

А.А. Бутенко, А.О. Мозговий

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

## ОЦІНЮВАННЯ ДЕФОРМАЦІЙНИХ ПАРАМЕТРІВ ОСНОВ ФУНДАМЕНТІВ СИЛОСІВ, АРМОВАНИХ ҐРУНТОЦЕМЕНТНИМИ ЕЛЕМЕНТАМИ

Метою дослідження є удосконалення методики прогнозування впливу армування ґрунтоцементними елементами на параметри загальної жорсткості ґрунтової основи фундаменту силосу. Методика апробована на основах силосів чотирьох елеваторів з різними інженерно-геологічними умовами. Підтвердженням справедливості припущень є збіг із результатами геодезичного моніторингу осідань по периметру фундаментів силосів при первинному завантаженні та моделювання методом скінчених елементів.

**Ключові слова:** осідання основи, ґрунтоцементний елемент, геодезичний моніторинг, сталевий силос, жорсткість основи.

### Постановка проблеми

Для сталевих силосів обов'язковим контрольованим критерієм є обмеження осідань основ та кренів, який регламентується ДБН В.2.6-221:2021. Граничне значення осідання силосів згідно із п. 6.8 становить  $S_{max,u} = 150$  мм.

Найбільш економічне рішення фундаменту силосу є фундамент у вигляді великорозмірної плити на природній основі, ґрунтовій подушці або покращеній основі у вигляді вертикального армування ґрунтоцементними елементами (ГЦЕ). Найчастіше – це фундаменти з підземною галереєю або підсилосним поверхом.

При первинному завантаженні силосів здійснюють геодезичний моніторинг вертикального осідання основи силосів, а його дані порівнюються із граничними значеннями осідань і кренів.

### Аналіз останніх досліджень і публікацій

Імовірна оцінка надійності основи фундаментів силосів, армованої ґрунтоцементними елементами, за критерієм неперевикнення гранично допустимого крену фундаментної плити від впливу нерівномірності завантаження представлена у дослідженні [1].

Моделювання фундаментних плит силосів, розташованих на пальовій основі, із розробкою скінчено-елементних моделей дало змогу визначити оптимальні параметри пальового кріплення ґрунтів основи силосів [2–4]. Досліджено вплив улаштування ущільнених шарів ґрунту, товщини фундаментних плит, відстані між палями, діаметрів застосованих палей, їх кількості на величини осідань основ фундаментів силосів.

Особливості роботи покращених шляхом ущільнення основ фундаментів та їх комп'ютерне моделювання відображено у дослідженні [5].

Моделювання напружено-деформованого стану

природних та армованих основ під час циклічного навантаження висвітлено у статті [6]. Проаналізовано моделі ґрунтової основи, зокрема ізотропного зміцнення ґрунту Hardening Soil Model (пружно-пластичної моделі ізотропного зміцнення ґрунту) та ідеально пружно-пластичної моделі за умовою міцності Мора-Кулона. Зазначено, що розглянуті моделі дають ідентичні результати під час моделювання напружено-деформованого стану при первинному завантаженні, але такі, що дещо різняться при розвантаженні. Приділено увагу рекомендаціям стосовно призначення модулів пружності в скінчено-елементних моделях залежно від механічних характеристик ґрунтів. Важливим є те, що величини розрахункових та вимірних осідань мають відмінність 20–30 %.

Часто основи силосів представлено глинистими водонасиченими ґрунтами. Дослідження осідань плитних фундаментів силосів, армованих вертикальними ґрунтоцементними елементами, із залученням пружно-в'язкопластичної моделі ґрунту здійснено у роботі [7].

Досліджено тримальну здатність основ силосів, складених водонасиченими глинистими ґрунтами, із застосуванням теорії Меєргофа [8]. Тримальна здатність основ силосів виявилась меншою до 26 % у співвідношенні з результатами інших авторів.

Багаторічні спостереження за осіданнями силосів для зернових, зведених на лесових просадних ґрунтах, представлено у дослідженні [9], на глинистих ґрунтах, армованих ґрунтоцементними елементами, зверху яких улаштовувався плитний фундамент, – у дослідженні [10]. За результатами геодезичного моніторингу осідання основ силосів сягають 232 мм [9] та крен фундаментів силосів – на величину до 70 мм [10]. Динаміка осідань основ, виявлена авторами, свідчить, що 50 % загальної величини осідання відбувається в середньому під час першого циклу

завантаження силосів.

Робота [11] присвячена експериментально-теоретичній розробці бурозмішувального методу улаштування ґрунтоцементних паль, натурних виготовлень і випробувань фізико-механічних характеристик ґрунтоцементу, специфіки тривалих геодезичних спостережень за осіданнями фундаментів із ґрунтоцементними палями.

Достатньо поширеними під час зведення сталевих циліндричних силосів є конструкції залізобетонних фундаментів з підземними галереями та фундаментів з підсилюючим поверхом на природній чи посиленій основі. У статті [12] представлено приклади оцінки напружено-деформованого стану фундаментів силосів із застосуванням чисельних методів моделювання сумісної роботи основа – фундамент – конструкція.

У дослідженні [13] запропоновано використовувати гіпотезу лінійності жорсткості для аналізу результатів геодезичного моніторингу осідань основ силосів. Це припущення продемонстровано під час обробки результатів геодезичного моніторингу фундаментів сталевих силосів силосного елеватора протягом першого циклу завантаження силосів.

### Мета статті

Аналіз наведених літературних джерел дозволив сформулювати мету, яка полягає у дослідженні впливу армування ґрунту обмеженої глибини на ступінь покращення ґрунтової основи і на середнє загальне осідання фундаменту.

Завданням дослідження є створення методики прогнозування впливу армування ґрунтоцементними елементами на параметри загальної жорсткості ґрунтової основи фундаменту силосу.

Методами дослідження є геодезичний моніторинг осідань по периметру фундаментів силосів при первинному завантаженні на різних елеваторах із різними геологічними умовами.

### Виклад основного матеріалу

Армування основ ґрунтоцементними елементами дає змогу покращити параметри ґрунту і передусім підвищити значення модуля деформації. Наявна теоретична база знань роботи армованих основ під дією вертикальних рівномірно розподілених навантажень у практиці проектування зазвичай обмежується методом пошарового підсумовування із використанням приведенного модуля деформації, який отримується шляхом усереднення нормативного модуля деформації ґрунту і модуля деформації ГЦЕ.

Актуальними є дослідження впливу армування ґрунту обмеженої глибини на роботу ґрунтової основи і на середнє загальне осідання фундаменту, пошук методу прогнозування впливу армованої товщі на основні параметри ґрунтової основи фундаменту силосу.

Для армованих основ глибина розповсюдження стисливої товщі на глибину армування зазвичай відбувається на етапі навантаження власною вагою фундаментів та надземних конструкцій. Надалі експлуатаційні навантаження викликають деформації ґрунту на глибині стисливої товщі, значно більшій за глибину армування.

Під час геодезичного моніторингу перші зняття відліків проводять після монтажу деформаційних марок на зведених спорудах до завантаження зерном. Останній відлік – після повного завантаження силосу.

У процесі проведення дослідження здійснено моніторинг осідань при первинному завантаженні силосів елеватора у м. Старокостянтинів Хмельницької області [13]. Основа під фундаментами силосів представлена інженерно-геологічними умовами:

- ПГЕ-1: насипний ґрунт – суглинок важкий та легкий, від твердого до тугопластичного,  $I_L = 0,08$ ,  $E = 19,0$  МПа;
- ПГЕ-2: суглинок важкий, тугопластичний та напівтвердий,  $I_L = 0,16$ ,  $E = 15,0$  МПа;
- ПГЕ-3а: супісок дресв'яний, твердий,  $I_L = 1,25$ ,  $E = 24,0$  МПа;
- ПГЕ-3б: супісок дресв'яний, пластичний;
- ПГЕ-4: щебенисто-дресв'яний ґрунт із супіщаним заповнювачем, твердим та пластичним,  $I_L = 0$ ,  $E = 35,0$  МПа;
- ПГЕ-5а: вапняк,  $R_{csat} = 1,1$  МПа;
- ПГЕ-5б: вапняк,  $R_{csat} = 3,3$  МПа;
- ПГЕ-6а: суглинок,  $I_L = 0,30$ ,  $E = 15,0$  МПа;
- ПГЕ-6б: суглинок,  $I_L = 0,58$ ,  $E = 12,0$  МПа;
- ПГЕ-7: пісковик,  $R_{csat} = 4,0$  МПа;
- ПГЕ-8: мергель,  $I_L = 0,18$ ,  $E = 22,0$  МПа.

Проведено моніторинг осідань при первинному завантаженні силосів елеватора у с. Біловод Сумської області (рис. 1, 2). Майданчик будівництва характеризується наступними інженерно-геологічними умовами:

- ПГЕ-2: суглинок,  $I_L = 1,25$ ,  $E = 5,5$  МПа;
- ПГЕ-3: супісок,  $E = 6,5$  МПа;
- ПГЕ-4: пісок середньої щільності,  $E = 28,0$  МПа;
- ПГЕ-5: пісок щільний  $E = 37,0$  МПа;
- ПГЕ-6: пісок щільний  $E = 47,0$  МПа.



Рис. 1. Загальний вигляд силосів елеватора у с. Біловод Сумської області

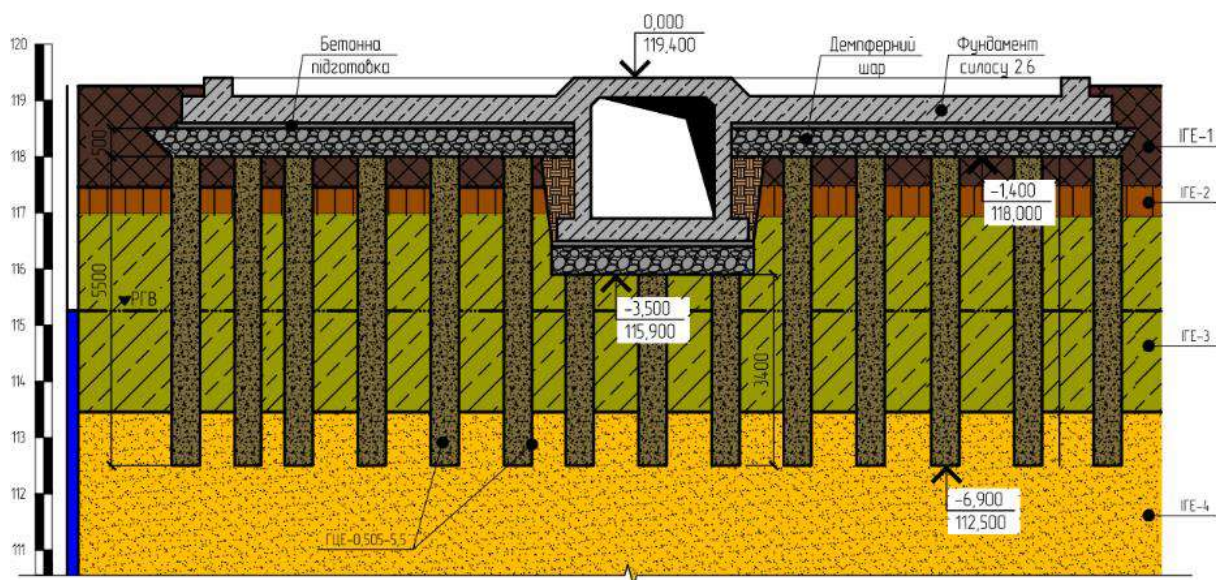


Рис. 2. Схема армування основи фундаменту силосу у с. Біловод Сумської області

Проведено моніторинг осідань при первинному завантаженні силосів елеватора у м. Ніжин Чернігівської області (рис. 3). Інженерно-геологічні умови основи силосів елеватора представлено на рис. 4.



Рис. 3. Загальний вигляд силосів елеватора у м. Ніжин Чернігівської області

Здійснено моніторинг осідань при первинному завантаженні силосу елеватора у с. Григорівка Чернігівської області. Інженерно-геологічні умови основи силосів елеватора та конструкція фундаменту зображено на рис. 5.

Перші зняття відліків проводились після монтажу деформаційних марок на зведених спорудах, але перед початком завантаження зерном [13]. Зняття відліків проводилось після кожного етапу завантаження силосів. Зазвичай це 1/3, 2/3 висоти силосу та на повну висоту силосу. Останній відлік знімався після 100 % завантаження об'єму силосу. Величина навантаження залежить від виду культури, що зберігається в силосі. Зафіксовані осідання силосів наведено на рис. 6–8.

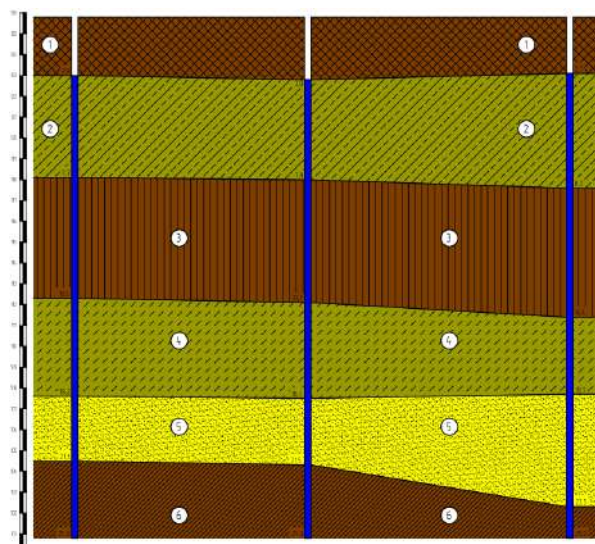


Рис. 4. Інженерно-геологічні умови основи силосів елеватора у м. Ніжин Чернігівської області: ІГЕ-2: супіски,  $I_L = 1,43$ ,  $E = 8,5$  МПа; ІГЕ-3: суглинки,  $E = 9,0$  МПа; ІГЕ-4: супіски,  $E = 12,50$  МПа; ІГЕ-5: пісок щільний,  $E = 47,0$  МПа; ІГЕ-6: суглинки,  $E = 15,0$  МПа

Основні параметри армування ґрунту основи:

- $l$  – глибина армування, м;
- $d$  – діаметр ґрунтоцементного елемента;
- $t$  – товщина демпферного шару, м;
- $H$  – глибина стисливої товщі, м;
- $m_a$  – показник площі армування,  $m_a = \frac{A_{sc}}{A_{гр}}$  –

показник армування ґрунту, де  $A_{гр} = (S_x \times S_y - A_{sc})$  – площа ґрунту без урахування елементів армування;  $A_{sc} = \frac{\pi d^2}{4}$  – площа поперечного перерізу елемента армування;  $S_x, S_y$  – кроки армування у відповідних напрямках, м.

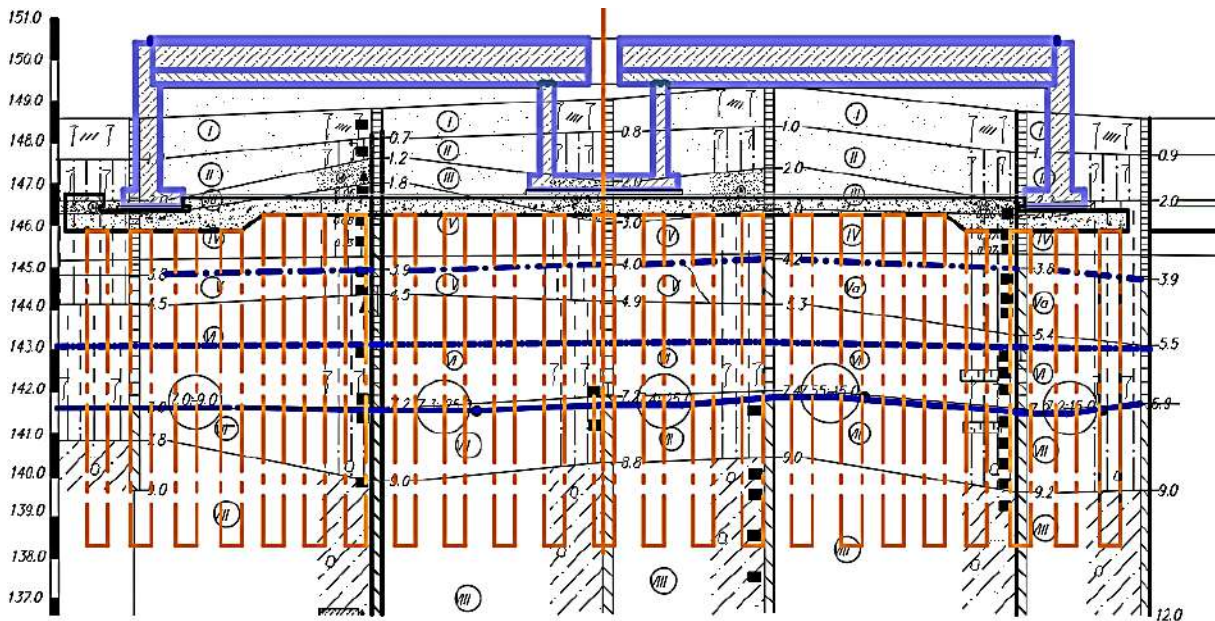


Рис. 5. Інженерно-геологічні умови силосу елеватора у с. Григорівка Чернігівської області:  
 ІГЕ-IV: суглинки,  $I_L = 1,45$ ,  $E = 4,0$  МПа; ІГЕ-V: глини,  $I_L = 0,74$ ,  $E = 4,0$  МПа;  
 ІГЕ-VI: суглинки,  $I_L = 0,54$ ,  $E = 5,4$  МПа; ІГЕ-VII: супіски,  $I_L = 0,3$ ,  $E = 9,8$  МПа;  
 ІГЕ-VIII: супіски,  $I_L = 1,19$ ,  $E = 18,4$  МПа; ІГЕ-IX: суглинки,  $I_L = 0,75$ ,  $E = 10,0$  МПа

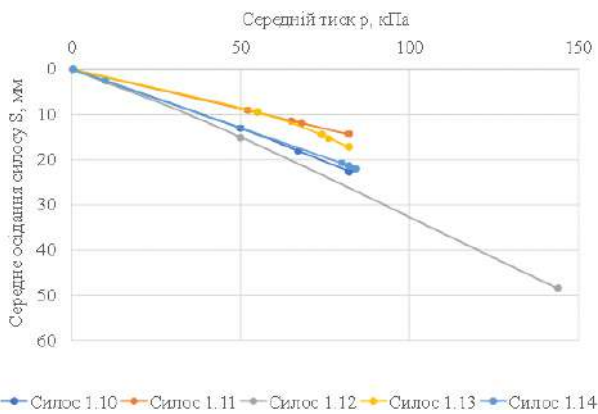


Рис. 6. Графік залежності середнього осідання  $S$ , мм від навантаження зерна  $p$ , кПа елеватора у с. Біловод Сумської області

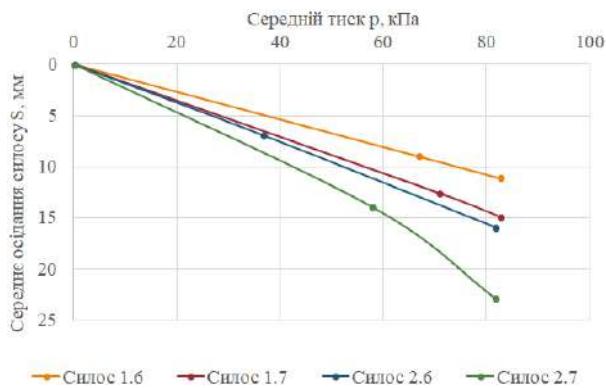


Рис. 7. Графік залежності середнього осідання  $S$ , мм від навантаження зерна  $p$ , кПа елеватора у м. Ніжин Чернігівської області

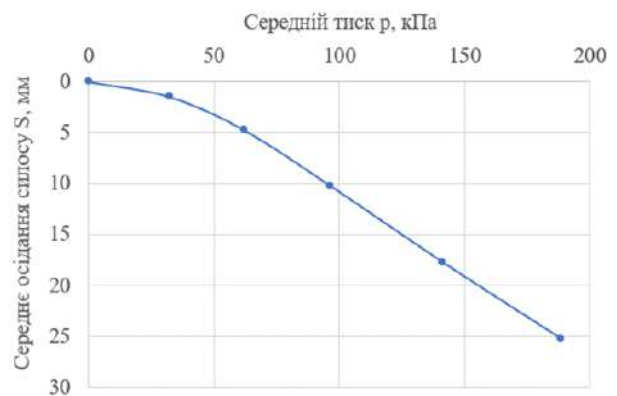


Рис. 8. Графік залежності середнього осідання  $S$ , мм від навантаження зерна  $p$ , кПа елеватора у с. Григорівка Чернігівської області

Важливою характеристикою осідання ґрунтової основи є приведений модуль деформації  $E_{s,i}$  з урахуванням характеристик ґрунтоцементу, що визначається за формулою:

$$E_{s,i} = \lambda \cdot E_{sc} + (1 - \lambda) \cdot E_{\text{норм}}, \quad (1)$$

де  $\lambda = \frac{A_{sc}}{A}$  – коефіцієнт армування основи;

$A_{sc}$  – площа основи, заповнена ґрунтоцементом;

$A$  – розрахункова площа основи, що армується;

$E_{\text{норм}}$  – нормативний модуль деформації ґрунту, МПа;

$E_{sc}$  – модуль деформації ґрунтоцементу, що приймається від 70 МПа до 90 МПа залежно від виду ґрунту і витрат цементу на його виготовлення

відповідно до ДБН В.2.1-10:2018 (табл. 1).

Таблиця 1

Механічні характеристики ГЦЕ

Характеристики основи, підсиленої ґрунтоцементними палями	Характеристичні значення $R$ , МПа та $E_{sc}$ , МПа при марці ґрунтоцементу палі		
	50	75	100
Розрахунковий опір, $R$ , МПа	2	3	5
Модуль деформації, $E_{sc}$ , МПа	70	80	90

Армування основ дозволяє покращити параметри ґрунту і дає змогу застосування для розрахунку осідання підвищеного значення модуля деформації. Середній модуль деформації для ґрунтової товщі вираховується для стисливої товщі  $H$  відповідно до значень додаткових напружень:

$$E_{m,i} = \frac{\sum_{i=1}^n E_i \cdot \alpha_{l,i} \cdot h_i}{\sum_{i=1}^n \alpha_{l,i} \cdot h_i}, \quad (2)$$

де  $E_i$  – модуль деформації  $i$ -го шару ґрунту основи;  $h_i$  – висота  $i$ -го шару ґрунту основи, м.

Значення напружень по глибині основи приймаються з урахуванням коефіцієнта розсіювання  $\alpha_{l,i}$ .

Унаслідок штучного улаштування вертикальних ГЦЕ, які мають структурну міцність, розсіювання напружень по висоті армування значно менше, ніж у неармованій товщі ґрунту. Отже, урахування ефекту розсіювання напружень не враховується в глибині армування.

Для подальших розрахунків визначаються середні значення: нормативного, приведенного, фактичного (експериментального), прогнозованого (розрахункового) модулів деформації.

Під час дослідження проведено геодезичний моніторинг осідань по периметру фундаментів силосів при первинному завантаженні на чотирьох елеваторах із різними геологічними умовами. Параметри армування і діаметри фундаментів теж мали відмінності. При відповідних навантаженнях і величинах осідань визначались характеристики жорсткості основи, як для штампа круглої форми діаметру  $D$  – діаметру силосу. Згідно з нормами інженерних вишукувань для будівництва модуль деформації  $E_{шт}$  при первинному завантаженні для умовно лінійної ділянки залежності «тиск  $p$  – осідання  $S$ » розраховується за формулою Шлейхера:

$$E_{шт} = 0,79(1 - \nu^2) \frac{p}{S} D, \quad (3)$$

де  $\nu$  – коефіцієнт Пуассона.

Для покращених основ великорозмірних фун-

даментів модуль деформації ґрунтової основи може бути підвищеним за рахунок коефіцієнта умов роботи ґрунту  $m_c$ , який визначають залежно від розміру фундаменту:

$$m_c = \left( \frac{A_\phi}{A_0} \right)^{\frac{n}{2}}, \quad (4)$$

де  $A_\phi$  – площа фундаменту, м<sup>2</sup>;

$A_0$  – площа еталонного штампа,  $A_0 = 1$  м<sup>2</sup>;

$n$  – параметр, що залежить від виду ґрунту, який визначається за формулою:

$$n = 1 - \frac{2 \lg \frac{\Delta s_1}{\Delta s_2}}{\lg \frac{A_1}{A_2}}, \quad (5)$$

де  $\Delta s_1$  та  $\Delta s_2$  – приріст осідань штампів з площами  $A_1$  та  $A_2$  від додаткового тиску за результатами випробування шару ґрунту, см.

За браком даних штампових випробувань значення параметра  $n$  для неармованих основ приймають: для флювіогляціальних ґрунтів як 0,1–0,2; для інших пілувато-глинистих ґрунтів як 0,15–0,3; для піщаних ґрунтів як 0,25–0,5.

Отримане значення середнього експериментального модуля деформації основи для відповідного етапу завантаження за формулою Шлейхера має бути зниженим з урахуванням коефіцієнта умов роботи основи:

$$E_{m,факт} = \frac{E_{шт}}{m_c}. \quad (6)$$

Прогнозування ступеня покращення ґрунтової основи армуванням вертикальними ГЦЕ пропонується виконувати за допомогою середнього прогнозованого модуля деформації  $E_{m,i,прогн}$  із використанням середнього нормативного модуля деформації ґрунту  $E_{m,i,норм}$ :

$$E_{m,i,прогн} = E_{m,i,норм} \cdot k_{Ei}. \quad (7)$$

Коефіцієнт  $k_{Ei}$  визначається за формулою:

$$k_{Ei} = 1 + \left( \frac{(1+t - \frac{H_i}{l}) \cdot E_{m,H} \cdot m_A \cdot m_E \cdot m_c \cdot (1+\Delta\beta_i) \cdot (1-n)}{\beta \cdot H_{m,i} \cdot E_{m,i}} \right), \quad (8)$$

де  $m_E$  – показник жорсткості армування:

$$m_E = \frac{E_{sc}}{E_{норм,i}}; \quad (9)$$

$\beta$  – коефіцієнт, що враховує бічне розширення ґрунту.

Із використанням характеристики приведенного модуля деформації визначається фіктивний приведений коефіцієнт умов роботи ґрунту:

$$m_{red} = \frac{E_{шт}}{E_{red}}. \quad (10)$$

Отже, скоригувати, уточнити або визначити параметр  $n$ , що залежить від виду ґрунту, з урахуванням впливу армованої основи за експериментальними даними можливо, використовуючи фіктивний приведений коефіцієнт умов роботи ґрунту:

$$k_{Ei} = 1 + \left( \frac{(1+t - \frac{H_i}{l}) \cdot E_{m,H,i} \cdot m_A \cdot m_E \cdot m_{red} \cdot (1+\Delta\beta_i) \cdot (1-n)}{\beta \cdot H \cdot E_{m,i}} \right). \quad (11)$$

У результаті дослідження визначено параметри  $n$  для експериментальних армованих на обмежену глибину основ. Так, за формулою (11) можливе використання оцінки впливу армування для визначення фактичних параметрів покращеної ґрунтової основи  $n$  за даними геодезичного моніторингу. Співставлення середніх значень приведеного і прогнозованого модулів деформації свідчить про їх відмінність.

Власна вертикальна деформація ГЦЕ армування основи в умовах обмеженого осідання визначається:

$$S_{sc} = \frac{4 \cdot p_i \cdot l}{\pi \cdot d^2 \cdot S_x \cdot S_y \cdot E_{sc}}. \quad (12)$$

Порівняння величини фактичних осідань і розрахункових вертикальних деформацій ГЦЕ на відповідних етапах завантаження свідчить про виникнення додаткових зусиль в елементах армування на глибинах стисливої товщі нижче глибини армування. Ступінь довантаження елементів армування можна орієнтовно визначити у відсотках за формулою:

$$r = \frac{S_i \cdot H_i}{S_{sc,i} \cdot l} \cdot 100. \quad (13)$$

За результатами експериментального дослідження можна зазначити, що саме довантаження елементів армування викликає зростання жорсткості основи, яка суттєво впливає на загальне осідання.

Застосування запропонованої методики дозволило отримати результати, представлені на рис. 9–18. Виявлено екстремум на графіках експериментальних значень модулів деформації (рис. 9, 11, 13, 15). Значення максимуму екстремуму на глибині  $H_{ex}$  було віднесено до глибини армування  $l$  з урахуванням товщини демпферного шару  $t$  і параметра  $n$ , що залежить від виду ґрунту. Для відношення вказаних параметрів було отримано емпіричне значення, що орієнтовно дорівнює 5. За відомих основних параметрів ґрунту  $n$  і стисливої товщі ґрунту  $H$ , що відповідає

значенню середнього максимального тиску під підшвою фундаменту  $p$ , а також з урахуванням показника площі армування  $m_a$  встановлено емпіричну залежність для визначення ефективної товщини армування:

$$l_{ex} = \frac{H_{ex}}{5n + m_a} - t. \quad (14)$$

З урахуванням зниження значень тиску у нижній частині стисливої товщі основи при проектуванні армування основи проєктна довжина армування може бути зменшена:

$$l = 0,75 \cdot \frac{H}{5n + m_a} - t. \quad (15)$$



Рис. 9. Графік порівняння середніх модулів деформації основи фундаментів силосу 10.12 у м. Старокостянтинів Хмельницької області



Рис. 10. Графік порівняння розрахункового коефіцієнта покращення основи силосу 10.12 у м. Старокостянтинів Хмельницької області з експериментальними значеннями

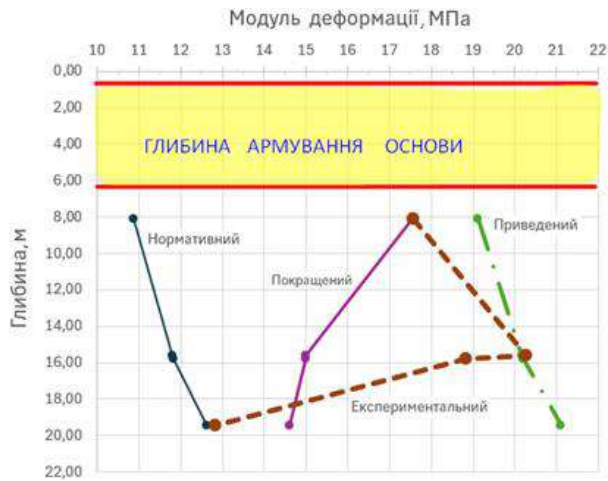


Рис. 11. Графік порівняння середніх модулів деформації основи фундаментів силосу 1.10 у с. Біловод Сумської області

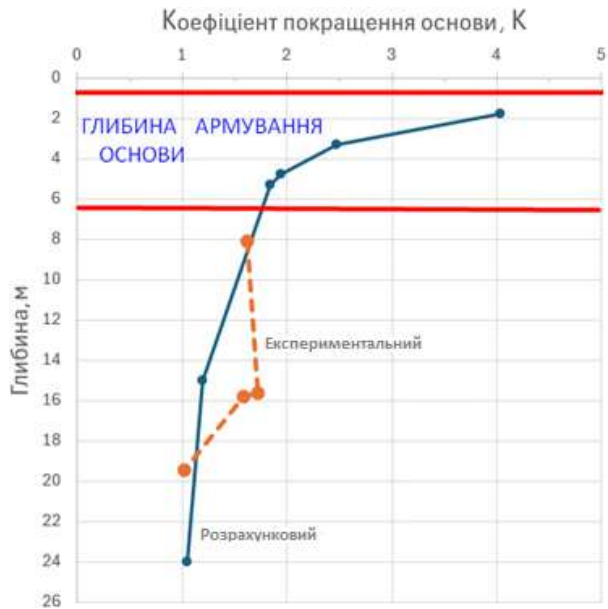


Рис. 12. Графік порівняння розрахункового коефіцієнта покращення основи силосу 1.10 у с. Біловод Сумської області з експериментальними значеннями

Глибина стисливої товщі визначається на підставі умови:

$$k \cdot \sigma_{zg,H} = \sigma_{zp,H} \quad (16)$$

де  $\sigma_{zg,H}$  – побутовий тиск на нижній межі стисливої товщі;

$\sigma_{zp,H}$  – додатковий тиск на нижній межі стисливої товщі.

Врахування розмірів фундаментів шляхом застосування універсального коефіцієнта  $k$  приймається згідно з методикою І. Я. Лучковського і О. В. Самородова [14] за виразом:

$$k = 0,2 + th(0,09lnb) \approx 0,0841lnb + 0,2085, \quad (17)$$

де  $b$  – ширина (діаметр) фундаменту, м.



Рис. 13. Графік порівняння середніх модулів деформації основи фундаментів силосу 1.7 у м. Ніжин Чернігівської області

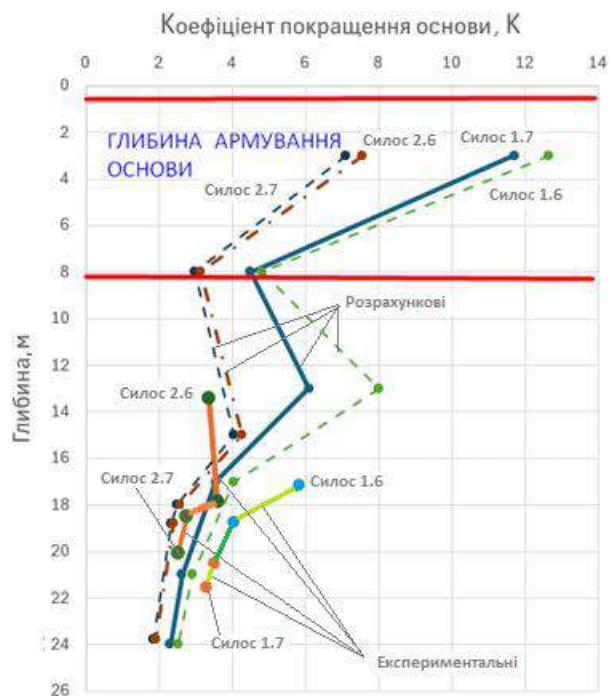


Рис. 14. Графік порівняння розрахункового коефіцієнта покращення основи силосів 1.6, 1.7, 2.6, 2.7 у м. Ніжин Чернігівської області з експериментальними значеннями

Отже, формулу для визначення глибини стисливої товщі можна записати у вигляді:

$$H = \frac{\alpha_i \cdot (q_{aw} + p_i) \cdot \sum \alpha_i \cdot h_i}{k \cdot \sum \alpha_i \cdot h_i \cdot \gamma_i} \quad (18)$$

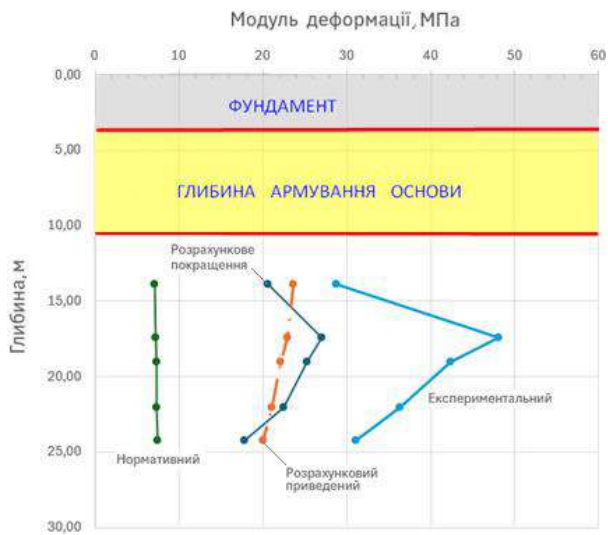


Рис. 15. Графік порівняння середніх модулів деформації основи фундаментів силосу у с. Григорівка Чернігівської області

Аналіз графіків, представлених на рис. 10, 12, 14, 16, свідчить, що вплив армування обмеженої глибини розповсюджується по всій глибині стисливої товщі і має характер спадання. За експериментальними значеннями відзначається позитивний стрибок покращення основи на певній глибині неармованої основи із наступним стрімким зниженням. Тож можна

виділити певну глибину стисливої товщі з ефективною жорсткістю, а нижче – зоною спаду.

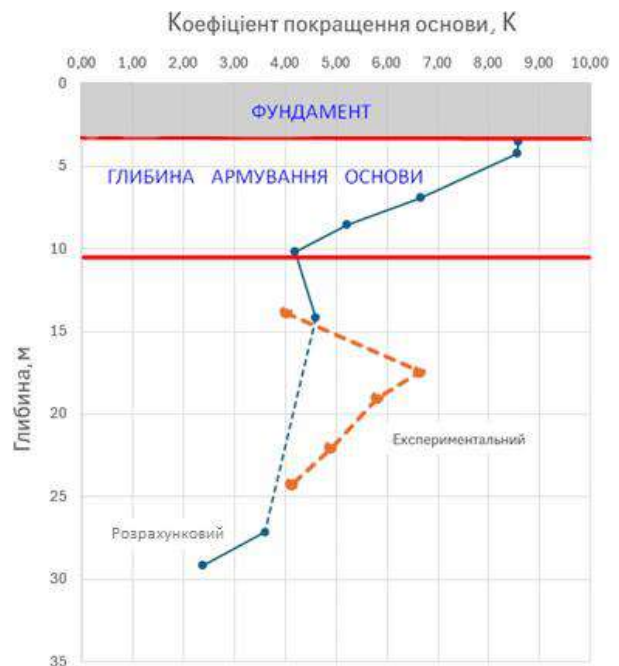


Рис. 16. Графік порівняння розрахункового коефіцієнта покращення основи силосу у с. Григорівка Чернігівської області з експериментальними значеннями

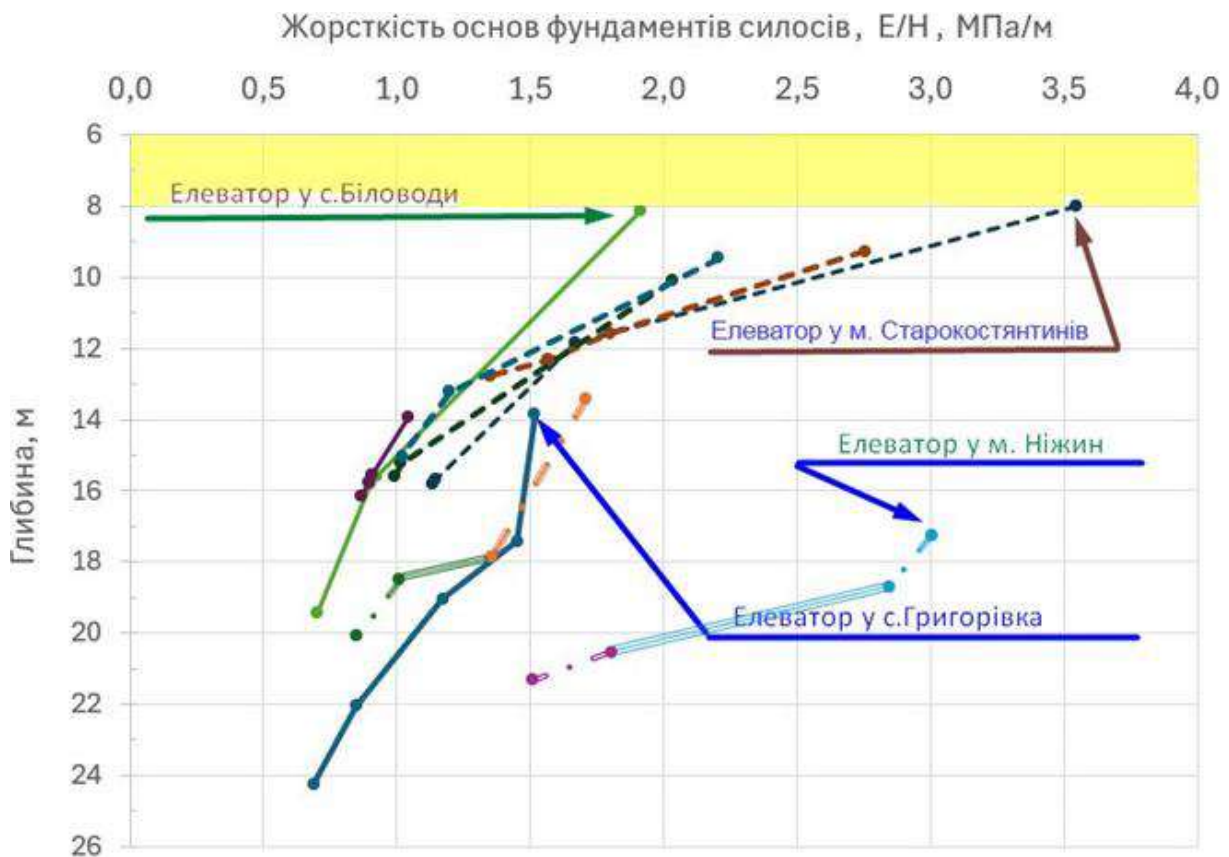


Рис. 17. Графіки порівняння жорсткостей основ фундаментів силосів різних елеваторів



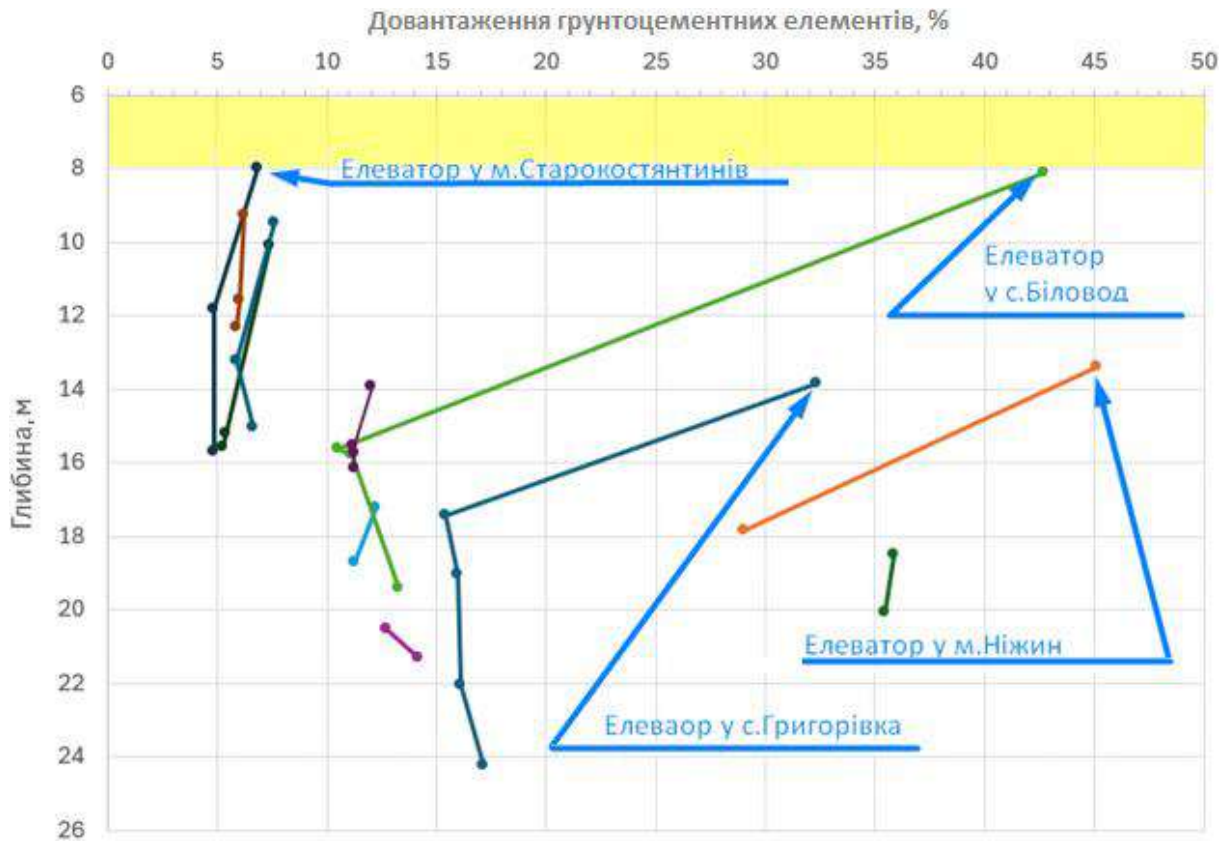


Рис. 18. Графіки зусиль у вертикальних ґрунтоцементних елементах елеваторів під час навантаження. Робота ґрунтоцементних елементів при збільшенні глибини стисливої товщі ґрунту

Аналіз графіків, представлених на рис. 18, свідчить, що фаза довантаження ґрунтоцементних елементів знаходиться в межах глибини ефективної жорсткості основи. На глибині спаду жорсткості довантаження елементів армування основи майже не відбувається.

На основі експериментальних даних (рис. 17) можна класифікувати найвищу жорсткість основи для

скельних і напівскельних ґрунтів – вище 3 МПа/м, пісків – від 1,5 МПа/м до 3 МПа/м і глинистих ґрунтів – нижче 1,5 МПа/м.

Фактичні та розрахункові параметри армування основи силосів, наведені у табл. 2, свідчать про збіг теоретичного розрахунку з експериментальними даними до 10 %.

Таблиця 2

Фактичні та розрахункові параметри армування основи силосів

№ з/п	Назва об'єкта	Параметри армування основи								
		Фактичні			Розрахункові					
		$t, \text{ м}$	$l, \text{ м}$	$H_{ex}, \text{ м}$	$\frac{H_{ex}}{l + t_a}$	$n$	$\frac{5H_{ex}}{n(l + t)}$	$m_a$	$5n + m_a$	$l = \frac{H_{ex}}{5n} - t$
1	Біловод	1	5,5	15,6	2,4	0,45	5,33	0,13	2,38	5,55
2	Ніжин	1	8	18	2,0	0,35	5,71	0,24	1,99	8,05
3	Старокостянтинів	0,8	4	12,5	2,6	0,45	5,79	0,16	2,41	4,39
4	Григорівка	2,3	8	17,4	1,66	0,3	5,52	0,17	1,67	7,92

Під час дослідження для розрахунку осідань плитних фундаментів здійснено аналітичне моделювання основ, армованих вертикальними ГЦЕ, що порівнювалось із розрахунком МСЕ. В аналітичному і чисельному моделюванні покращеної основи прийнята глибина стисливої товщі, яка піддається впливу армування  $H = H_{ex}$ . Саме з причини обме-

ження глибини стисливої товщі і гарантовано високих модулів деформацій підстильного шару було запропоновано використання методу лінійно-деформованого шару. Урахування дискретного армування обмеженої глибини стисливої товщі є модифікацією аналітичного методу. Водночас для моделювання МСЕ основи важливо врахувати не тільки модуль деформації,

але й особливості передачі зусиль з армувальних елементів по глибині стисливої товщі. Грунтоцементні елементи передають зусилля крізь армовану товщу  $H_l$  пропорційно жорсткості навколишніх елементів.

Глибина стисливої товщі визначається на підставі формули (16).

Розрахункове осідання визначається шляхом заміни величини осідання неармованого ґрунту в межах глибини армування  $S_{Hl}$  від тиску  $p_{Hl}$ , що відповідає глибині стисливої товщі в межах армування значенням осідання армованого ґрунту  $S_{Hl}^{sc}$  при аналогічному тиску:

$$S_N = S_0 - S_{Hl} + S_{Hl}^{sc} \cdot \frac{m_1}{2}, \quad (19)$$

де  $S_0$  – осідання ґрунтової основи від повного розрахункового тиску;

$m_1$  – показник податливості ґрунту:

$$m_1 = \frac{S_{Hl}}{S_{Hl}^{sc}}; \quad (20)$$

$m_{sc}$  – показник податливості елементів армування:

$$m_{sc} = \frac{S_0^{sc}}{S_{Hl}^{sc}}. \quad (21)$$

У випадках армування слабких ґрунтів за умови  $m_1 > m_{sc}$ :

$$S_N = S_2 + S_0^{sc} \cdot \frac{m_2}{2}, \quad (22)$$

де  $m_2$  – показник податливості ґрунтоцементу:

$$m_2 = \frac{S_{Hl}}{S_0^{sc}}. \quad (23)$$

Значення осідання неармованого ґрунту  $S_0$  від тиску  $p_0$  в межах стисливої товщі  $H$  визначається за методом лінійно-деформованого шару з використанням формули:

$$S_0^H = \left( \frac{p_0 \cdot D \cdot k_c^H}{k_m^m} \right) \times \left( \frac{k_H - k_{Hl}}{E_m} + \frac{k_{Hl}}{E_{Hl}} \right), \quad (24)$$

де  $k_c^H, k_m^m, k_H, k_{Hl}$  – емпіричні коефіцієнти.

Для звичайних ґрунтових умов у випадках армування слабких ґрунтів за умови  $m_1 < m_{sc}$  значення осідання неармованого ґрунту  $S_{Hl}$  в межах стисливої товщі  $H$  від тиску  $p_{Hl}$ , що відповідає значенню стисливої товщі в межах армування  $l$ ,

розраховується за формулою:

$$S_{Hl} = \left( \frac{p_{Hl} \cdot d \cdot k_c^{Hl}}{k_m^i} \right) \times \left( \frac{k_{Hl}}{E_i} \right), \quad (25)$$

де  $k_c^{Hl}, k_m^i$  – емпіричні коефіцієнти.

Для умов армування слабких ґрунтів основи при  $m_1 > m_{sc}$  приймається значення осідання ґрунту нижче армованої товщі  $S_2$  від повного значення тиску  $p_0$  в межах армування  $l$ . Відповідно,  $S_2$  визначається за формулою:

$$S_2 = \left( \frac{p_0 \cdot d \cdot k_c^H}{k_{m2}} \right) \times \left( \frac{k_H - k_{Hl}}{E_2} \right). \quad (26)$$

Для великорозмірних фундаментів модуль деформації підстильного шару  $E_2$  приймається з підвищеним значенням за рахунок коефіцієнта  $m_c$ , що визначається за формулою (4).

Значення осідання ґрунтоцементних елементів  $S_{sc}$  для звичайних ґрунтових умов при  $m_{sc} > m_1$  розраховується від значення тиску  $p_{Hl}$ , що відповідає значенню стисливої товщі в межах армування  $l$ .

Для ґрунтових умов основи при  $m_{sc} < m_1$  осідання розраховується для повного тиску  $p_0$ :

$$S_{sc} = \frac{4 \cdot p_{Hl} \cdot d \cdot l \cdot a}{\pi \cdot d^2 \cdot n \cdot E_{sc}}. \quad (27)$$

де  $d$  – діаметр ґрунтоцементного елемента;

$n$  – кількість ґрунтоцементних елементів на одиницю довжини фундаменту  $a$ .

Результати розрахунків згідно із запропонованою методикою було перевірено шляхом чисельного моделювання напружено-деформованого стану основи силосу, армованого ГЦЕ, за допомогою МСЕ. Розподілення напружень в армованій товщі та за її межами представлено на рис. 19.

Слід зазначити, що розсіювання напружень в зоні армування відсутнє. Нижче глибини армування відзначається незначне розсіювання напружень на крайніх (периметральних) ділянках. З огляду на незначне розсіювання напружень по глибині стисливої товщі і той факт, що сусідні силоси можуть бути наближеними один до одного лише в квадрантах периметральної окружності, взаємний вплив на осідання силосів може не враховуватись.

Графік порівняння розрахункових деформацій осідання для армованих основ з модулями деформації ґрунтів 3 МПа, 6,5 МПа, 10 МПа, представлений на рис. 20, свідчить, що розбіжність результатів розрахунків за методом лінійно-деформованого шару і за методом скінченних елементів становить до 5 %.

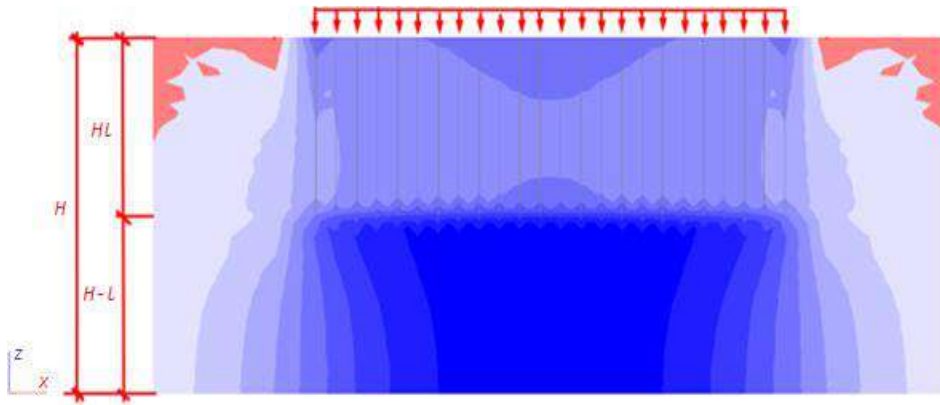


Рис. 19. Результати моделювання напруженого стану основи силосу, армованої ґрунтоцементними елементами

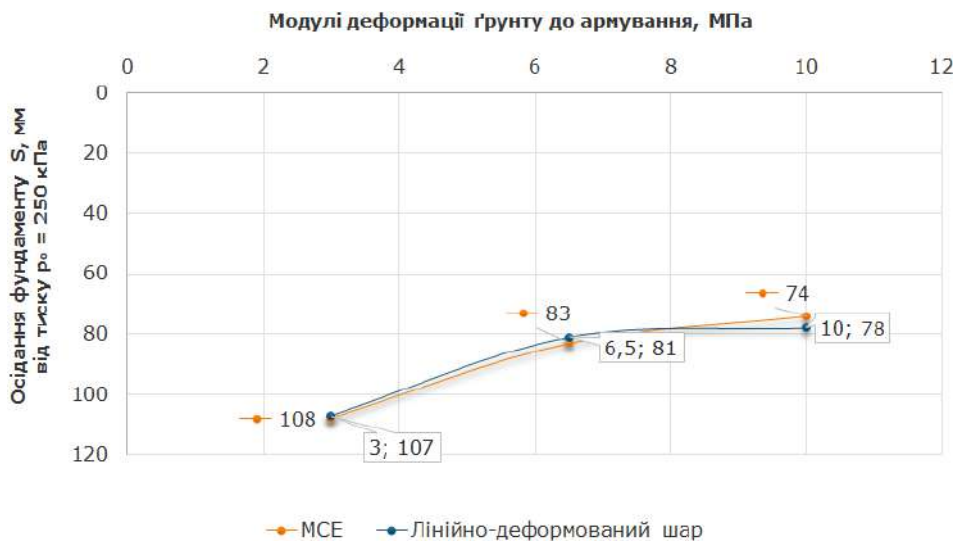


Рис. 20. Графік порівняння розрахункових деформацій осідання за методом лінійно-деформованого шару і за методом скінчених елементів

## Висновки

Методика прогнозування впливу армування ґрунтоцементними елементами на параметри загальної жорсткості ґрунтової основи фундаменту силосу апробована на основах силосів різних елеваторів з різними інженерно-геологічними умовами.

Підтвердженням справедливості припущень представленої методики прогнозування і аналітичного моделювання є збіг із результатами геодезичного моніторингу осідань по периметру фундаментів силосів при первинному завантаженні, а також, відповідно, результатами моделювання методом скінчених елементів.

На підставі критичного огляду літературних джерел, апробації та підтвердження натурними експериментами результатів запропонованої методики можна зробити наступні висновки:

1. Армування основи фундаменту вертикальними ґрунтоцементними елементами певної глибини дозволяє ефективно покращити параметри ґрунту основи по всій глибині стисливої товщі.

2. У цьому дослідженні запропоновано методику оцінювання впливу армування ґрунтоцементними елементами у вигляді коефіцієнта покращення ґрунтової основи  $k_{Ei}$ .

3. Доведено ключову роль роботи ґрунтоцементних елементів армування та їх довжини у покращенні основи на глибині стисливої товщі і поза межами армування.

4. Запропоновано використовувати отриману методику оцінки впливу армування для визначення фактичних параметрів покращеної ґрунтової основи  $n$  за даними геодезичного моніторингу.

5. Досліджено вплив армування обмеженої глибини на покращення ґрунтової основи. Отримано емпіричну залежність визначення необхідної глибини армування при заданих значеннях глибини стисливої товщі основи.

6. Запропоновано використання методу лінійно-деформованого шару із урахуванням роботи ґрунтоцементних елементів у вигляді дискретного армування ґрунту.

7. Чисельні експерименти із використанням

МСЕ підтверджують високу збіжність результатів розрахункових осідань згідно із запропонованим методом розрахунку.

### Література

1. Винников, Ю. Л. Розрахунок фундаментної плити силосів на армованій стохастичній основі [Текст] / Ю. Л. Винников, М. О. Харченко, В. І. Марченко // *Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика*. — 2012. — №3. — С. 26—32. — Режим доступу: <https://doi.org/10.15802/btrp2012/26411>
2. Bernardes, H. C. Numerical Analysis of Piled Raft Foundations Designed for Settlement Control on Steel Grain Silos in Collapsible Soils. [Текст] / H. C. Bernardes, H. L. de Souza Filho, A. D. Dias, R. P. da Cunha // *International Journal of Civil Engineering*. — 2021. — V. 19(5). — P. 607—622. — Режим доступу: <http://doi:10.1007/s40999-020-00586-5>
3. Halder, P. Performance evaluation of piled rafts in sand based on load-sharing mechanism using finite element model. [Текст] / P. Halder, B. Manna // *International Journal of Geotechnical Engineering*. — 2022. — V. 16(5). — P. 574—591. — Режим доступу: <http://doi:10.1080/19386362.2020.1729297>
4. Banerjee, R. Settlement behaviour of a pile raft subjected to vertical loadings in multilayered soil. [Текст] / R. Banerjee, S. Bandyopadhyay, A. Sengupta, G. R. Reddy // *Geomechanics and Geoengineering*. — 2022. — V. 17(1). — P. 282—296. — Режим доступу: <http://doi:10.1080/17486025.2020.1739754>
5. Винников, Ю. Л. Математичне моделювання взаємодії фундаментів з ущільненими основами при їх зведенні та наступній роботі [Текст]: монографія / Ю. Л. Винников. — Полтава: ПолтНТУ імені Юрія Кондратюка, 2016. — Вид. 2-ге, перероб. і доп. — 280 с. — Режим доступу: <https://reposit.nupp.edu.ua/handle/PoltNTU/157>
6. Винников, Ю. Л. Оцінювання деформованого стану армованих основ зернохосовищ при циклічному режимі завантаження за просторовою задачею методу скінчених елементів [Текст] / Ю. Л. Винников, В. І. Марченко // *Збірник наукових праць [Полтавського національного технічного університету імені Ю. Кондратюка]. Сер.: Галузеве машинобудування, будівництво*. — 2012. — №4(1). — С. 79—86. — Режим доступу: [https://reposit.nupp.edu.ua/bitstream/PoltNTU/7382/1/Znpgmb\\_2012\\_4%281%29\\_12.pdf](https://reposit.nupp.edu.ua/bitstream/PoltNTU/7382/1/Znpgmb_2012_4%281%29_12.pdf)
7. Шаповал, В. Г. Прогнозування осідань армованих основ зернохосовищ у часі з урахуванням механічних і реологічних властивостей ґрунту [Текст] / В. Г. Шаповал, А. В. Шаповал, В. І. Марченко // *Збірник наукових праць [Полтавського національного технічного університету імені Ю. Кондратюка]. Сер.: Галузеве машинобудування, будівництво*. — 2012. — №4(2). — С. 202—208. — Режим доступу: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Znpgmb\\_2012\\_4\(2\)\\_33](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Znpgmb_2012_4(2)_33)
8. Shiva Bhushan, J. Y. V. Re-evaluation of Failure of Silo Tower Foundations [Текст] / J. Y. V. Shiva Bhushan, A. A. Mohammed, M. Madhira // *Ground Characterization and Foundations. Lecture Notes in Civil Engineering / eds. by C. N. V. Satyanarayana Reddy, K. Muthukumar, N. Satyam, R. Vaidya*. — Singapore: Springer, 2022. — V. 167. — P. 831—843. — Режим доступу: [https://doi.org/10.1007/978-981-16-3383-6\\_72](https://doi.org/10.1007/978-981-16-3383-6_72)
9. Santrač, P. Analysis of calculated and observed settlements of the silo on loess [Текст] / P. Santrač, Ž. Bajić, S. Grković, D. Kukaras, I. Hegediš // *Tehnicky vjesnik-Technical Gazette*. — 2015. — V. 22. — №2. — P. 539—545. — Режим доступу: <https://doi.org/10.17559/TV-20140615132437>
10. Sadaoui, O. Field measurements and back calculations of settlements of structures founded on improved soft soils by stone columns. [Текст] / O. Sadaoui, R. Bahar // *European Journal of Environmental and Civil Engineering*. — 2019. — V. 23(1). — P. 85—111. — Режим доступу: <https://doi.org/10.1080/19648189.2016.1271358>
11. Зоценко, М. Л. Бурові ґрунтоцементні палі, які виготовляються за бурозмішувальним методом [Текст]: монографія / М. Л. Зоценко, Ю. Л. Винников, М. Л. Зоценко. — Харків: «Друкарня Мадрид», 2016. — 94 с. — Режим доступу: [https://reposit.nupp.edu.ua/bitstream/PoltNTU/2062/1/Монографія\\_М\\_Л\\_10\\_07\\_15.pdf](https://reposit.nupp.edu.ua/bitstream/PoltNTU/2062/1/Монографія_М_Л_10_07_15.pdf)
12. Butenko, A. Efficient Designs of Reinforced Concrete Foundations of Silos at Grain Transfer Terminals [Текст] / A. Butenko, A. Mozgovyi // *AIP Conference Proceedings*. — AIP Publishing. — 2023. — V. 2684. — P. 030006. — Режим доступу: <https://doi.org/10.1063/5.0120364>
13. Бутенко А. А. Результати моніторингу осідань основ фундаментів силосів, армованих ґрунтоцементними елементами [Текст] / А. А. Бутенко, А. О. Мозговий // *Комп'ютерне господарство міст*. Харків. — 2024. — Т. 1. — Вип. 182. — С. 61—73. — Режим доступу: <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2024-1-182-61-73>
14. Самородов, О. В. Експериментальне обґрунтування нової методики призначення модуля деформації ґрунтів основи великорозмірних пальово-плитних фундаментів [Текст] / О. В. Самородов, В. Б. Нікулін, О. В. Кротов, І. В. Храпцова, Я. С. Капустянська // *Науковий вісник будівництва*. — 2020. — Т. 100. — № 2 — С. 101—108. — Режим доступу: <https://files.znu.edu.ua/files/2021/NVB/NVB2020n2/18.pdf>

### References

1. Vinnikov, Yu. L., Kharchenko, M. O., V. I. Marchenko, V. I. (2012). Calculation of the foundation slab of silos on a reinforced stochastic basis. *Bridges and tunnels: theory, research, practice*, 3, 26-32. <https://doi.org/10.15802/btrp2012/26411>
2. 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(5), 607-622. <http://doi:10.1007/s40999-020-00586-5>
3. 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. <http://doi:10.1080/19386362.2020.1729297>
4. 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. <http://doi:10.1080/17486025.2020.1739754>
5. Vinnikov, Yu. L. (2016). *Mathematical modeling of foundations interaction with compacting basics during their construction and following work*. 2nd ed. Poltava: Yuriy Kondratyuk National Technical University (in Ukr.). <https://reposit.nupp.edu.ua/handle/PoltNTU/157>
6. Vynnikov, Yu. L., Marchenko, V. I. (2012). Evaluation of the deformed state of reinforced foundations of granaries under cyclic loading mode according to the spatial problem of the finite element method. *Collection of scientific papers [Poltava National Technical University named after Yu. Kondratyuk]. Ser.: Industrial engineering, construction*, 4(1), 79-86. [https://reposit.nupp.edu.ua/bitstream/PoltNTU/7382/1/Znpgmb\\_2012\\_4%281%29\\_12.pdf](https://reposit.nupp.edu.ua/bitstream/PoltNTU/7382/1/Znpgmb_2012_4%281%29_12.pdf)
7. Shapoval, V. G., Shapoval, A. V., Marchenko, V. I. (2012). Forecasting the settlement of reinforced foundations of granaries in time taking into account the mechanical and rheological properties of the soil. *Collection of scientific papers [Poltava*

National Technical University named after Yu. Kondratyuk]. Ser.: *Industrial engineering, construction*, 4(2), 202-208. [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Znpgmb\\_2012\\_4\(2\)\\_33](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Znpgmb_2012_4(2)_33)

8. Shiva Bhushan, J. Y. V., Mohammed, A. A., Madhira, M. (2022). Re-evaluation of Failure of Silo Tower Foundations. *Ground Characterization and Foundations. Lecture Notes in Civil Engineering*. Singapore: Springer, 167, 831-843. [https://doi.org/10.1007/978-981-16-3383-6\\_72](https://doi.org/10.1007/978-981-16-3383-6_72)

9. 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. <https://doi.org/10.17559/TV-20140615132437>

10. 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>

11. Zotsenko, N.L., Vinnikov, Yu. L., Zotsenko, V.N. (2016). *Soil-cement piles by drilling-mixing technology*. Kharkiv: «Madrid Edition» (in Ukr.). [https://reposit.nupp.edu.ua/bitstream/PoltNTU/2062/1/Монографія\\_Н\\_Л\\_10\\_07\\_15.pdf](https://reposit.nupp.edu.ua/bitstream/PoltNTU/2062/1/Монографія_Н_Л_10_07_15.pdf)

12. Butenko, A., Mozgovyi, A. (2023). Efficient Designs of Reinforced Concrete Foundations of Silos at Grain Transfer Terminals. *AIP Conference Proceedings. AIP Publishing*, 2684, 030006. <https://doi.org/10.1063/5.0120364>

13. Butenko, A. A., Mozhovyi, A. O. (2024). Results of monitoring the subsidence of silo foundations reinforced with soil-cement elements. *Municipal economy of cities*, 1(182), 61-73. <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2024-1-182-61-73>

14. Samorodov, O. V., Nikulin, V. B., Krotov, O. V., Khrapatova, I. V., Kapustyanska, I. S. (2020). Experimental substantiation of the new methodology for determining the soil deformation modulus of the base of large pile-slab foundations. *Scientific Construction Gazette*, 100(2), 101-108. <https://files.znu.edu.ua/files/2021/NVB/NVB2020n2/18.pdf>

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. Д.В. Кочкар'юв, Національний університет водного господарства та природокористування, 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](mailto: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](mailto:mozgovoyandrey@ukr.net)  
ID ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9142-3169>

## EVALUATION OF DEFORMATION PARAMETERS OF SILO FOUNDATIONS REINFORCED WITH SOIL-CEMENT ELEMENTS

A. Butenko, A. Mozhovyi

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

*The mandatory controlled criterion for steel silos is the limitation of foundation settlement and tilting, which is regulated by DBN V.2.6-221:2021. The threshold value of silo settlement is  $S_{max,u} = 150$  mm. The most economical foundation solution is a large-sized slab on a natural base or a soil cushion. It is possible to stabilise the weak base by reinforcing it with vertical soil-cement elements (SCE). In Ukraine, most foundations have an underground gallery or silo floor. When the silos are first loaded, there is geodetic monitoring of the vertical settlement of the silo base and comparison of its data with the threshold values of settlement and tilting.*

*The objective is to investigate the effect of limited-depth soil reinforcement on the stabilisation of the soil base and the average total foundation settlement. The task of the study is to create a methodology for predicting the impact of reinforcement with soil-cement elements on the parameters of the soil base general stiffness for a silo foundation. The research methods are geodetic monitoring of settlements around the perimeter of silo foundations during initial loading at four different elevators with different geological conditions.*

*Thus, the predicting method of the impact while reinforcing with soil-cement elements on the general stiffness parameters of the soil base for the silo foundation was tested on the bases of silos for four elevators. These elevators represent different engineering and geological conditions. The proof of the methodology's validity is the coincidence with the results of geodetic subsidence monitoring along the perimeter of silo foundations.*

*According to the research results, it is possible to state that the reinforcement of the foundation base with vertical soil-cement elements allows for the effective stabilisation of soil parameters. We propose an evaluation method of the reinforcement effect with soil-cement elements in the form of the stabilisation coefficient for the soil base,  $k_{Ei}$ . We further prove the primary role of the soil-cement reinforcing elements operation and their length while stabilising the base. The base stiffness is stabilised at the compressible stratum depth and beyond the foundation boundaries. It is possible to use the method of reinforcement influence evaluation to determine the actual parameters of the stabilised soil base,  $n$ , according to geodetic monitoring data. The authors have studied the effect of limited depth reinforcement for stabilising the foundation. The research obtained the empirical dependence of the reinforcement required depth at given depth values for the base compressible layer.*

*The authors proposed using the linearly deformed layer method, considering the operation of soil-cement elements as discrete soil reinforcement. The numerous experiments with the Finite Element Method confirm the high convergence of the calculated results with those obtained analytically.*

**Keywords:** foundation settlement, soil-cement element, geodetic monitoring, steel silo, foundation stiffness.