

А.А. Бутенко, А.О. Мозговий

Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова, Україна

РЕЗУЛЬТАТИ МОНІТОРИНГУ ОСІДАНЬ ОСНОВ ФУНДАМЕНТІВ СИЛОСІВ, АРМОВАНИХ ГРУНТОЦЕМЕНТНИМИ ЕЛЕМЕНТАМИ

Метою дослідження є удосконалення методики обробки результатів геодезичного моніторингу фундаментів сталевих силосів силосного корпусу протягом першого циклу завантаження на основі застосування гіпотези лінійного змінення жорсткості основи під фундаментами силосів. Методика застосована для аналізу результатів геодезичного моніторингу стану основ силосів 10.1–10.12 силосного елеватора для зберігання зерна, розташованого у Хмельницькій області.

Ключові слова: осідання основи, геодезичний моніторинг, залізобетонний фундамент, сталевий силос, жорсткість основи.

Постановка проблеми

Одним із важливих критеріїв надійності велико-розмірних силосів, пов'язаних з їх безаварійною експлуатацією, регламентованих нормами проектування, є неперевищення гранично допустимих осідань основ та кренів згідно з ДБН В.2.6-221:2021.

Традиційно здійснюють геодезичний моніторинг вертикального осідання основи силосів, а його дані порівнюються із аналітично розрахованими величинами осідань, водночас досить часто виникає певна, іноді значна, неузгодженість між натурними та розрахунковими величинами осідань.

Особлива увага до методів проектування і будівництва терміналів зберігання обумовлена участю України у «Зерновій угоді», оптимізацією логістичних шляхів транспортування зернової продукції, пошкодженням терміналів для зберігання зернових унаслідок бойових дій.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Різноманітність ґрунтових умов основ, на яких зводяться силоси для зберігання зернових, вимагає дослідження різноманітних типів фундаментів, зокрема плитних фундаментів силосного корпусу, розташованого на слабких глинистих водонасичених ґрунтах [1].

Не минули уваги дослідників важливі питання уточнення напружено-деформованого стану ґрунту основи з утворенням пружного конуса в процесі ущільнення під плитним фундаментом силосу [2].

Моделювання стохастичної основи фундаментів силосів, армованої ґрунтоцементними елементами, вплив нерівномірності завантаження силосу на його відмову за критерієм гранично допустимого крену фундаментної плити представлено у дослідженні [3].

У дослідженнях [4–6] проведено комп'ютерне

моделювання фундаментних плит силосів, розташованих на пальовій основі. Отримано оптимальні параметри пальового кріплення ґрунтів основи силосів. Доведено, що розташування, варіювання відстані між палями, діаметрами та кількістю паль, збільшення товщини фундаментних плит і використання ущільнених шарів ґрунту не сприяють істотному зменшенню осідання фундаментів силосів.

Для удосконалення методів компресійних випробувань та підвищення достовірності оцінювання результатів стисливості ґрунтів, удосконалення моделювання основ, складених слабкими ґрунтами з високою стисливістю, проведені дослідження [7, 8]. Результати дослідження [7] свідчать про те, що «величина осідання основи за показником стискання ґрунтів на 36 % перевищує величину, розраховану за модулем деформації. Тоді як осідання основи, визначене через показник стискання ґрунту, на 13,8 % перевищує величину, отриману за геодезичними спостереженнями, а осідання основи, розраховане через модуль деформації ґрунту, на 26 % менше за дані спостережень».

Слід відзначити вагомий внесок в експериментальні методи вивчення поведінки ґрунтів, уточнення визначення їх фізико-механічних показників зі змінними у часі режимами навантаження, а також комп'ютерне моделювання зазначених процесів, які представлено в дослідженні [9].

Удосконалення методики розрахунку осідань основ, складених слабкими глинистими ґрунтами, плитних фундаментів силосів, армованих вертикальними ґрунтоцементними елементами із застосуванням пружно-пластичної моделі ґрунту, висвітлено у дослідженні [10]. Проаналізовано особливості застосування ідеально пружно-пластичної моделі за умовою міцності Мора-Кулона та пружно-пластичної моделі ізотропного зміцнення ґрунту для моделю-

вання напружено-деформованого стану природних та армованих основ під час циклічного навантаження.

Прогнозування осідань основ, складених глинистими водонасиченими ґрунтами, плитних фундаментів силосів, армованих вертикальними ґрунтоцементними елементами із залученням пружно-в'язкопластичної моделі ґрунту, яка розглядає ґрунт з позиції взаємозв'язаної теорії консолідації з урахуванням фільтраційної консолідації та повзучості скелета ґрунту, представлено у дослідженні [11].

Експериментальні дослідження стисливості ґрунту з метою підвищення достовірності результатів шляхом відносного зменшення коефіцієнта пористості висвітлено у роботі [12].

Удосконалення методики оцінювання несучої здатності основ силосів, складених водонасиченими глинистими ґрунтами, на застосуванні теорії Меєргофа (G. Meyerhof) наведено у дослідженні [13]. Обчислена несуча здатність виявилась меншою на 20–26 % порівняно з оцінками інших авторів.

У деяких випадках осідання силосів для зернових, зведених на лесових просадочних ґрунтах, за даними геодезичного моніторингу сягають величин 115–232 мм, що, зі свого боку, не перешкоджає їх експлуатації протягом тривалого часу [14].

Вплив розмірів фундаментів, середнього тиску під подошвою, склад та стан ґрунтів основи на деформативність основи досліджено в роботі [15].

У дослідженні [16] представлено дані моніторингу силосів протягом семи років. Ґрунтова товща основи складена глинистими ґрунтами і армована ґрунтоцементними елементами, зверху яких улаш-

товувався плитний фундамент. Спостерігався крен фундаментів силосів на величину до 70 мм. Динаміка осідань фундаментів силосів, яка спостерігалась авторами дослідження свідчить, що 50 % загальної величини осідання відбувається в середньому у перші 6 місяців завантаження силосів.

Мега статті

Аналіз наведених літературних джерел, пошукові напрямки дослідників засвідчили недостатню досконалість наявних методів випробування ґрунтів стосовно моделювання їх поведінки у лабораторних приладах і природному стані, суттєва відмінність результатів розрахунків осідання основ аналітичними методами із даними моніторингу. Особливої уваги заслуговує удосконалення оцінювання фізико-механічних показників основи, складеної слабкими ґрунтами, армованої ґрунтоцементними елементами.

Метою дослідження є удосконалення методики обробки результатів геодезичного моніторингу фундаментів сталевих силосів силосного корпусу під час першого циклу завантаження на основі застосування гіпотези лінійного змінення жорсткості основи під фундаментами силосів.

Виклад основного матеріалу

Дослідження базується на результатах геодезичного моніторингу стану основ фундаментів силосів зберігання зерна 10.1–10.12 силосного елеватора для зберігання зерна, розташованого у Хмельницькій області (рис. 1).



Рис. 1. Загальний вигляд силосів 10.1–10.12 силосного елеватора для зберігання зерна

Силоси для зберігання зерна 10.1–10.12 представляють металеві зерносховища діаметром 32 м (рис. 2). Фундаменти силосів улаштовані на покращеній основі із армуванням ґрунтоцементними елементами діаметром 300 мм та довжиною 4 м

(ГЦЕ – 0,3 – 4,0). Ґрунтоцементні елементи розташовані рівномірно з кроком 770×770 мм. Між бетонною підготовкою та ГЦЕ влаштовано демпферний шар товщиною 500 мм з гранітного щебеню фракції 20–40 мм (рис. 3).

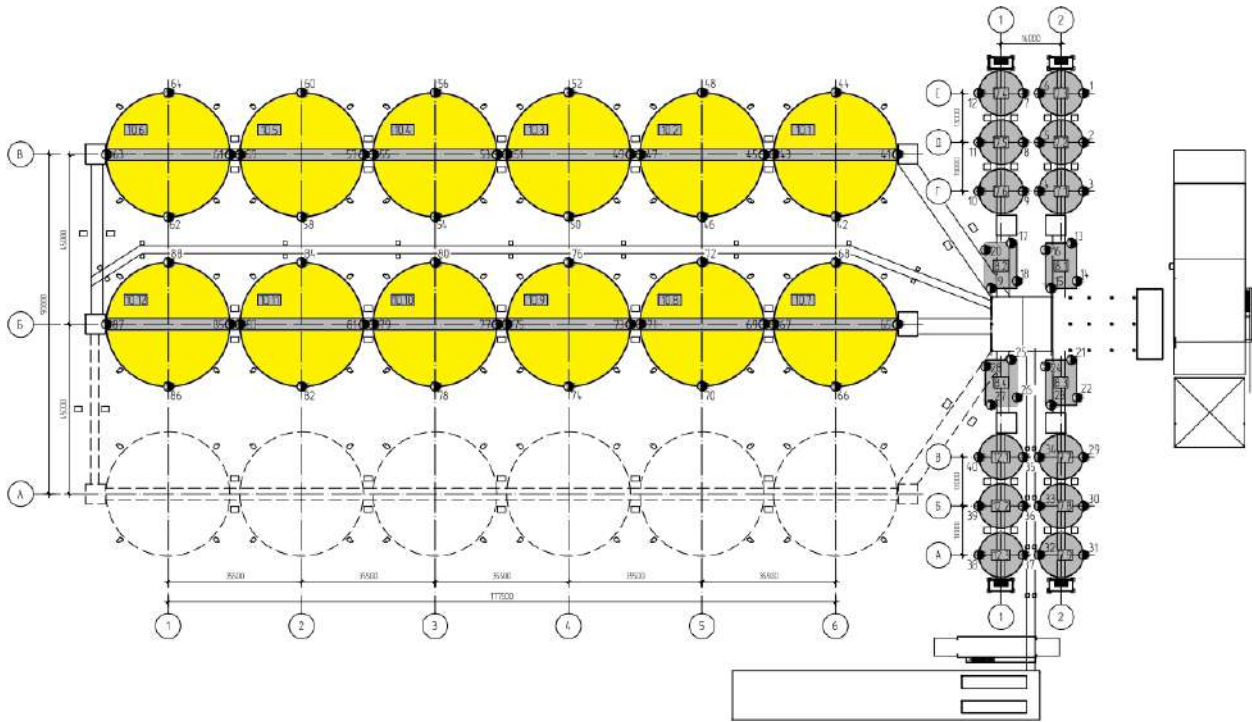


Рис. 2. План розташування силосів 10.1–10.12 силосного елеватора для зберігання зерна

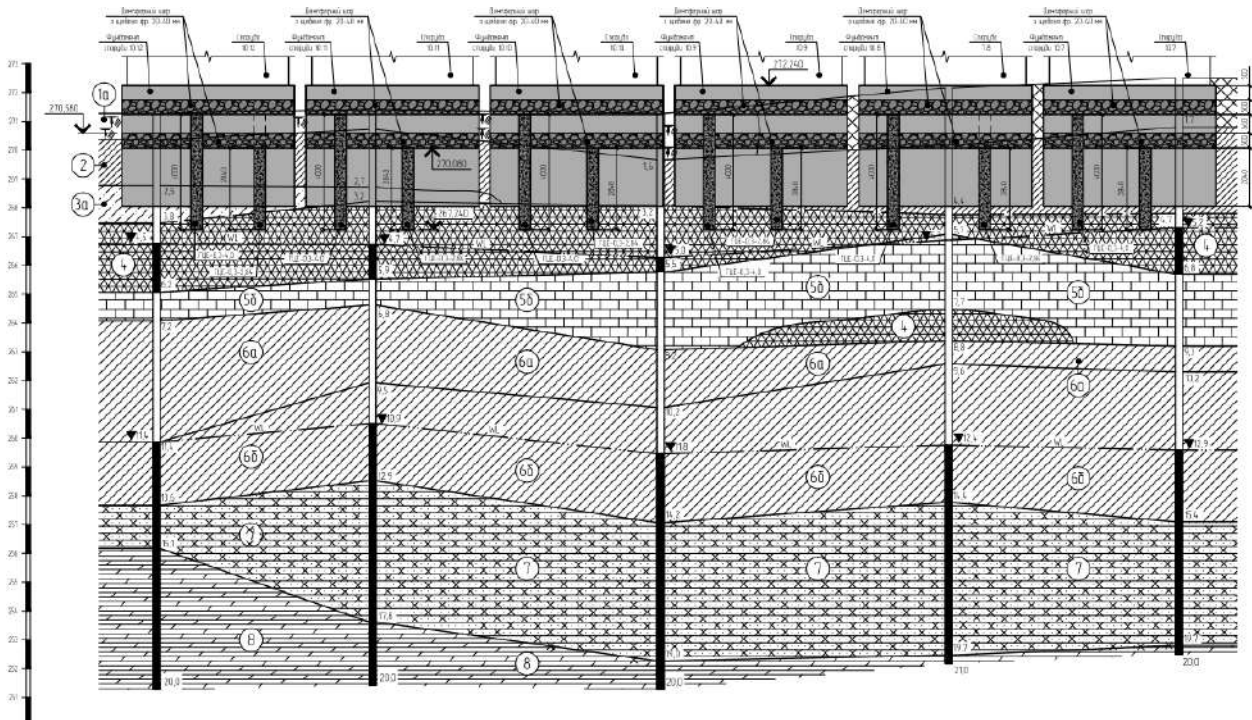


Рис. 3. Схема покращення властивостей основи фундаментів силосів із армуванням ґрунтоцементними елементами діаметром 300 мм та довжиною 4 м (ГЦЕ – 0,3 – 4,0) з кроком 770×770 мм, бетонною підготовкою та демпферним шаром товщиною 500 мм

Фундаменти силосів виконано з підземною галереєю шириною 3,8 м. Відстань між внутрішніми гранями галереї становить 3 м, висота – 3,8 м.

Плитні частини, що розташовані з обох боків галереї, мають діаметр 16,5 м (рис. 4).

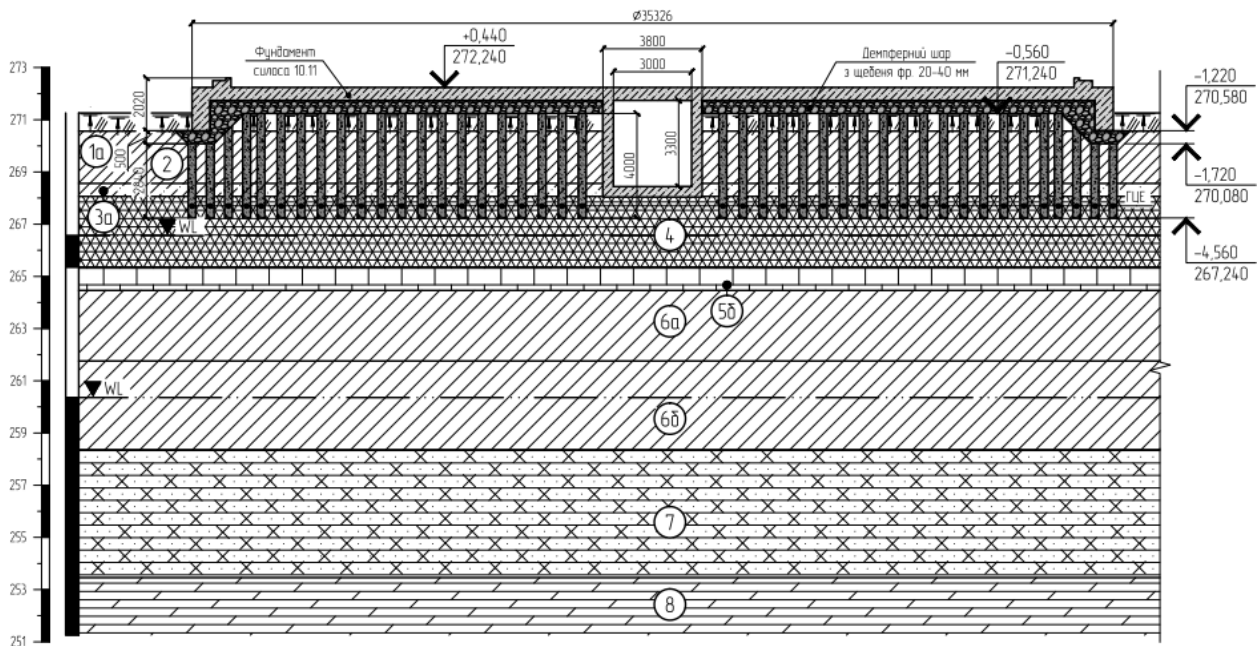


Рис. 4. Схема фундаменту силосу з підземною галереєю

Характеристика інженерно-геологічних та гідро-геологічних умов майданчика зображена на рис. 3. Під час проведення інженерно-геологічних вишукувань способом буріння свердловин до глибини розвідки 21,0 м за генетичними ознаками і фізико-механічними властивостями встановлено, що під фундаментами силосів 10.1–10.12 залягає товща ґрунтів, яка розділяється на інженерно-геологічні елементи, опис яких наведено нижче:

- ІГЕ-1а: ґрунтово-рослинний шар, суглинок пілуватий, гумусований, з корінням рослин;
- ІГЕ-1: насипний ґрунт – суглинок важкий та легкий, рідше глина, суглинок від твердого до тугопластичного, $\gamma = 19,9 \text{ кН/м}^3$, $c = 29 \text{ кПа}$, $\varphi = 22^\circ$, $E = 19,0 \text{ МПа}$;
- ІГЕ-2: суглинок важкий, з прошарками легкого, пілуватий, тугопластичний та напівтвердий, $\gamma = 19,7 \text{ кН/м}^3$, $c = 46 \text{ кПа}$, $\varphi = 12^\circ$, $E = 15,0 \text{ МПа}$;
- ІГЕ-3а: супісок дресв'яний, твердий, з прошарками суглинку та глини 5–15 %, $\gamma = 18,6 \text{ кН/м}^3$, $c = 17 \text{ кПа}$, $\varphi = 29^\circ$, $E = 24,0 \text{ МПа}$;
- ІГЕ-3б: супісок дресв'яний, пластичний, з прошарками суглинку та глини 5–15 %;
- ІГЕ-4: щебенисто-дресв'яний ґрунт із супіщаним заповнювачем, твердим та пластичним, 20–30 %, щебінь вапняку низької міцності, $\gamma = 20,0 \text{ кН/м}^3$, $c = 12 \text{ кПа}$, $\varphi = 40^\circ$, $E = 35,0 \text{ МПа}$;
- ІГЕ-5а: вапняк сильно вивітрілий, сильно тріщинуватий, низької міцності із зонами дуже низької міцності, $\gamma = 19,2 \text{ кН/м}^3$, $R_{csat} = 1,1 \text{ МПа}$;

– ІГЕ-5б: вапняк вивітрілий, тріщинуватий, зниженої міцності із зонами низької міцності, $\gamma = 22,1 \text{ кН/м}^3$, $R_{csat} = 3,3 \text{ МПа}$;

– ІГЕ-6а: суглинок легкий, місцями важкий, піщанистий, напівтвердий та тугопластичний, $\gamma = 19,2 \text{ кН/м}^3$, $c = 44 \text{ кПа}$, $\varphi = 25^\circ$, $E = 15,0 \text{ МПа}$;

– ІГЕ-6б: суглинок легкий, місцями важкий, піщанистий, м'якопластичний та текучопластичний, $\gamma = 19,2 \text{ кН/м}^3$, $c = 51 \text{ кПа}$, $\varphi = 17^\circ$, $E = 12,0 \text{ МПа}$;

– ІГЕ-7: пісковик слабо вивітрілий, з прошарками сильно вивітрілого, тріщинуватий, зниженої міцності з зонами низької міцності, дрібнозернистий, на карбонатному та глиняному цементі, з супіщаним заповнювачем, $\gamma = 22,8 \text{ кН/м}^3$, $R_{csat} = 4,0 \text{ МПа}$;

– ІГЕ-8: глина важка (мергель), місцями легка, напівтверда та тугопластична, $\gamma = 19,3 \text{ кН/м}^3$, $c = 89 \text{ кПа}$, $\varphi = 17^\circ$, $E = 22,0 \text{ МПа}$.

Нормативна глибина промерзання ґрунту – 0,8 м. В межах розвіданої глибини на ділянці досліджень простежуються два водоносних горизонти. На період вишукувань глибина залягання ґрунтових вод становила 2,8–5,3 м, що відповідає абсолютним відміткам 265,66–267,44 м. Водовмісною породою напірного горизонту є пісковики. Величина напору змінюється від 1,6 до 3,0 м. Абсолютні відмітки залягання рівня підземних вод становлять 258,3–260,25 м.

Розрахунки осідань фундаментів силосів 10.1–10.12 проводилися за розрахунковою схемою у ви-

гляді лінійно-деформованого півпростору з використанням коефіцієнтів жорсткості основи. Визначення розрахункового опору армованої основи проводилося з урахуванням польових штампових випробувань.

Максимальне розрахункове осідання силосів зберігання зерна 10.1–10.12 склало $S_{max} = 53$ мм, при середньому тиску під подошвою фундаменту $p = 224$ кПа. Зведені модулі деформації ПГЕ після їх підсилення наступні: $E_{ГРШ} = 14,3$ МПа, $E_2 = 24,0$ МПа, $E_{3a} = 32,0$ МПа, $E_{3б} = 30,0$ МПа, їх визначено за формулою (1).

Зведений модуль деформації ґрунту, армованого ґрунтоцементними елементами:

$$\bar{E} = \frac{(E_s \cdot F_s + E_{sc} \cdot F_{sc})}{F}, \quad (1)$$

де E_s – модуль деформації ґрунту, Па;

F_s – площа основи, що сприймає навантаження в шарі закріпленого ґрунту, м²;

E_{sc} – модуль деформації ґрунтоцементу, Па (прийнято 70 МПа);

F_{sc} – площа закріпленого ґрунту (ґрунтоцементу), м²;

F – загальна площа армування основи, м².

Граничне значення осідання силосів згідно з п. 6.8 ДБН В.2.6-221:2021 складає $S_{max,u} = 150$ мм.

Періодичність геодезичного моніторингу з вимірювання деформацій основ і фундаментів силосів

обумовлена насамперед призначенням споруди, циклічністю навантажень, типом деформації, що підлягає вимірюванню, етапом зведення споруди, терміном перебування в експлуатації.

Для уникнення нерівномірного осідання фундаментів, кренів при експлуатації зерносховищ необхідно виконати перше завантаження–розвантаження відповідно до інструкції, наданої виробником зерносховищ. Згідно з інструкцією із експлуатації та обслуговування силосів, наданої власником, перший цикл завантаження–розвантаження силосів 10.1–10.12 повинен проходити у три етапи:

1) завантаження силосу на 1/3 його висоти з подальшою 10-денною перервою, необхідною для ущільнення зерна;

2) завантаження силосу на 2/3 його висоти з подальшою 10-денною перервою, необхідною для ущільнення зерна;

3) максимальне завантаження силосу з подальшою 10-денною перервою, необхідною для ущільнення зерна.

Перші зняття відліків проводились після монтажу деформаційних марок на зведених спорудах, але перед початком завантаження зерном. Наступні відліки проводились після кожного етапу першого завантаження силосів 10.1–10.12 (1/3, 2/3 висоти силосу та на всю висоту силосу). Останній відлік знімався після 100 % завантаження силосів. Хронологічна етапність завантаження силосів представлена у табл. 1.

Таблиця 1

Хронологічна етапність завантаження силосів для зберігання зерна 10.1–10.12

№ з/п	Нумерація силосу	Доба від початку геодезичного моніторингу				
		0 доба	333 доба	361 доба	389 доба	416 доба
Завантаженість силосу кукурудзою, % (МН)						
1	Силос 10.1	0	0	30 (53,55)	55 (98,18)	57 (101,75)
2	Силоси 10.2, 10.3	0	0	30 (53,55)	50 (89,25)	57 (101,75)
Завантаженість силосу соняшником, % (МН)						
3	Силос 10.4	0	0	50 (51)	89 (90,78)	91 (92,82)
4	Силос 10.5	0	0	45 (45,9)	90 (91,8)	91 (92,82)
5	Силос 10.6	0	0	45 (45,9)	65 (70,38)	91 (92,82)
6	Силос 10.7	0	30 (30,6)	55 (56,1)	89 (90,78)	90 (91,81)
7	Силос 10.8	0	30 (30,6)	55 (56,1)	89 (90,78)	89 (90,78)
8	Силос 10.9	0	30 (30,6)	50 (51)	88 (89,76)	88 (89,76)
9	Силос 10.10	0	30 (30,6)	50 (51)	90 (91,8)	90 (91,8)
10	Силос 10.11	0	30 (30,6)	50 (51)	67 (68,34)	90 (91,8)
11	Силос 10.12	0	30 (30,6)	50 (51)	64 (65,28)	70 (71,4)

Методика вимірювання деформацій основи силосів застосовувалась наступна. Деформаційні марки для визначення вертикальних переміщень були встановлені в фундаментах силосів на горизонталь-

них поверхнях (рис. 5). Для розміщення на горизонтальній площині марки були виготовлені з металевої пластини розмірами 50×50 мм і закріплені до поверхні фундаменту двома дюбель-цвяхами (рис. 6).

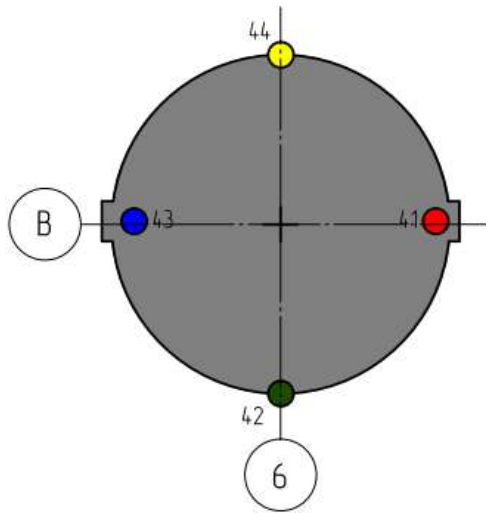


Рис. 5. Схема встановлення деформаційних марок № 41 – № 44 на фундаменті силосу для зберігання зерна 10.1



Рис. 6. Деформаційна марка на фундаментах силосів для зберігання зерна 10.1–10.12

Під час вимірювання переміщень нівелювання проводилося одним горизонтом у прямому та зворотному напрямках незалежно від замикання ходу. Вимірювання деформацій виконувалися нівеліром «NEVAL SYSTEM N32X» та односторонньою рей-

кою з інварною смугою та двома шкалами.

Параметри завантаження та результати спостережень за осіданнями ґрунтової основи силосів для зберігання зерна за 5 циклів завантаження представлено у табл. 2 і на графіку (рис. 7).

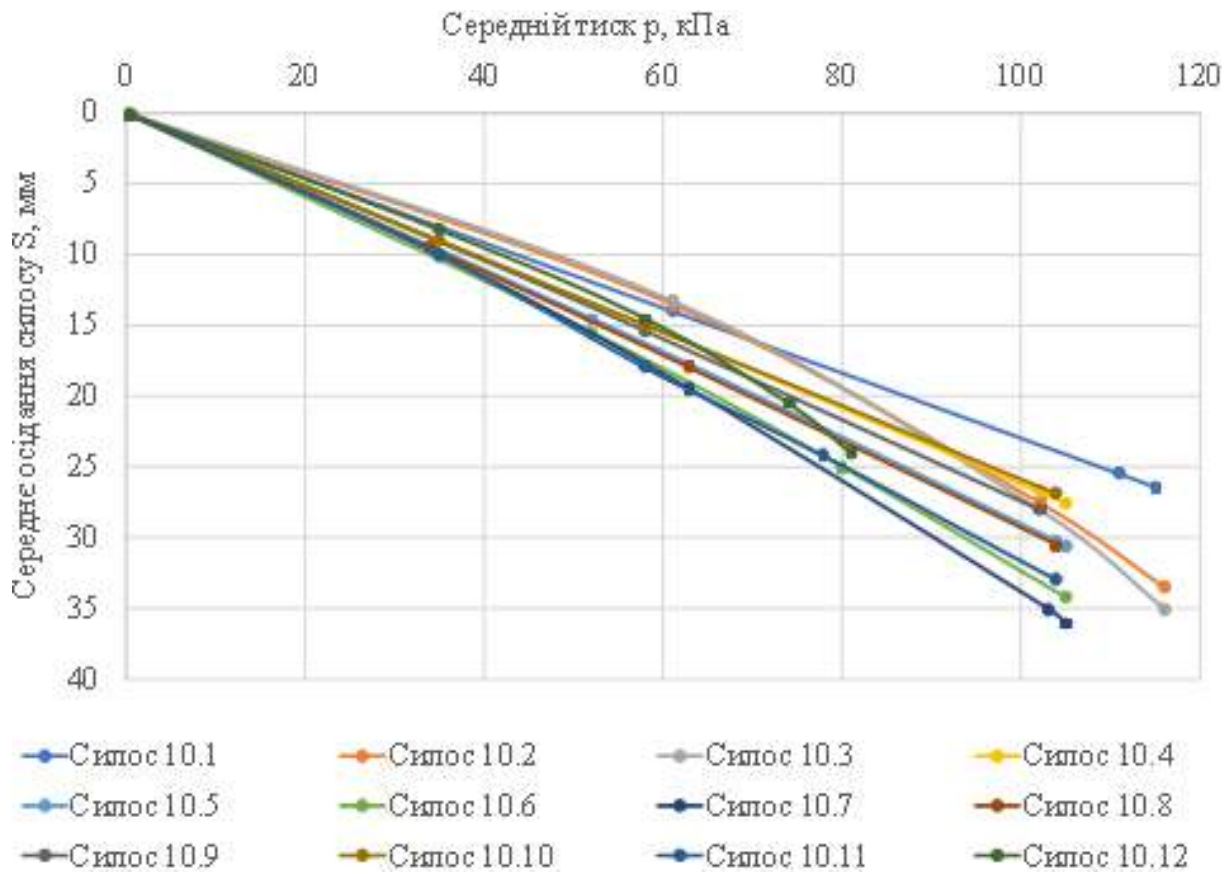


Рис. 7. Графік залежності середнього осідання S , мм силосів зберігання зерна 10.1–10.12 від середнього тиску p , кПа під підшвами фундаментів

Таблиця 2

Параметри навантаження та осідання силосів для зберігання зерна 10.1–10.12

№ з/п	Нумерація силосу	Параметри навантаження та осідання силосів				
		Максимальне навантаження, МН (%)	Максимальне осідання, S_{max} , мм	Мінімальне осідання, S_{min} , мм	Середнє осідання, S , мм	Крен
Завантаженість силосу кукурудзою						
1	Силос 10.1	101,75 (57)	31,0	26,5	29,3	0,0001
2	Силос 10.2	101,75 (57)	34,5	28,5	32,0	0,0004
3	Силос 10.3	101,75 (57)	34,5	28,0	31,0	0,0002
Завантаженість силосу соняшником						
4	Силос 10.4	92,82 (91)	33,5	27,5	31,0	0,0002
5	Силос 10.5	92,82 (91)	34,0	29,5	32,0	0,0001
6	Силос 10.6	92,82 (91)	35,0	33,0	34,0	0,0001
7	Силос 10.7	91,81 (90)	34,0	31,0	32,0	0,0001
8	Силос 10.8	90,78 (89)	31,5	29,0	30,0	0,0001
9	Силос 10.9	89,76 (88)	29,5	27,5	28,0	0,0001
10	Силос 10.10	91,8 (90)	29,5	24,0	26,0	0,0002
11	Силос 10.11	91,8 (90)	34,5	31,5	33,0	0,0001
12	Силос 10.12	71,4 (70)	26,5	22,5	25,0	0,0001

Графіки залежностей середнього осідання S , мм силосів зберігання зерна 10.1–10.12 від середнього тиску p , кПа під подошвами фундаментів апроксимовані функціями, наведеними у табл. 3, які можуть надалі використовуватись для моніторингу осідань силосів під час наступних циклів завантаження.

Таблиця 3

Рекомендації моніторингу осідань силосів 10.1–10.12

Маркування силосу	Рівняння залежності осідань S , мм від середнього тиску під фундаментом p , кПа
10.1	$S = 0,2586 \cdot p + 0,1162$
10.2	$S = 4 \cdot 10^{-6} \cdot p^3 + 6 \cdot 10^{-4} \cdot p^2 + 0,1713 \cdot p - 3 \cdot 10^{-3}$
10.3	$S = 1 \cdot 10^{-5} \cdot p^3 - 2 \cdot 10^{-4} \cdot p^2 + 0,194 \cdot p - 1,65 \cdot 10^{-2}$
10.4	$S = 0,2626 \cdot p - 7,34 \cdot 10^{-2}$
10.5	$S = 2 \cdot 10^{-4} \cdot p^2 + 0,2669 \cdot p + 1,2 \cdot 10^{-3}$
10.6	$S = 5 \cdot 10^{-4} \cdot p^2 + 0,2707 \cdot p + 8 \cdot 10^{-4}$
10.7	$S = 8 \cdot 10^{-4} \cdot p^2 + 0,2592 \cdot p - 7,7 \cdot 10^{-3}$
10.8	$S = 2 \cdot 10^{-4} \cdot p^2 + 0,2736 \cdot p - 5 \cdot 10^{-3}$
10.9	$S = 2 \cdot 10^{-4} \cdot p^2 + 0,253 \cdot p - 4,5 \cdot 10^{-3}$
10.10	$S = 0,2587 \cdot p - 0,0297$
10.11	$S = 3 \cdot 10^{-4} \cdot p^2 + 0,291 \cdot p - 0,1232$
10.12	$S = 1,5 \cdot 10^{-3} \cdot p^2 + 0,1658 \cdot p + 0,1318$

Для аналізу результатів моніторингу осідання основи силосів використано підхід лінійності жорсткості основи. Під жорсткістю основи слід розуміти відношення середнього тиску p , кПа під подошвою

фундаменту до середнього осідання S , мм. Такий підхід базується на припущенні, що в процесі завантаження силосу і поступового зростання середнього тиску під подошвою фундаменту модуль деформації ґрунту основи поступово знижується і деформативність основи збільшується, звісно, доти, поки у ґрунтовому масиві під фундаментом не почнеться розвиток пластичних деформацій.

Визначення розрахункового параметра жорсткості основи на кожному етапі завантаження вимагає визначення глибини стисливої товщі H_c , м для обчислення розрахункової глибини осідання S , мм за методом пошарового підсумовування. У дослідженні [15] автор рекомендує при ширині фундаменту b , м для визначення коефіцієнта k обмеження глибини стисливої товщі використовувати лінійну інтерполяцію за умови: $k = 0,2$ при $b \leq 20$ м, $k = 0,5$ при $b \geq 50$ м. Отже, у нашому випадку $k = 0,32$. Однак у ДБН В.2.1-10:2018 рекомендовано для такої ширини фундаменту значення $k = 0,5$. Дослідження глибини стисливої товщі H_c , м залежно від середнього тиску p , кПа при різних значеннях коефіцієнта k обмеження глибини стисливої товщі для наявних інженерно-геологічних умов представлено на графіку (рис. 8).

Горизонтальні ділянки графіків (рис. 8) відповідають мінімальній глибині стисливої товщі $H_c = 7,2$ м, відповідно до обмежень, які накладаються ДБН В.2.1-10:2018. Слід відзначити, що при значенні середнього тиску $p = 200$ кПа різниця глибини стисливої товщі H_c , м при різних значеннях коефіцієнта k сягає 20 %. У подальших розрахунках значення коефіцієнта прийнято $k = 0,5$.

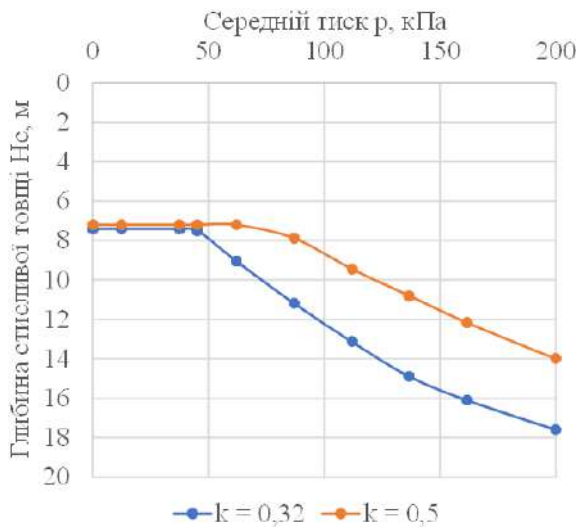


Рис. 8. Графік залежності глибини стисливої товщі H_c , м залежно від середнього тиску p , кПа під підшвами фундаментів силосів зберігання зерна 10.1–10.12 при різних значеннях коефіцієнта k обмеження глибини стисливої товщі

Відношення середнього тиску p , кПа під підошвою фундаменту до середніх осідань S , мм, отриманих під час геодезичного моніторингу силосів 10.1–10.12, послугували для побудови графіків жорсткості основи силосів (рис. 9).

З метою перевірки достовірності отриманих даних та їх аналізу побудовано графік розрахункової жорсткості основи (рис. 9). Вихідними даними слугували фізико-механічні характеристики підсиленої основи фундаментів силосів, визначені за результатами інженерно-геологічних вишукувань. Розрахункові осідання S , мм фундаментів силосів 10.1–10.12 виконані із використанням розрахункової схеми у вигляді лінійно-деформованого півпростору з використанням коефіцієнтів жорсткості основи. Горизонтальна ділянка графіка на відліку $p / S = 4,67$ кПа/мм відповідає мінімальній глибині стисливої товщі $H_c = 7,2$ м відповідно до обмежень, регламентованих ДБН В.2.1-10:2018.

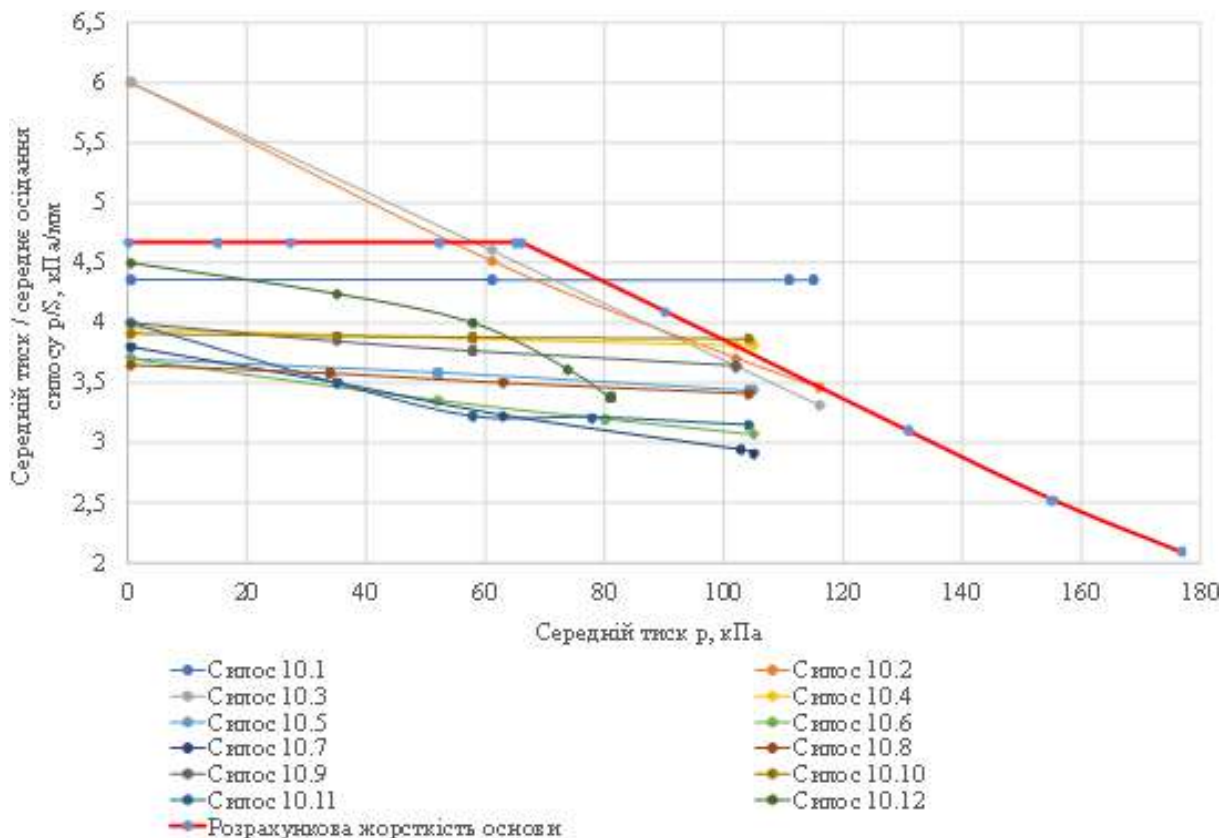


Рис. 9. Графіки розрахункової жорсткості основи силосів та жорсткості, виміряної під час геодезичного моніторингу

Порівняльний аналіз отриманих даних свідчить, що показники жорсткості основи силосів 10.2 та 10.3 найбільш близько співпадають із розрахунковою жорсткістю основи. Завищені на 3–5 % розрахункові значення жорсткості основи порівняно із

виміряними імовірно обумовлені більш високими розрахунковими механічними характеристиками основи, армованої ґрунтоцементними елементами. Саме армовані верхні шари основи формують ~40 % стисливої товщі (рис. 8) під фундаментами силосів

при досягнутих значеннях середнього тиску $p < 120$ кПа. Імовірна неточність визначення механічних характеристик нижче розташованих шарів ПГЕ буде мати менший вплив на загальну величину розрахункового осідання.

Обчислена за даними геодезичних вимірювань жорсткість основи силосів та середній тиск в основі під фундаментами є незалежними випадковими величинами, про що свідчать графіки жорсткості основи силосів 10.1–10.12 (рис. 9). Практичний ін-

терес представляє дослідження кореляційного зв'язку між зазначеними випадковими величинами. Графік лінійної функції регресії статистичної вибірки жорсткості основи (відношення середнього тиску p , кПа під подошвою фундаменту до середніх осідань S , мм) на статистичну вибірку середнього тиску p , кПа під подошвою фундаменту (рис. 10) свідчить про існування від'ємної кореляційної залежності між двома вибірками.

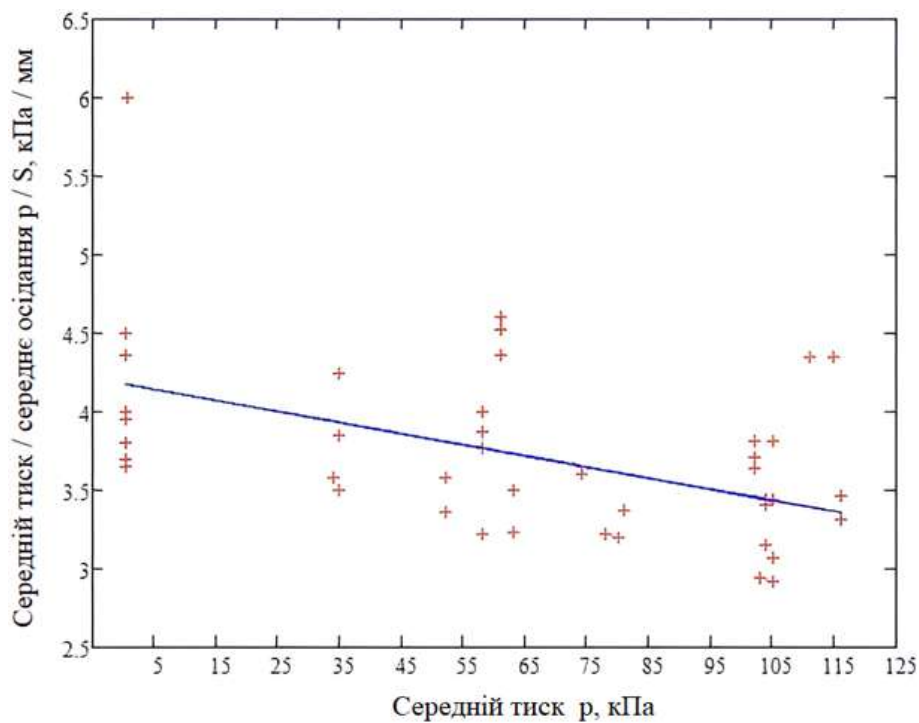


Рис. 10. Графік лінійної функції регресії статистичної вибірки жорсткості основи (відношення середнього тиску p , кПа під подошвою фундаменту до середніх осідань S , мм) на статистичну вибірку середнього тиску p , кПа під подошвою фундаменту

Під час проведеного дослідження виконано статистичну обробку вибірок середнього тиску p , кПа під подошвою фундаменту та жорсткості основи (p / S , кПа/мм), за результатами якої отримано вибір-

кове середнє, вибіркоче медіану, середньоквадратичне відхилення, вибіркочу дисперсію зазначених вибірок, які представлено у табл. 4.

Таблиця 4

Результати статистичної обробки вибірок середнього тиску p , кПа під подошвою фундаменту та жорсткості основи (p / S , кПа/мм)

Показник	Вибіркове середнє	Вибіркова медіана	Середньоквадратичне відхилення	Вибіркова дисперсія
Середній тиск p , кПа	59,869 кПа	61 кПа	40,797	$1,664 \cdot 10^3$
Жорсткість основи (p / S , кПа/мм)	3,756 кПа/мм	3,643 кПа/мм	0,618	0,383

За результатами кореляційного аналізу статистичних вибірок середнього тиску p , кПа під подошвою фундаменту та жорсткості основи (p / S , кПа/мм) отримано рівняння лінійної регресії:

$$y(x) = b_0 + b_1 \times x, \quad (2)$$

де $y(x)$ – регресія статистичної вибірки середнього тиску p , кПа під подошвою фундаменту по осі x на

статистичну вибірку жорсткості основи по осі y (рис. 10);

x – середній тиск p , кПа під подошвою фундаменту по осі x (рис. 10);

b_0, b_1 – емпіричні коефіцієнти, наведені у табл. 5.

Також обчислено коефіцієнт кореляції вибірок, коваріацію вибірок, стандартну похибку, які представлено у табл. 5.

Таблиця 5

Результати кореляційного аналізу статистичних вибірок середнього тиску p , кПа під подошвою фундаменту та жорсткості основи (p / S , кПа/мм)

Вільний член b_0	Коефіцієнт b_1	Коефіцієнт кореляції двох вибірок	Коваріація двох вибірок	Стандартна похибка
4,18	$-7,092 \cdot 10^{-3}$	-0,4687	-11,577	0,552

Отримане значення коефіцієнта кореляції вибірок $r = -0,4687$ свідчить про існування від’ємної кореляційної залежності між вибірками середнього тиску p , кПа під подошвою фундаменту та жорсткості основи (p / S , кПа/мм). Існування від’ємної кореляційної залежності має чіткий фізичний сенс: при збільшенні тиску на основу її жорсткість зменшується, тоді як збільшується деформативність основи, що підтверджено результатами геодезичного моніторингу силосів. Розрахункова жорсткість основи зменшується зі збільшенням тиску за рахунок залучення більшої глибини стисливої товщі i , відповідно, збільшується розрахункова деформативність основи. Загально прийнятий діапазон тиску під час випробувань ґрунтів основи для визначення їх фізико-механічних властивостей не перевищує 250 кПа. Цей діапазон тиску зазвичай відповідає пружній ділянці діаграми деформування ґрунту і поступовому зменшенню механічних характеристик. Середні напруження під фундаментами досліджених силосів не перевищували 125 кПа.

Відносно низьке порівняно з одиницею значення коефіцієнта кореляції можливо пояснити відносно невисокою щільністю свердловин для відбору проб ґрунту під час інженерно-геологічних вишукувань, неточністю визначення фізико-механічних показників ґрунтів, недосконалістю лабораторного устаткування і методик.

Питання щодо урахування взаємного впливу розташованих поряд силосів, що входять до складу силосного корпусу, окремо у проведеному дослідженні не розглядалось. Тоді як в деяких дослідженнях, зокрема [17], автори зазначають про несуттєвий взаємний вплив розташованих поряд секцій 17-поверхових житлових будівель. Будівлі зведені на великорозмірних пальново-плитних фундаментах із величиною середнього тиску під подошвою 90–100 кПа. Поясненням фізичної природи такого явища може послугувати припущення [18] про утворення несучого стовпа в основі під великорозмірними у плані фундаментами із обмеженням розподільчої здатності ґрунту, армованого палями або ґрунтоцементними елементами, якими армована основа

силосів, що розглядаються у цьому дослідженні.

Натомість у дослідженні [1] чисельним моделюванням методом скінчених елементів при урахуванні взаємного впливу фундаментів силосів на осідання їх основи отримано збільшення величин осідання на 4,3–13,5 %.

Висновки

На підставі проведеного критичного огляду літературних джерел стосовно моніторингу за станом основ фундаментів сталевих силосів на стадії експлуатації можна зробити висновки про те, що найбільш поширеними є традиційні геодезичні вимірювання осідань, які порівнюють із гранично допустимими величинами середніх осідань (150 мм) та кренів (0,002 від діаметру силосу) згідно з ДБН В.2.6-221:2021.

Під час проектування силосів розрахункові осідання обчислюють за нормативними методиками або із застосуванням моделювання силосів, фундаментів, основ чисельними методами чи програмними комплексами. Моделювання властивостей основи здійснюється за даними інженерно-геологічних вишукувань. Відповідно, розрахункова деформативність основи силосів визначається точністю визначення механічних характеристик ґрунтів [7], певною мірою – вибором способу розрахунку [1, 10]. Наведений у цьому дослідженні кореляційний аналіз показників жорсткості основи силосного корпусу вказує на певну неузгодженість осідань силосів, розташованих поряд один з одним на локальному майданчику, отриманих геодезичним моніторингом.

Точність результатів геодезичного моніторингу опосередковано порівнюється із розрахунковими величинами осідань, але зазвичай спостерігається певна, іноді суттєва розбіжність – від 20 % до 30 % [10] та від 10 % до 20 % [7, 11].

У здійсненому дослідженні запропоновано для аналізу результатів геодезичного моніторингу використовувати гіпотезу лінійності жорсткості, яка дозволяє виконувати аналіз змінення жорсткості основи і оцінювати прийнятність її деформаційних показників.

Література

1. Особливості визначення осідань основ плитних фундаментів зернохосовищ силосного типу / М. Л. Зоценко, Ю. Л. Винников, С. Ф. Пичугін, М. В. Бібік, В. І. Марченко, М. І. Лапін // Збірник наукових праць Полтавського національного технічного університету імені Юрія Кондратюка. Серія: Галузеве машинобудування, будівництво. – 2010. – № 2 (27). – С. 101–110. – Режим доступу: https://reposit.nupp.edu.ua/bitstream/PoltNTU/7349/1/Znpgmb_2010_2_20.pdf, вільний (дата звернення: 20.02.2024).
2. Ground base deformation by circular plate peculiarities / M. Zotsenko, Yu. Vynnykov, I. Lartseva, S. Sivitska // MATEC Web of Conferences. – 2018. – Vol. 230. – Article 02040. – DOI: [10.1051/mateconf/201823002040](https://doi.org/10.1051/mateconf/201823002040).
3. 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. – 2012. – № 3. – С. 26–32. – DOI: [10.15802/bttrp2012/26411](https://doi.org/10.15802/bttrp2012/26411).
4. Numerical Analysis of Piled Raft Foundations Designed for Settlement Control on Steel Grain Silos in Collapsible Soils / H. C. Bernardes, H. L. de Souza Filho, A. D. Dias, R. P. da Cunha // International Journal of Civil Engineering. – 2021. – Vol. 19. – P. 607–622. – DOI: [10.1007/s40999-020-00586-5](https://doi.org/10.1007/s40999-020-00586-5).
5. Halder P. Performance evaluation of piled rafts in sand based on load-sharing mechanism using finite element model / P. Halder, B. Manna // International Journal of Geotechnical Engineering. – 2022. – Vol. 16, Issue 5. – P. 574–591. – DOI: [10.1080/19386362.2020.1729297](https://doi.org/10.1080/19386362.2020.1729297).
6. Settlement behaviour of a pile raft subjected to vertical loadings in multilayered soil / R. Banerjee, S. Bandyopadhyay, A. Sengupta, G. R. Reddy // Geomechanics and Geoengineering. – 2022. – Vol. 17, Issue 1. – P. 282–296. – DOI: [10.1080/17486025.2020.1739754](https://doi.org/10.1080/17486025.2020.1739754).
7. Винников Ю. Л. Визначення осідання основи будівель за показником стиснення ґрунту / Ю. Л. Винников, Н. А. Косточка, І. В. Мірошніченко // Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика. – 2015. – № 8. – С. 4–13. – DOI: [10.15802/bttrp2015/90751](https://doi.org/10.15802/bttrp2015/90751).
8. Кіперман Д. М. Питання класифікації та властивостей слабких ґрунтів / Д. М. Кіперман, В. С. Носенко, І. П. Бойко // Збірник наукових праць Полтавського національного технічного університету імені Юрія Кондратюка. Серія: Галузеве машинобудування, будівництво. – 2013. – Т. 2, Вип. 3 (38). – С. 154–160. – Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Znpgmb_2013_3%282%29_22, вільний (дата звернення: 20.02.2024).
9. Винников Ю. Л. Математичне моделювання взаємодії фундаментів з ущільненими основами при їх зведенні та наступній роботі : монографія / Ю. Л. Винников ; Полтав. нац. техн. ун-т ім. Ю. Кондратюка. – 2-ге вид., перероб. та допов. – Полтава : ПолтНТУ імені Юрія Кондратюка, 2016. – 280 с. – Режим доступу: <https://reposit.nupp.edu.ua/handle/PoltNTU/157>, вільний (дата звернення: 20.02.2024).
10. Винников Ю. Л. Оцінювання деформованого стану армованих основ зернохосовищ при циклічному режимі завантаження за просторовою задачею методу скінчених елементів / Ю. Л. Винников, В. І. Марченко // Збірник наукових праць Полтавського національного технічного університету імені Юрія Кондратюка. Серія: Галузеве машинобудування, будівництво. – 2012. – Т. 1-2012, Вип. 4 (34). – С. 79–86. – Режим доступу: https://reposit.nupp.edu.ua/bitstream/PoltNTU/7382/1/Znpgmb_2012_4%281%29_12.pdf, вільний (дата звернення: 20.02.2024).
11. Шаповал В. Г. Прогнозування осідань армованих основ зернохосовищ у часі з урахуванням механічних і реологічних властивостей ґрунту / В. Г. Шаповал, А. В. Шаповал, В. І. Марченко // Збірник наукових праць Полтавського національного технічного університету імені Юрія Кондратюка. Серія: Галузеве машинобудування, будівництво. – 2012. – Т. 2, Вип. 4 (34). – С. 47–53. – Режим доступу: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Znpgmb_2012_4\(2\)_33](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Znpgmb_2012_4(2)_33), вільний (дата звернення: 20.02.2024).
12. Косточка Н. А. Підвищення достовірності прогнозування стисливості ґрунтової основи / Н. А. Косточка // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2014. – № 3. – С. 27–31. – Режим доступу: <https://visnyk.vntu.edu.ua/index.php/visnyk/article/view/925>, вільний (дата звернення: 20.02.2024).
13. Shiva Bhushan J. Y. V. Re-evaluation of Failure of Silo Tower Foundations / J. Y. V. Shiva Bhushan, A. A. Mohammed, M. Madhira // Ground Characterization and Foundations / ed. by C. N. V. Satyanarayana Reddy, K. Muthukkumaran, N. Satyam, R. Vaidya. – Singapore : Springer Nature, 2022. – P. 831–843. – (Lecture Notes in Civil Engineering (LNCE), Vol. 167). – DOI: [10.1007/978-981-16-3383-6_72](https://doi.org/10.1007/978-981-16-3383-6_72).
14. Analysis of calculated and observed settlements of the silo on loess / P. Santrač, Ž. Bajić, S. Grković, D. Kukaras, I. Hegediš // Technical Gazette. – 2015. – Vol. 22, No. 2. – P. 539–545. – DOI: [10.17559/TV-20140615132437](https://doi.org/10.17559/TV-20140615132437).
15. Тугаєнко Ю. Ф. Модуль деформації в механіці ґрунтів, методи його визначення та їхня достовірність / Ю. Ф. Тугаєнко // Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури. – 2009. – Вип. 34. – С. 538–544. – Режим доступу: <http://surl.li/qgrks>, вільний (дата звернення: 20.02.2024).
16. Sadaoui O. Field measurements and back calculations of settlements of structures founded on improved soft soils by stone columns / O. Sadaoui, R. Bahar // European Journal of Environmental and Civil Engineering. – 2019. – Vol. 23, Issue 1. – P. 85–111. – DOI: [10.1080/19648189.2016.1271358](https://doi.org/10.1080/19648189.2016.1271358).
17. Експериментальне обґрунтування нової методики призначення модуля деформації ґрунтів основи великорозмірних пальово-плитних фундаментів / О. В. Самородов, В. Б. Нікулін, О. В. Кротов, І. В. Храпатова, Я. С. Капустяньська // Науковий вісник будівництва. – 2020. – Т. 100, № 2. – С. 101–108. – Режим доступу: <https://files.znu.edu.ua/files/2021/NVB/NVB2020n2/18.pdf>, вільний (дата звернення: 20.02.2024).
18. Кушнер С. Г. Розрахунок деформацій основ будівель і споруд : монографія / С. Г. Кушнер. – Запоріжжя : ТОВ «ІПО Запоріжжя», 2008. – 496 с.

References

1. Zotsenko, M. L., Vynnykov, Yu. L., Pichuhin, S. F., Bibik, M. V., Marchenko, V. I., & Lapin, M. I. (2010). Peculiarities of determining the settlement of slab foundations of silo-type grain storages. *Academic Journal of the Yuri Kondratyuk Poltava National Technical University. Series: Industrial Machine Building, Civil Engineering*, 2(27), 101–110. https://reposit.nupp.edu.ua/bitstream/PoltNTU/7349/1/Znpgmb_2010_2_20.pdf [in Ukrainian]
2. Zotsenko, M., Vynnykov, Yu., Lartseva, I., & Sivitska, S. (2018). Ground base deformation by circular plate peculiarities. *MATEC Web of Conferences*, 230, 02040. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201823002040>
3. Vynnykov, Yu. L., Kharchenko, M. O., & Marchenko, V. I. (2012). Design of foundation plate of grain silage on reinforced stochastic soil base. *Bridges and Tunnels: Theory, Research, Practice*, (3), 26–32. <https://doi.org/10.15802/bttrp2012/26411> [in Ukrainian]
4. 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*, 19, 607–622. <https://doi.org/10.1007/s40999-020-00586-5>

5. Halder, P., & Manna, B. (2022). Performance evaluation of piled rafts in sand based on load-sharing mechanism using finite element model. *International Journal of Geotechnical Engineering*, 16(5), 574–591. <https://doi.org/10.1080/19386362.2020.1729297>

6. Banerjee, R., Bandyopadhyay, S., Sengupta, A., & Reddy, G. R. (2022). Settlement behaviour of a pile raft subjected to vertical loadings in multilayered soil. *Geomechanics and Geoengineering*, 17(1), 282–296. <https://doi.org/10.1080/17486025.2020.1739754>

7. Vynnykov, Yu. L., Kostochka, N. A., & Miroschnychenko, I. V. (2015). Determination of buildings basis subsidence for soil compression indicator. *Bridges and Tunnels: Theory, Research, Practice*, (8), 4–13. <https://doi.org/10.15802/btrp2015/90751> [in Ukrainian]

8. Kiperman, D. M., Nosenko, V. S., & Boyko, I. P. (2013). The questions of classifications and properties of soft soils. *Academic Journal of the Yuri Kondratyuk Poltava National Technical University. Series: Industrial Machine Building, Civil Engineering*, 2(3(38)), 154–160. http://nbuv.gov.ua/UJRN/Znpgmb_2013_3%282%29_22 [in Ukrainian]

9. Vynnykov, Yu. L. (2016). *Mathematical modeling of foundations interaction with compacting basics during their construction and following work: monograph* (2nd ed.). Yuri Kondratyuk Poltava National Technical University. <https://reposit.nupp.edu.ua/handle/PoltNTU/157> [in Ukrainian]

10. Vynnykov, Yu. L., & Marchenko, V. I. (2012). Deformed state estimation of granary bases reinforced by drill and mixing technology affected by cyclic loading through the instrumentality of three-dimensional problem of finite element method. *Academic Journal of the Yuri Kondratyuk Poltava National Technical University. Series: Industrial Machine Building, Civil Engineering*, 1-2012(4(34)), 79–86. https://reposit.nupp.edu.ua/bitstream/PoltNTU/7382/1/Znpgmb_2012_4%281%29_12.pdf [in Ukrainian]

11. Shapoval, V. G., Shapoval, A. V., & Marchenko, V. I. (2012). Settlement prediction of reinforced bases of granaries with the lapse of time subject to mechanical and rheological properties of soil. *Academic Journal of the Yuri Kondratyuk Poltava National Technical University. Series: Industrial Machine Building, Civil Engineering*, 2(4(34)), 47–53. [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Znpgmb_2012_4\(2\)_33](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Znpgmb_2012_4(2)_33) [in Ukrainian]

12. Kostochka, N. A. (2014). Improving the reliability of predicting the compressibility of soil base. *Visnyk of Vinnytsia Polytechnical Institute*, (3), 27–31. <https://visnyk.vntu.edu.ua/index.php/visnyk/article/view/925> [in Ukrainian]

13. Shiva Bhushan, J. Y. V., Mohammed, A. A., & Madhira, M. (2022). Re-evaluation of Failure of Silo Tower Foundations. In C. N. V. Satyanarayana Reddy, K. Muthukumar, N. Satyam, & R. Vaidya (Eds.), *Ground Characterization and Foundations* (pp. 831–843). Springer Nature. https://doi.org/10.1007/978-981-16-3383-6_72

14. Santrač, P., Bajić, Ž., Grković, S., Kukaras, D., & Hegediš, I. (2015). Analysis of calculated and observed settlements of the silo on loess. *Technical Gazette*, 22(2), 539–545. <https://doi.org/10.17559/TV-20140615132437>

15. Tuhaienko, Yu. F. (2009). Modulus of deformation in soil mechanics, methods of its determination and their reliability. *Bulletin of Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture*, (34), 538–544. <http://surl.li/ggrks>

16. Sadaoui, O., & Bahar, R. (2019). Field measurements and back calculations of settlements of structures founded on improved soft soils by stone columns. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 23(1), 85–111. <https://doi.org/10.1080/19648189.2016.1271358>

17. Samorodov, O. V., Nikulin, V. B., Krotov, O. V., Khrapatova, I. V., & Kapustianska, Ya. S. (2020). Experimental justification of the new methodology of assigning of a deformation modulus of the subsoil of large-sized pile-raft foundations. *Scientific Construction Gazette*, 100(2), 101–108. <https://files.znu.edu.ua/files/2021/NVB/NVB2020n2/18.pdf> [in Ukrainian]

18. Kushner, S. H. (2008). *Calculation of deformations of buildings and constructions bases: monograph*. TOV “IPO Zaporizhzhia”.

Рецензент: д-р техн. наук, доц. А.М. Бідаков, Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова, Україна.

Автор: БУТЕНКО Анатолій Анатолійович
аспірант кафедри геотехніки, підземних споруд та гідротехнічного будівництва
Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова
E-mail – butenkoanatoliy@gmail.com
ID ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-5642-983X>

Автор: МОЗГОВИЙ Андрій Олексійович
доктор технічних наук, доцент, професор кафедри геотехніки, підземних споруд та гідротехнічного будівництва
Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова
E-mail – mozgovoyandrey@ukr.net
ID ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9142-3169>

RESULTS OF MONITORING THE SETTLEMENT OF SILO FOUNDATIONS REINFORCED WITH SOIL-CEMENT ELEMENTS

A. Butenko, A. Mozhovyi

O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, Ukraine

During the first cycle of loading and in the subsequent process of steel silos operation to store grain, special attention goes to the observation of base settlement under silo foundations and their tilting. Traditionally, silo settlement tends to be monitored by geodetic measurements.

To analyse the results of monitoring for the silos base settlement, we used the linearity changing of the base stiffness approach. The base stiffness is the ratio of the average pressure p (in kPa) under the foundation sole to the average settlement S (in mm). This approach relies on the following assumption: in the process of silo loading, thus gradually increasing the average pressure under the sole of the foundation, the modulus of deformation of the base soil gradually decreases, and the deformability of the base increases until the stresses in the soil mass under the foundation do not exceed the values of the calculated resistance and the development of plastic deformations begins. For grain storage elevator silos 10.1–10.12 located in the Khmelnytskyi region, we obtained the ratio of the average pressure p (in kPa) under the foundation sole to the average settlement S (in mm) during the geodetic monitoring, and then, we used it to construct the stiffness graphs of the silo base. The base stiffness indicators of silos 10.2 and 10.3 most closely match the calculated base stiffness. The specified values of base stiffness exceeding the measured ones by 3–5% are probably due to the higher calculated mechanical characteristics of the base reinforced with soil-cement elements.

The rigidity of the silo base and the average pressure in the base under the foundations calculated based on geodetic measurement data are independent random variables, as evidenced by the graphs of the rigidity of the silo base 10.1–10.12. The study of the correlation between the specified random variables is of practical interest. The obtained value of the sample correlation coefficient $r = -0.4687$ indicates a negative correlation between the samples of the average pressure p (in kPa) under the foundation sole and the stiffness of the base (p / S , kPa/mm). The existence of negative correlation dependence has a clear physical meaning, such as when the pressure on the base increases, its stiffness decreases while increasing the deformability of the base, as confirmed by the results of silo geodetic monitoring. The calculated stiffness of the base decreases with increasing pressure due to the involvement of a greater depth of the compressible stratum, and, accordingly, the calculated deformability of the base increases. To determine the physical and mechanical properties of the base soil, the generally accepted pressure range during the tests does not exceed 250 kPa. A priori, this pressure range corresponds to the elastic section of the soil deformation diagram and the gradual decrease in mechanical characteristics. The average stresses under the foundations of the studied silos did not exceed 125 kPa.

Therefore, the proposed method makes it possible to obtain not only quantitative conclusions – the magnitude of base settlement, but also to analyse qualitative indicators related to the stiffness characteristics (p / S , kPa/mm) of the base and to assess its deformation indicators acceptability.

Keywords: *foundation settlement, geodetic monitoring, reinforced concrete foundation, steel silo, base stiffness.*