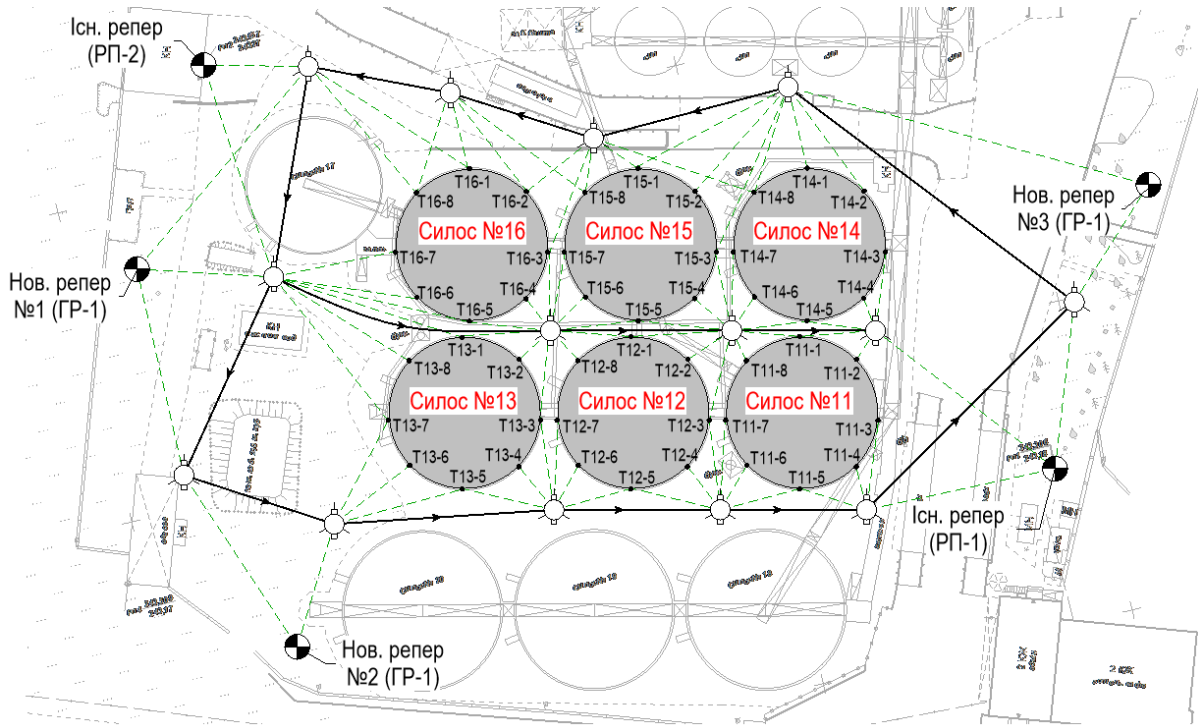


Рис. 3. Постійна схема нівелірного ходу на майданчику

#### Метод умовної горизонтальної лінії

Також задля визначення нерівномірності вертикальних деформацій використано, так званий, метод умовної горизонтальної лінії, при якому вважається, що на період завершення будівництва та початку експлуатації групи силосів, всі характерні точки за периметром окремого силосу знаходились на одній відмітці. В даному випадку за точку відліку прийнято верхню грань металевих опорних плит вертикальних ребер жорсткості. Оскільки кожна опорна металева плита вертикального ребра жорсткості з'єднана зі стрічковим кільцевим фундаментом силосу за допомогою анкерного болта, то було прийнято припущення про тотожність вертикальних переміщень точок окремої плити та точок фундаменту в зоні їх контакту.

Цей метод дає можливість визначити вели-

чини нерівномірних деформацій, що виникли за період експлуатації споруди.

Виникнення початкових нерівномірних деформацій за периметром фундаменту силосу через недоліки будівництва є малоймовірним через такі причини:

1. Гофровані металеві панелі та вертикальні ребра жорсткості мають попередньо просвердлені на заводі-виробнику отвори під болти, що гарантує правильність геометричної форми після завершення монтажу.

2. При монтажі опорні пластини вертикальних ребер жорсткості вивіряються за висотою.

3. Відповідно до особливостей конструкції фундаменту, а саме плита днища відділена від стрічкового фундаменту, існування такої нерівномірності на момент завершення будівництва призвело би до виходу грані плити днища за



## МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

вертикальний габарит стрічки.

4. Напрямок максимальних нерівномірних деформацій за периметром фундаментів групи силосів відповідає зонам найбільших періодичних замокань основи.

Відповідно до наведеної аргументації вважаємо в даному випадку коректним використати методу умовної горизонтальної лінії для визначення нерівномірних вертикальних переміщень.

#### Візуальний та інструментальний методи

У вигляді доповнення до геодезичного вимірювання вертикальних переміщень стрічкового фундаменту силосу та з метою встановлення зміни експлуатаційних характеристик підземної галереї здійснювались її візуальні та інструментальні обстеження.

На першому етапі моніторингу було проведене графічне фіксування орієнтації, розміщення та ширини розкриття тріщин на поверхнях залізобетонних конструкцій вздовж підземної галереї кожного з силосів. У подальшому відбувались ретельні огляди задля виявлення утворення нових чи додаткового розкриття існуючих тріщин.

### Результати

Колективом авторів у 2022 р. було проведено обстеження технічного стану групи з 6 силосів на території ТОВ «Кононівський елеватор» в с. Поминник Маньківського району Черкаської обл. Всі силоси були виконані за єдиним проектом, кожен має діаметр 23,78 м і може вмістити до 6000 т зерна (рис. 4).



Рис. 4. Фрагмент карти із розміщенням групи силосів

При цьому було встановлено, що технічний стан всіх силосів – незадовільний. Причиною цього став ряд факторів, що мають різне походження (Винников, Харченко, Марченко, & Кічасов, 2023).

На рівні проекту присутня явна невідповідність інженерно-геологічних умов майданчика й обраної конструкції фундаментів. Конструктивно фундаменти складаються зі стрічкового кільцевого фундаменту та плити днища, що лежить на ущільненій ґрунтовій основі, а підстилаючим ґрунтовим шаром обох елементів є лесові суглинки, що залягають до глибини 7,2 м і мають просадочні властивості.

Зворотнім розрахунком було додатково встановлено, що в проекті невірно враховано вплив додаткового привантаження внутрішнього виступу стрічкового фундаменту від плити днища (рис. 5).

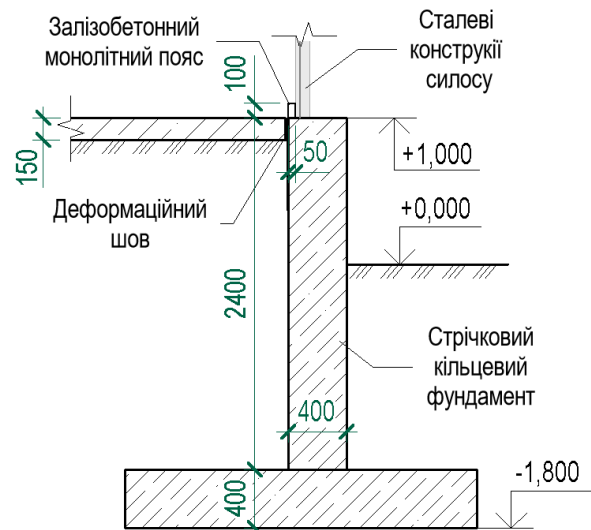


Рис. 5. Конструктивна схема фундаменту силосу

Шляхом візуального обстеження разом із проведенням нівелювання плити днища було з'ясовано, що плити днища кожного з силосів мають значні перекося. Це дозволило зробити висновок про неякісне ущільнення ґрунту зворотної засипки на етапі будівництва.

Іншою групою факторів, які вплинули на формування технічного стану силосів, були недоліки їх експлуатації.

Відсутність нормального водовідведення атмосферних опадів на ділянці розміщення силосів, наявність пошкоджень в існуючому вимощенні та підтоплення ділянки через несправність водонесучих підземних комунікацій ви-

кликали тривале нерівномірне (локальне) замokання лесової просадочної основи фундаментів і, як наслідок, збільшення їх нерівномірних осідань.

В результаті відбувся перерозподіл навантажень в системі «просадочна ґрунтова основа – фундамент – металевий силос» з подальшим утворенням серії поперечних тріщин у конструкціях підсилосної галереї та за периметром стрічкового кільцевого фундаменту.

Моделювання поведінки системи «просадочна ґрунтова основа – фундамент – металевий силос» з урахуванням встановленої історії зміни умов експлуатації силосів показало, що в поточному стані підземна галерея не має додаткового резерву несучої здатності, а коефіцієнт її використання становить 1,0 (Винников, Харченко, Марченко, & Кічасов, 2023).

Враховуючи перелічені обставини, було прийнято рішення про впровадження для даної групи силосів режиму обмеженої експлуатації на період проведення заходів щодо відновлення їх експлуатаційної придатності з одночасним встановленням програми геодезичного моніторингу.

До цього переліку заходів, зокрема, входили:

- повний демонтаж існуючого вимощення та перепланування системи водовідведення на всій ділянці розміщення силосів;
- відновлення пошкоджених морозобійним руйнуванням ділянок стрічкового кільцевого фундаменту;
- ремонт тріщин підземної галереї шляхом ін'єктування в них спеціальних ремонтних сумішей;
- відновлення деформаційних швів підземної галереї.

Повна заміна вимощення разом із вертикальним плануванням системи водовідведення в межах всієї ділянки розташування силосів мала на меті уникнути подальшого замokання просадочної ґрунтової основи споруд.

Тим часом роботи з відновлення пошкоджених ділянок стрічкового фундаменту та ін'єктування тріщин підземних галерей сприяли деякому відновленню просторової жорсткості конструкцій фундаменту силосів і недопущенню його подальшого руйнування внаслідок замokання основи. На жаль, наявні методики не дозволяють кількісно оцінити ступінь віднов-

лення характеристик жорсткості для подібного класу споруд.

Протягом 2023-2024 рр. було проведено два цикли вимірювань (не враховуючи нульового циклу, що слугував за точку відліку).

Результати нівелювання периметру силосів протягом вказаного періоду часу наведено в табл. 1.

Також додатково зібрано дані про рівень наповненості (%) силосів на момент проведення вимірювань, оскільки це забезпечує розуміння повної картини поведінки об'єктів моніторингу (табл. 2).

Провівши додаткову обробку даних для кожного силосу й використавши метод умовних горизонтальних ліній, отримуємо значення нерівномірних осідань основ фундаментів відносно точки спостереження з найвищою відміткою за периметром силосів на період нульового циклу вимірювань (рис. 6). Отримані діаграми дають змогу візуально визначити основні напрямки розвитку нерівномірних деформацій споруд силосів.

З аналізу діаграм нерівномірних деформацій нульового циклу спостережень можливі певні узагальнення, зокрема про те, що її форму для всіх силосів можна наближено прийняти за еліптичну, при цьому відсутні явні «стрибки» значень осідань між сусідніми точками спостережень, утворення «кутів», «переломів», несиметричності тощо.

Тобто, не зважаючи на такі істотні фактори, як нерівномірне (локальне) замokання лесової просадочної основи споруд, утворення значної кількості поперечних тріщин у підземній галереї і фізичну відділеність плити днища та кільцевого стрічкового фундаменту, все-таки зберіглася взаємодія між складовими системи «основа – фундамент – силос».

Для всіх силосів зафіксовано значні нерівномірності деформацій, а величини максимального крену сильно перевищують їх граничні значення (табл. 3). Так для силосу № 15 на нульовому циклі вимірювань зафіксовано найбільшу нерівномірність осідань, що склала  $\Delta s_0=236$  мм і відповідає крену  $i_0 = 0,0099$ , що в 4,95 разів перевищує його граничне значення.

Попри значні перевищення величин допустимих кренів для кожного із силосів, результати обчислених нерівномірних деформацій між сусідніми точками за периметром кожного з

## МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

силосів вказують, що характер зміни їх значень відповідає прийнятій картині розвитку нерівномірних деформацій. Це дозволяє зробити важливий практичний висновок, що незважаючи на утворення тріщин в підсилосній галереї та

стрічковому кільцевому фундаменті споруди силосу, надземна металева і підземна бетонна частини силосу продовжують працювати як одна споруда.

Таблиця 1

## Результати геодезичних спостережень за осіданнями основ силосів

Точка фіксації осідань	цикл 0 (05.05.23)	цикл 1 (28.09.23)	цикл 2 (17.07.24)	Точка фіксації осідань	цикл 0 (05.05.23)	цикл 1 (28.09.23)	цикл 2 (17.07.24)
<b>Силос №11</b>				<b>Силос №14</b>			
T11.1	244017	244017	244014	T14.1	244180	244180	244182
T11.2	244047	244046	244042	T14.2	244182	244179	244180
T11.3	244094	244099	244097	T14.3	244140	244136	244137
T11.4	244094	244098	244097	T14.4	244103	244099	244100
T11.5	244049	244054	244051	T14.5	244061	244056	244056
T11.6	244020	244025	244021	T14.6	244050	244043	244043
T11.7	243976	243978	243976	T14.7	244075	244071	244071
T11.8	243987	243983	243981	T14.8	244141	244137	244137
<b>Силос №12</b>				<b>Силос №15</b>			
T12.1	243947	243946	243943	T15.1	244220	244222	244222
T12.2	243953	243954	243953	T15.2	244216	244217	244215
T12.3	244004	244009	244007	T15.3	244130	244126	244124
T12.4	244075	244078	244078	T15.4	244046	244042	244038
T12.5	244125	244129	244129	T15.5	243986	243982	243978
T12.6	244110	244113	244113	T15.6	243984	243981	243979
T12.7	244035	244035	244038	T15.7	244019	244020	244018
T12.8	243972	243971	243970	T15.8	244132	244135	244135
<b>Силос №13</b>				<b>Силос №16</b>			
T13.1	244034	244029	244029	T16.1	244066	244067	244068
T13.2	244013	244007	244007	T16.2	243995	243994	243996
T13.3	244037	244036	244036	T16.3	243962	243962	243962
T13.4	244090	244089	244089	T16.4	244006	244007	244008
T13.5	244133	244132	244131	T16.5	244072	244071	244072
T13.6	244144	244142	244140	T16.6	244145	244145	244146
T13.7	244128	244126	244126	T16.7	244163	244162	244163
T13.8	244086	244083	244084	T16.8	244120	244121	244121

Таблиця 2

## Наповненість силосів протягом циклів вимірювань, %

Номер силоса	№11	№12	№13	№14	№15	№16
цикл 0 (05.05.2023)	100	100	0	100	100	0
цикл 1 (28.09.2023)	0	0	10	100	0	18
цикл 2 (17.07.2024)	38	0	0	0	42	0



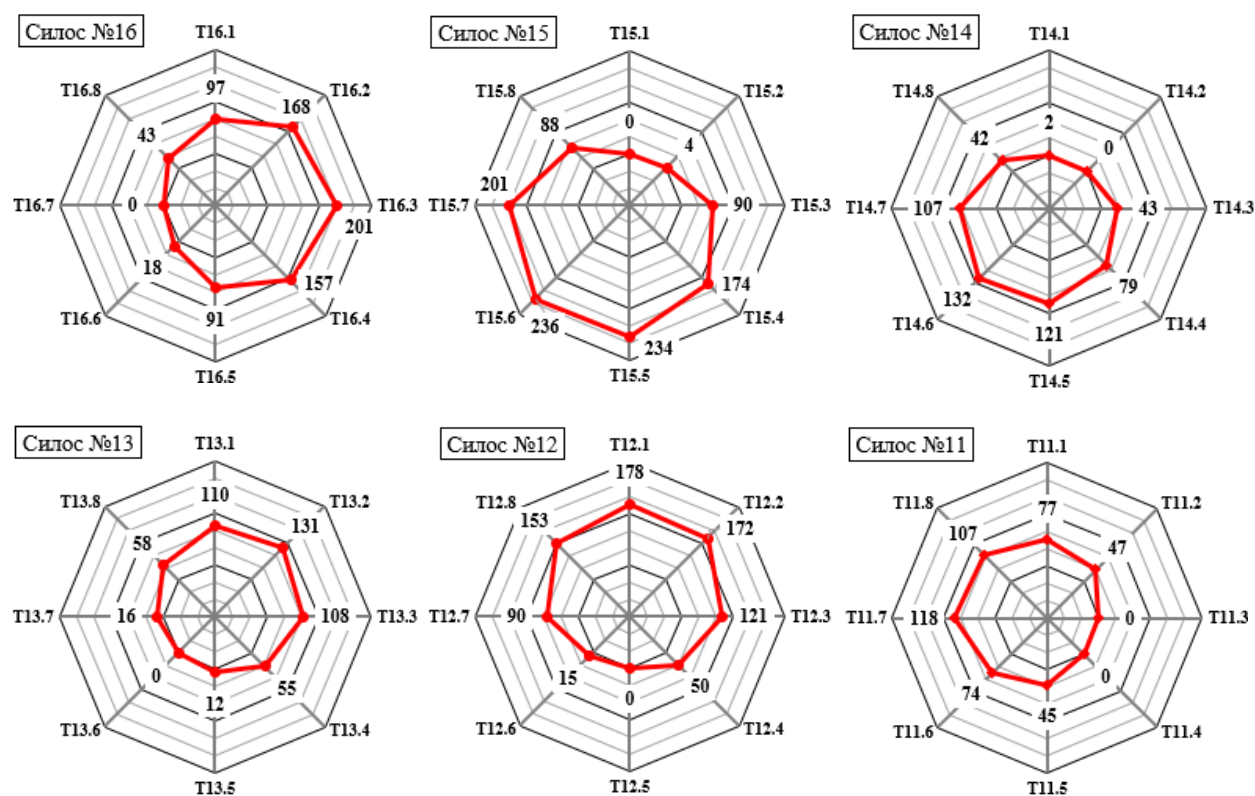


Рис. 6. Діаграми нерівномірних осідань основ фундаментів відносно точки спостереження з найвищою відміткою за периметром силосів на момент нульового циклу вимірювань, мм

Таблиця 3

Результати обчислення кренів фундаментів силосів

Номер силоса	№11	№12	№13	№14	№15	№16
Максимальна різниця осідань при нульовому циклі спостережень, $\Delta s_0$ , мм, за методом умовної горизонтальної лінії	118	178	131	132	236	201
Діаметр силосу, D, м	23,78					
Граничне значення крену, $i_u$	0,002					
Фактичне значення крену при нульовому циклі спостережень, $i_0$	0,0050	0,0075	0,0055	0,0056	0,0099	0,0084
Співвідношення $i_0/i_u$ , %	248	374	275	278	495	422
Максимальна різниця осідань за весь час спостережень, $\Delta s_2$ , мм	121	186	134	139	244	202
Фактичне значення крену за весь час спостережень, $i_2$	0,0051	0,0078	0,0056	0,0058	0,0103	0,0085
Приріст значення крену за період спостережень, %	2,5	4,5	1,9	5,3	3,6	0,5

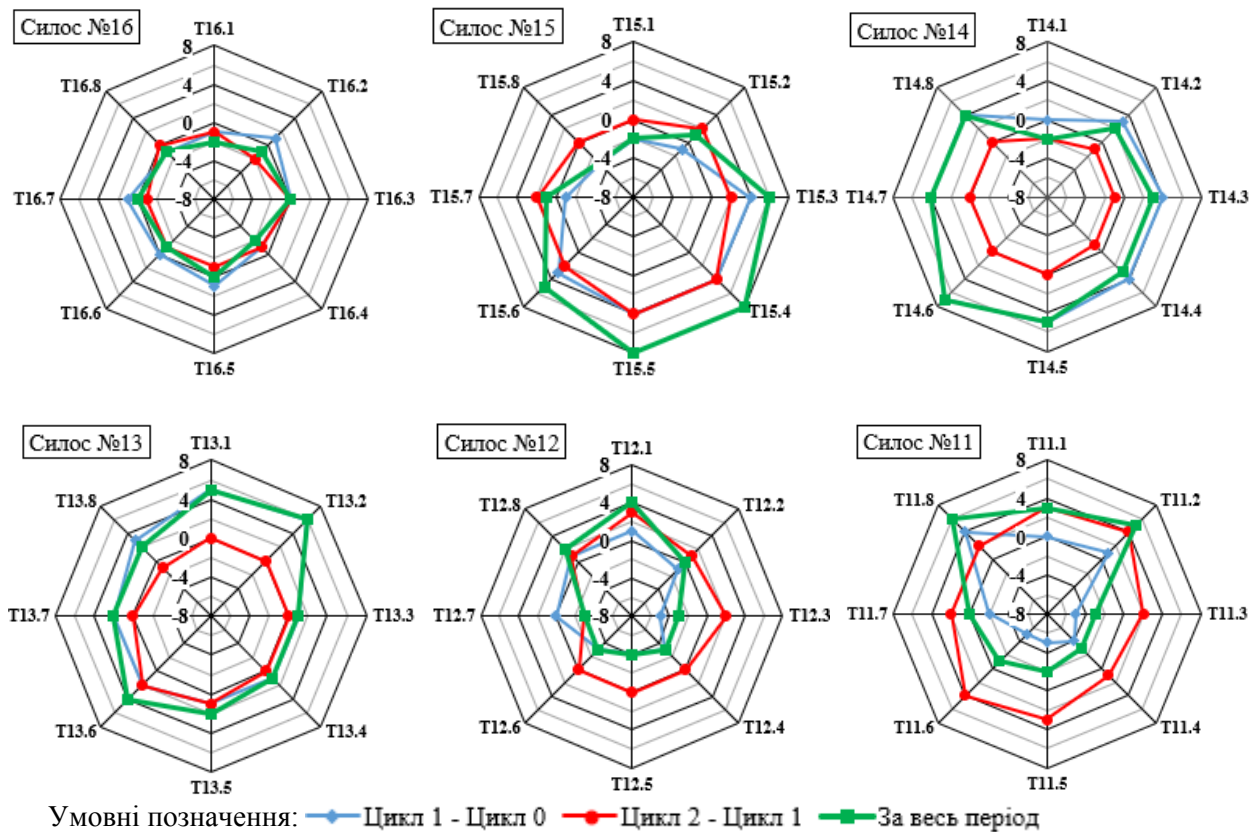


Рис. 7. Діаграми додаткових вертикальних переміщень основ фундаментів силосів у процесі геодезичних спостережень, мм

Проаналізуємо результати, подані у вигляді діаграм додаткових вертикальних переміщень основ фундаментів, отриманих на різних циклах геодезичних спостережень (рис. 7), на прикладі силосу № 15. Даний силос на момент нульового циклу вимірювань мав найбільші значення крену по лінії T15.2-T15.6. Цей напрямок чітко вказує на виявлену зону максимальних замокань просадочної основи на ділянці між силосами №15, 16 та №12, 13 (див. рис. 3).

Між нульовим і першим циклами вимірювань проведено роботи щодо мінімізації рівня подальшого замокання основи шляхом повної заміни вимощення та вертикального планування території. І вже на першому циклі помітно зміну основного напрямку розвитку нерівномірних осідань. Результати другого циклу вимірювань чітко формують нову лінію максимального приросту осідань між точками T15.8-T15.4. Різниця осідань між другим і нульовим циклами осідань точок спостереження для групи силосів знаходиться в межах від -5 мм до 8 мм, де від'ємні значення відповідають підйо-

му точки спостереження.

Значення крену для всіх фундаментів силосів за час спостережень отримало додатковий приріст, що коливається в межах 0,5...5,3 %.

При цьому після виконання ремонтних робіт між нульовим і першим циклами вимірювань не було зафіксовано утворення нових або розкриття старих тріщин у підсилосних галереях. Отже, можна зробити висновок, що швидкість розвитку додаткових осідань основи фундаментів сповільнилась і дозволила всій системі «просадочна ґрунтова основа – фундамент – металевий силос» адаптуватись до зміни напружено-деформованого стану.

Наразі було рекомендовано продовжити спостереження за змінами технічного стану силосів у межах прийнятої програми моніторингу.

#### Наукова новизна та практична значимість

Розроблено рішення щодо зменшення рівня нерівномірних деформацій просадочних основ фундаментів силосів і апробовано їх геотехніч-

ною практикою разом із відповідною методикою геомоніторингу в режимі обмеженої експлуатації споруд.

Отримано нові дані про особливості розвитку нерівномірних осідань локально замклої просадочної ґрунтової основи фундаментів металевих силосів у часі.

Результати геотехнічного моніторингу дають можливість більш достовірно кількісно оцінити вплив зменшення замккання просадочної ґрунтової основи фундаментів металевих силосів на подальший розвиток їх нерівномірних деформацій, а також уточнити параметри розрахункової моделі для врахування особливостей зміни напружено-деформованого стану системи «просадна ґрунтова основа – фундамент – металевий силос» в режимі обмеженої експлуатації споруд.

У подальшому заплановано, так зване, зворотне чисельне моделювання роботи системи «просадочна ґрунтова основа – фундамент – металевий силос» групи споруд задля:

- кількісного оцінювання рівня взаємного впливу суміжних силосів на осідання їх основи з урахуванням фактору несиметричності відносно їх поздовжньої та поперечної осей;

- оцінювання напружено-деформованого стану елементів системи «просадочна ґрунтова основа – фундамент – металевий силос» з урахуванням їх фактичного деформованого стану, в т. ч. наявності тріщин у залізобетонних елементах.

### Висновки

Таким чином, на характерному натурному об'єкті апробовано методику геотехнічного моніторингу системи «просадочна ґрунтова основа – фундамент – металевий силос» у режимі обмеженої експлуатації разом з проведенням робіт із відновлення її експлуатаційної придатності.

Шляхом недопущення подальшого замккання просадочної ґрунтової основи фундаментів силосів досягнуто зниження швидкості розвитку додаткових нерівномірних деформацій і подовження фактичного терміну експлуатації групи силосів.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

Butenko, A. A., Mozgovyi, A. O. & Spirande, K. V. (2024). The improvement of the slab-ring founda-

tion 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.

Dhaybi, M., Grzyb, A., Trunfio, R., & Pellet, F. (2012). Foundations reinforced by soil mixing: Physical and numerical approach. *Intern. Symp. Recent research, advances & execution aspects of ground improvement works*, 3.

Katzenbach, R. Leppla, S, Seip, M., & Kurze, S. (2015) Value Engineering as a basis for safe, optimized and sustainable design of geotechnical structures. *Proc. of the XVI European Conf. on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering for Infrastructure and Development*. Edinburgh. 601-606.

Pawlik, M., Rudolph, T., Bernsdorf, B., Goerke-Mallet, P., Hegemann, M., & GeLLendin, M. (2023). Digital Twin-Integrated Geomonitoring. *Mining Report*, 159(2).

Santrač, P., Bajić, Ž., Grković, S., Kukaras, D., & Hegediš, I. (2015). Analysis of calculated and observed settlements of the silo on loess. *Tehnicki vjesnik-Technical Gazette*, 22(2), 539-545.

ДБН В.1.3-2:2010 (2010). Система забезпечення точності геометричних параметрів у будівництві. *Геодезичні роботи у будівництві. Зі Зміною № 1*. Київ: Мінрегіон України.

ДБН В.2.2-8-98 (2005). Будинки і споруди. Підприємства, будівлі і споруди по зберіганню та переробці зерна. *Зі зміною № 1*. Київ: Держбуд України.

ДСТУ-Н Б В.1.2-17:2016 (2017). Настанова щодо науково-технічного моніторингу будівель та споруд. Київ: ДП «УкрНДНЦ».

ДСТУ Б В.2.1-30:2014 (2015). Ґрунти. Методи вимірювання деформацій основ будинків і споруд. Київ: Мінрегіон України.

ДБН В.2.6-221:2021 (2022). Конструкції силосів сталевих з гофрованою стінкою для зерна. Основні положення. Київ: Мінрегіон України.

ДСТУ 9273:2024 (2024). Настанова щодо обстеження будівель і споруд для визначення та оцінювання їхнього технічного стану. *Механічний опір та стійкість*. Київ: Мінрегіон України.

Бегічев, С. В., & Ішутіна, Г. С. (2023). Актуалізація технологій геомоніторингу як фактора забезпечення безпечної експлуатації будівель і споруд. *Український журнал будівництва та архітектури*, 4(016), 17-26.

Винников, Ю. Л., & Манжалій, С. М. (2020). Удосконалення геотехнічного моніторингу підсилення деформованої будівлі на пальовому фундаменті. *Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика*, 18, 28-39.

## МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

Винников, Ю., Харченко, М., Марченко, В. & Кічасов, О. (2023). Аналіз експлуатаційної придатності фундаментів споруд для зберігання зерна. *Основи та фундаменти*, 46, 63-72.

Винников, Ю., Харченко, М., & Марченко, В. (2012). Розрахунок фундаментної плити силосів на армованій стохастичній основі. *Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика*, 3, 26-32.

Ісасв, О. П., Адаменко, О. В., Шульц, Р. В., Білоус, М. В., Кривий, О. П., & Хайлак, А. М. (2013).

Геодезичний моніторинг – з досвіду виконання геодезичних робіт кафедри інженерної геодезії КНУБА. *Містобудування та територіальне планування*, 47, 265-277.

Самченко, Р., & Юхименко, А. (2020). Про технології забезпечення експлуатаційної надійності відновлених деформованих будівель. *Науковий вісник будівництва*, 100(2), 137-142.

YU. L. VYNNYKOV<sup>1</sup>, M. O. KHARCHENKO<sup>2</sup>, O. S. KICHASOV<sup>3\*</sup>, V. I. MARCHENKO<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Department "Drilling and Geology", National university "Yuri Kondratyuk Poltava polytechnic", Pervomaysky av., 24, Poltava, Ukraine, 36011, tel. +38 (067) 256 42 86, e-mail: vynnykov@ukr.net, ORCID 0000-0003-2164-9936

<sup>2</sup> Department "Drilling and Geology", National university "Yuri Kondratyuk Poltava polytechnic", Pervomaysky av., 24, Poltava, Ukraine, 36011, tel. +38 (066) 121 83 60, e-mail: kharchenkomo@ukr.net, ORCID 0000-0002-1621-2601

<sup>3\*</sup> Department «Architecture and Urban Construction», National university "Yuri Kondratyuk Poltava polytechnic", Pervomaysky av., 24, Poltava, Ukraine, 36011, tel. +38 (050) 672 16 76 e-mail: oleksiikichasov@gmail.com, ORCID 0009-0009-6719-7892

<sup>4</sup> LLC STE ALMAGROUP, street Monastyr'ska, 5a, Poltava, Ukraine, tel. +38 (097) 877 87 23, e-mail: marchenkovalentyyn@gmail.com, ORCID 0009-0006-9614-1765

## EXPERIENCE IN MONITORING GRAIN SILOS DURING THE PERIOD OF RESTORATION OF THEIR OPERATIONAL SERVICEABILITY

**Purpose.** Implement a comprehensive approach to monitoring the technical condition of metal silo structures used for long-term grain storage, particularly during the period of restoring their serviceability. This also involves obtaining new experimental data regarding the mutual influence of a group of silos on subsiding bases composed of loess collapsible soils. **Methodology.** During the period of limited silo operation, the monitoring included a comprehensive set of geodetic, visual, and instrumental observations to track changes in the technical condition and operational characteristics of the structures. Temporary ground benchmarks were established and tied to permanent benchmarks, with 8 observation points fixed to monitor foundation deformations of each silo. Their settlements were measured using third-class precision geometric leveling according to a consistent leveling scheme. To determine the unevenness of vertical deformations, the method of a conditional horizontal line was used, assuming that all characteristic points along the silo's perimeter were at the same level at the end of construction and the start of operation. At the beginning of the monitoring, the orientation, placement, and width of cracks on the surfaces of reinforced concrete structures along the underground gallery of each silo were graphically recorded, and subsequent changes in these data were documented. **Findings.** A methodology for geotechnical monitoring of the 'collapsible soil – foundation – metal silo' system was tested on a characteristic field object under limited operation conditions, along with work to restore its operational serviceability. By preventing further wetting of the collapsible soil foundation of the silos, the rate of additional uneven deformations was reduced, thereby extending the actual service life of the group of silos. **Originality.** New data has been obtained regarding the characteristics of the development of uneven settlements of locally saturated collapsible soil foundations of metal silo foundations over time. **Practical value.** Solutions have been developed to reduce the level of uneven deformations of collapsible soils of silo foundations and have been tested in geotechnical practice along with the corresponding geomonitoring methodology under limited operation conditions of the structures.

**Keywords:** silo; saturated loess collapsible soil; crack; uneven deformations; settlement; tilt; technical condition; geodetic observations; geotechnical monitoring

REFERENCES

- 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. (in English)
- Dhaybi, M., Grzyb, A., Trunfio, R., & Pellet, F. (2012). Foundations reinforced by soil mixing: Physical and numerical approach. *Intern. Symp. Recent research, advances & execution aspects of ground improvement works*, 3. (in English)
- Katzenbach, R. Leppla, S, Seip, M., & Kurze, S. (2015) Value Engineering as a basis for safe, optimized and sustainable design of geotechnical structures. *Proc. of the XVI European Conf. on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering for Infrastructure and Development*. Edinburgh. 601-606. (in English)
- Pawlik, M., Rudolph, T., Bernsdorf, B., Goerke-Mallet, P., Hegemann, M., & GeLLendin, M. (2023). Digital Twin-Integrated Geomonitoring. *Mining Report*, 159(2). (in English)
- Santrač, P., Bajić, Ž., Grković, S., Kukaras, D., & Hegediš, I. (2015). Analysis of calculated and observed settlements of the silo on loess. *Tehnicky vjesnik-Technical Gazette*, 22(2), 539-545. (in English)
- DBN V.1.3-2:2010 (2010). *Systema zabezpechennia tochnosti heometrychnykh parametriv u budivnytstvi. Heodezychni roboty u budivnytstvi. Zi Zminoiu № 1*. Kyiv: Minrehion Ukrainy. (in Ukrainian)
- DBN V.2.2-8-98 (2005). *Budynky i sporudy. Pidprijemstva, budivli i sporudy po zberihanniu ta pererobtsi zerna. Zi zminoiu № 1*. Kyiv: Derzhbud Ukrainy. (in Ukrainian)
- DSTU-N B V.1.2-17:2016 (2017). *Nastanova shchodo naukovo-tekhnichnoho monitorynhu budivel ta sporud*. Kyiv: DP «UkrNDNTs». (in Ukrainian)
- DSTU B V.2.1-30:2014 (2015). *Grunty. Metody vymiriuvannia deformatsii osnov budynkiv i sporud*. Kyiv: Minrehion Ukrainy. (in Ukrainian)
- DBN V.2.6-221:2021 (2022). *Konstruksii sylosiv stalevykh z hofrovanoiu stinkoioiu dlia zerna. Osnovni polozhennia*. Kyiv: Minrehion Ukrainy. (in Ukrainian)
- DSTU 9273:2024 (2024). *Nastanova shchodo obstezhennia budivel i sporud dlia vyznachennia ta otsiniuvannia yikhnoho tekhnichnoho stanu. Mekhanichniy opir ta stiikist*. Kyiv: Minrehion Ukrainy. (in Ukrainian)
- Biehichev, S. V., & Ishutina, H. S. (2023). Aktualizatsiia tekhnolohii heomonitorynhu yak faktora zabezpechennia bezpechnoi ekspluatatsii budivel i sporud. *Ukrainskyi zhurnal budivnytstva ta arkhitektury*, 4(016), 17-26. (in Ukrainian)
- Vynnykov, Yu. L., & Manzhaliy, S. M. (2020). Udoskonalennia heotekhnichnoho monitorynhu pidsylennia deformovanoi budivli na palovomu fundamenti. *Mosty ta tuneli: teoriia, doslidzhennia, praktyka*, 18, 28-39. (in Ukrainian)
- Vynnykov, Yu., Kharchenko, M., Marchenko, V. & Kichasov, O. (2023). Analiz ekspluatatsiinoi prydatnosti fundamentiv sporud dlia zberihannia zerna. *Osnovy ta fundamenty*, 46, 63-72. (in Ukrainian)
- Vynnykov, Yu., Kharchenko, M., & Marchenko, V. (2012). Rozrakhunok fundamentnoi plyty sylosiv na armovanii stokhastychnii osnovi. *Mosty ta tuneli: teoriia, doslidzhennia, praktyka*, 3, 26-32. (in Ukrainian)
- Isaiev, O. P., Adamenko, O. V., Shults, R. V., Bilous, M. V., Kryvyi, O. P., & Khailak, A. M. (2013). Heodezychni monitorynh – z dosvidu vykonannia heodezychnykh robot kafedry inzhenernoi heodezii KNUBA. *Mistobuduvannia ta terytorialne planuvannia*, 47, 265-277. (in Ukrainian)
- Samchenko, R., & Yukhymenko, A. (2020). Pro tekhnolohii zabezpechennia ekspluatatsiinoi nadiinosti vidnovlenykh deformovanykh budivel. *Naukovi visnyk budivnytstva*, 100(2), 137-142. (in Ukrainian)

Надійшла до редколегії 13.10.2024.

Прийнята до друку 28.10.2024.