

УДК 624.954

**ОСОБЛИВОСТІ КОНСТРУКЦІЙ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ФУНДАМЕНТІВ СИЛОСІВ
ЗБІЛЬШЕНИХ РОЗМІРІВ**

Д-р техн. наук А. О. Мозговий, асп. А. А. Бутенко

**THE EFFECTIVE STRUCTURES OF REINFORCED CONCRETE FOUNDATION
OF SYLOSES AT GRAIN TRANSFER TERMINALS**

Dr. Sc. (Tech.) A. Mozgovuy, postgraduate student A. Butenko

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.199.2022.258797>



Анотація. Розглянуто конструкції залізобетонних заглиблених фундаментів з підземними галереями та фундаментів з надземним підсилосним поверхом, які улаштовують для циліндричних металевих силосів. Наведено приклади оцінювання напружено-

деформованого стану фундаментів силосів із використанням числових методів моделювання сумісної роботи основа-фундамент-споруда. Перспективними напрямками удосконалення конструктивних рішень фундаментів силосів є застосування попереднього напруження, що спричиняє підвищення жорсткості і позитивно впливає на загальний напружено-деформований стан конструкції фундаменту в цілому.

Ключові слова: металевий силос, залізобетонний заглиблений фундамент, посилена основа, контактні напруження, напружено-деформований стан фундаменту, фундамент з підземними галереями, фундамент з надземним підсилосним поверхом.

Abstract. To date sea, river and railroad terminals with metallic vertical cylindrical silos as technological equipment are used to transfer cereal and oil crops. Designs of reinforced concrete buried foundations with underground galleries and foundations with overground under-silo storey that are arranged for cylindrical metallic silos of high capacity have been investigated. The main criterion that requires strict observance is not to exceed the allowable value of settlement of metallic silos. Also, because the construction of silo is sensitive to nonuniformity of deformations, the criterion of uniformity of settlements within the boundaries of foundation shall be observed. Analysis of factors of silo accidents has shown that their considerable number occur as the result of destruction of metallic construction of silos by nonuniform operational loads caused by asymmetric actions during emptying silo. Nonuniform above-the-norm deformations of foundations also quite frequently cause silo accidents. Foundations of metallic silos of transfer terminals cause considerable loads on the base. Natural soil base is not always capable of taking stress under the foot of foundation. This is being solved by strengthening foundation bases: by making soil cushion, reinforcing the base with the more strong and rigid elements, injecting mineral or polymeric binders. Pile foundations are quite common during building silos. But their use is not always economically reasonable and justified in particular geological conditions of the building site. Rigidity parameters of the base essentially influence stressed-deformed state of foundations of metallic silos of increased diameters and distribution of contact stresses under the foot of foundations. Deformation parameters of the base and the construction of foundation create the possibility to regulate settlements and deflections of foundation. This makes it possible to control distribution of contact stresses. The value and character of settlement of round slab foundation of silo depend on the values of operating loads, dimensions and depth of foundation laying, distributional properties of its design, geological conditions of the base, influence of loads from the neighboring structures. Application of numerical methods of simulation of combined operation of base-foundation-structure to assess stressed-deformed state of silo foundations proves that prospective trend of improvement of design solutions of silo foundations is application of their prestressing. This causes increase in foundation rigidity and positively influences its stressed-deformed state.

Keywords: metallic silo, reinforced concrete buried foundation, reinforced base, contact stresses, stressed-deformed state of foundation, foundation with underground galleries, foundation with overground under-silo storey.

Вступ. Сучасна практика проектування та будівництва терміналів для перевалки зернових передбачає використання металевих вертикальних циліндричних силосів великої ємності. Перевалка монокультури у великих обсягах на відміну від фермерських елеваторів зазвичай здійснюється на елеваторних

корпусах з силосами з об'ємами від 10 тис. т і більше. Силоси металевої збірної конструкції набули поширення в Україні за останні 20 років. До цього використовувались залізобетонні силосні корпуси, що збереглися та працюють до теперішнього часу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Більшість вітчизняних та іноземних досліджень у сфері будівництва силосів відбувалося ще у 70-ті роки. Так, комплексний підхід, методи розрахунку та принципи будівництва наведено у виданні [1]. Нормативний підхід щодо розрахунку основ плитних фундаментів споруд баштового типу, зокрема і силосів за несучою здатністю та стійкістю основи, а також з визначення осідання та деформацій основ і фундаментів реалізовано у нормативному документі [2], що є чинним на сьогодні. Сформульовано принципи визначення осідань для споруд силосів значного розміру у плані – понад 30-40 м. Обмежена розрахункова глибина стисливого ґрунту основи для великорозмірних споруд та враховано підвищення модуля деформації основ, що мають велику площу завантаження окрім випадків, коли основа складена слабкими ґрунтами. Слід зауважити, що вказані дослідження було проведено здебільшого для залізобетонних силосів, що мають жорстку надземну будову. Допустимі осідання та деформації споруд було прийнято відповідно для силосів збірної та монолітної конструкцій 30 та 40 см відповідно.

Закордонні дослідження стосовно розрахунку плитних та кільцевих фундаментів круглих силосів формувалися орієнтовно також у 70-ті роки і одразу були спрямованими здебільш на циліндричні силоси. Так, дослідження фундаментів силосів [3–5] були присвячені питанням забезпечення надійності металевих та залізобетонних циліндричних силосів від експлуатаційних навантажень: осідань, кренів, а також армування кільцевої плити фундаменту – у роботі [6]. Перші силоси, що було побудовано на слабких глинистих ґрунтах унаслідок експлуатаційних навантажень отримали значні осідання та крени. Досліджено сумісну роботу фундаменту силосу із глинистою основою. Визначено вплив фізико-механічних

характеристик ґрунтів основи на експлуатаційну надійність силосу із кільцевим залізобетонним фундаментом. Армування фундаменту також потребувало підходу із забезпечення надійності експлуатації, тому в роботі [6] досліджено основні критерії розрахунку і конструювання фундаменту. Дослідження впливу глибини закладення фундаменту та промерзання ґрунту на силоси розглянуто в дослідженні [7].

Створення економічної конструкції фундаментів для споруд баштового типу реалізовано в роботах О. Н. Тетіора [8] у 70-х роках. Розглянуто особливості роботи фундаментів у вигляді тонкостінних оболонки із різною контактною поверхнею та передача контактних напружень для фундаментів різної гнучкості та форми.

Для фундаментів силосів вплив форми фундаменту та контактної поверхні розглянуто у наукових статтях іноземних авторів [9]. Наведено аналіз конструктивного рішення для фундаменту силосу у вигляді оболонки зворотного конусу. За результатами дослідження встановлено, що форма фундаменту має суттєвий вплив на розподіл контактних напружень по контакту фундамент–основа.

Суттєвим параметром для визначення напружено-деформованого стану є навантаження від матеріалу, що зберігається. Актуальним є питання розподілення навантажень між стінками силосу та днищем. Небезпечними для силосу є динамічні навантаження від матеріалів, що зберігаються. Сучасні дослідження [10] відрізняються від класичних формул Янсена і базуються на результатах динамічних випробувань моделей руху сипких матеріалів [11], у яких отримано експериментальні результати значень вертикального тиску та тиску тертя на конструкцію силосу, фундамент під час фаз завантаження, зберігання та вивантаження зерна кукурудзи. Наведено дані навантажень, що змінюються залежно

від геометричних розмірів силосу, зокрема, при збільшенні діаметра.

Динамічні навантаження на зерносховища можуть впливати не лише на надземну конструкцію, але й на ґрунти основи, що знаходяться під впливом навантажень від силосів. Проведено дослідження [12] щодо виявлення особливостей роботи ґрунтів основи при сейсмічних навантаженнях на залізобетонну конструкцію силосу для зберігання цементу. Виконано оцінку надійності експлуатації силосу залежно від типу основи фундаменту. Висвітлено ефекти взаємодії між силосом та сипким матеріалом, між фундаментом силосу та ґрунтом.

Моделі взаємодії фундаменту під дією сейсмічних навантажень [13] дозволяють оцінювати вплив фізико-механічних параметрів ґрунту основи на напружено-деформований стан споруди. Лабораторні вишукування на вібраційному столі та численні дослідження [14] підтверджують, що відносно переміщення матеріалу, що зберігається, має амортизуючу дію на конструкцію силосу. Таке дослідження може надати відповідну теоретичну базу та еталонні значення для розрахунку безпечної експлуатації конструкції силосу від дії землетрусу або подібних навантажень, наприклад – для оцінки впливу вібрацій від руху залізничного транспорту на ґрунт основи силосу.

Проведено дослідження ущільнених основ фундаментів [15] на базі сучасної теорії несучої здатності ущільнених ґрунтів. Досліджено негативний вплив пальових фундаментів силосів при їх нерівномірному завантаженні [16]. Для плитно-пальових фундаментів сучасні дослідження [17] загалом підтверджують теоретичні дані експериментальними.

Головною відмінністю сучасних циліндричних силосів є тонкостінна металева конструкція, що є чутливою до нерівномірних навантажень і осідань. В сучасних нормах України осідання металевих силосів обмежено до 15 см.

Аварійні ситуації найчастіше виникають за умов неправильної експлуатації – при несиметричному розвантаженні силосу. Для тонкостінних конструкцій сталевих силосів проведено моделювання [18] надземної конструкції з особливостями її конструктивних рішень та впливу симетричних і несиметричних навантажень. За результатами дослідження призначено критерії забезпечення експлуатаційної надійності конструкції при варіативності різних граничних умов.

Не розв'язаною раніше частиною проблеми є дослідження напружено-деформованого стану у контексті моделювання сумісної роботи основа-фундамент-споруда і порівняння за основними техніко-економічними показниками конструкцій залізобетонних заглиблених фундаментів з підземними галереями та фундаментів з надземним підсилосним поверхом, які влаштовують для циліндричних металевих силосів великої ємності.

Визначення мети та завдання дослідження. Осідання фундаменту і прогини його елементів, а також нерівномірність значень контактних напружень на різних ділянках єдиного фундаменту в умовах деформації основи є предметом дослідження.

Завданням роботи є моделювання сумісної роботи основа-фундамент-споруда і порівняння за основними техніко-економічними показниками конструкцій залізобетонних заглиблених фундаментів з підземними галереями та фундаментів з надземним підсилосним поверхом.

Метою роботи є створення ефективного конструктивного рішення залізобетонних заглиблених плитних фундаментів для циліндричних металевих силосів великої ємності з урахуванням їх розмірів, глибини закладення, форми, жорсткості, ефективного армування та можливого посилення основи за умови забезпечення надійності роботи та граничних осідань.

Основна частина дослідження.

Конструкція силосів та їх фундаментів суттєво відрізняються. Особливо відрізняються критерії щодо нормативних осідань фундаментів [19]. Це пояснюється різною жорсткістю надземної будови споруд залізобетонного та металевих силосів, що впливає на напружено-деформований стан надземної будови і фундаменту. Так, нормативні осідання для металевих силосів обмежені величиною 15 см, а для залізобетонних – 40 см. Величина осідання фундаментів силосів, а також нерівномірність осідань в його межах потребують дотримання [20] оскільки можливе руйнування конструкції силосу внаслідок нерівномірних понаднормових деформацій фундаменту.

Сучасні методи розрахунку плитних фундаментів здебільшого використовують численні моделювання сумісної роботи основа-фундамент-споруда [21] для виявлення нерівномірності осідань та напружено-деформованого стану конструкції. Зупинимось на роботі фундаменту з основою, оскільки для металевих силосів жорсткість його конструкції майже не впливає на роботу фундаменту. Забезпечення умов нормальної експлуатації силосу, що є чутливим до деформацій фундаменту, є важливою та актуальною задачею.

Основними типами фундаментів для плоскостійких силосів великих розмірів є модифікації плитних фундаментів, що споруджуються на природній основі, пильовій основі або на посиленій основі.

Для циліндричних металевих силосів за конструктивними особливостями можна класифікувати фундаменти на заглиблені з підземними галереями, фундаменти з надземним підсилосним поверхом та плитні фундаменти з бічним вивантаженням.

Для фундаментів силосів можна визначити основні конструктивні елементи: горизонтальні конструктивні елементи – перекриття підземних галерей, перекриття підсилосного поверху, фундаментні плити,

плити стрічкових фундаментів; вертикальні конструктивні елементи – стіни, колони і діафрагми; технологічні елементи – аераційні підлоги та решітки, лотки, отвори для вивантаження продукту, конструкції для встановлення аераційних вентиляторів; інші елементи та деталі – анкери кріплення металевих силосів, деталі герметизації, деформаційні шви.

Вертикальна стінка розміщується по периметру фундаменту і сприймає зусилля від спираючого силосу та елементів фундаменту, що примикають до неї. Конструктивно вона нагадує стрічковий фундамент, що приєднується до підземного тунелю, а також поєднується з фундаментною плитою.

Фундаментна плита зазвичай виконується у верхній частині фундаменту. Також існують моделі з виконанням плити в рівні підшви. Елементи фундаменту з горизонтальними поверхнями, які сприймають навантаження ґрунту зворотної засипки, накопичують додаткові навантаження окрім корисних експлуатаційних навантажень і через це вони не є достатньо ефективними.

Також до неефективних конструкцій відносяться фундаменти з відокремленням верхньої фундаментної плити від периметральної стінки та підземної галереї. Для них відмічено більш складний напружено-деформований стан фундаменту та проблеми з'єднання силосу з фундаментом [22]. Конструкція такого типу фундаменту сприяє утворенню розтягуючих зусиль в периметральній стінці, що послаблена отворами входів в підземні галереї. Конструкція вважається недостатньо надійною через некомпенсований вплив розпору.

Напружено-деформований стан подібних конструкцій фундаментів досліджено [8, 22] для фундаментів у вигляді конічних оболонок, що спираються на стрічкові фундаменти, а також у розрахунках фундаментів з кільцевою плитою. У роботах зазначено значний вплив

форми та жорсткості конструкції фундаменту на розподіл контактних напружень.

Для силосів великих діаметрів деформації нерівномірності осідання зазвичай складають до 30 % від загального нормативного осідання 15 см [19].

Для фундаментів металевих силосів перевалочних терміналів характерні значні навантаження.

Розглянемо приклад для визначення навантажень згідно з чинними нормативними методиками [19]. Для силосу діаметром $D = 27,5$ м і повної висоти споруди 29,683 м ємність силосу становить 14326 м³. Висота завантаження зерном 24,2 м. Заповнення силосу передбачено пшеницею з нормативною питомою вагою $\gamma = 8,0$ кН/м³. При цьому коефіцієнт тертя зерна по стінці силосу $f = 0,4$, а коефіцієнт бічного тиску зерна прийнято $\lambda = 0,44$. Слід враховувати коефіцієнт надійності по навантаженню $\gamma_m = 1,3$. Нормативне навантаження снігового покриву становить 1,6 кПа.

Визначено параметр ρ , який дорівнює $\rho = D / 4 = 6,9$ м. Значення безрозмірного параметру ξ на глибині $z = 24,2$ м від верху засипки становить

$$\xi = (\lambda \cdot f \cdot z) / \rho = (0,44 \cdot 0,4 \cdot 24,2) / 6,9 = 0,62.$$

Нормативний горизонтальний тиск зернових p_h^n на стінки силосу на глибині z від верху засипки дорівнюватиме $p_h^n = (\gamma \cdot \rho \cdot A_1) / f = (8 \cdot 6,9 \cdot 0,462) / 0,4 = 63,8$ кПа, при цьому доданок A_1 становить $A_1 = 0,462$ м. Кільцеве вертикальне навантаження на фундамент від стін силосу в нижній точці $p_f^n = (f \cdot p_h^n) = (0,4 \cdot 63,8) = 25,5$ кПа. Повний вертикальний тиск на фундамент від стін силосу становитиме $d_z = 340$ кН/м.

Вертикальний нормативний тиск на днище силосу $p_v^n = (1 \cdot 63,8) / 0,44 = 145$ кПа. Навантаження від аераційних каналів $0,6 \cdot 24 = 14,4$ кПа. Вага силосу 1,1 МН, навантаження на фундамент 13 кН/м. Навантаження від надсилосної галереї 3,2 кН/м. Навантаження від засипки ґрунту на фундамент 26,4 кПа, тиск від власної ваги

фундаменту 54 кПа. Розрахункове значення снігового навантаження 4,6 кН / м. Підсумкове середнє горизонтальне навантаження під фундаментною плитою складає 240 кПа.

За таких умов вертикальних навантажень ґрунти не завжди можуть сприймати напруження під подошвою фундаменту без посилення.

Пальові фундаменти є популярними, але не завжди економічно доцільні та обґрунтовані за конкретних геологічних умов ділянки. Зазвичай, виконується посилення основи фундаментів шляхом влаштування ґрунтової подушки, армуванням більш міцними та жорсткими елементами, або посилення шляхом ін'єктування мінеральними чи полімерними в'язучими. Конструкція фундаменту та деформаційні параметри посиленої основи надають можливість регулювання осідань і прогинів фундаменту та, як наслідок, розподілу контактних напружень. Визначення параметрів посиленої основи відіграє визначну роль.

Слід враховувати, що за умови посилення ґрунту основи методом армування жорсткими включеннями треба враховувати анізотропні властивості основи, що викликають концентрацію напружень σ_z під фундаментом і, як наслідок, більш значні осідання його локальних частин. Збільшення жорсткості верхньої стисливої зони посиленого ґрунту [23] сприяє зменшенню вертикальних деформацій ґрунту та зменшенню вертикальних напружень.

Для визначення параметрів необхідного посилення ґрунту за умови осідання фундаменту та розподілу контактних напружень скористаємось методом [24] для введення коефіцієнту, що регулює рівень напружень на покрівлі непосиленого шару:

$$n_0 = \frac{E_1(1-\mu_2^2)}{E_2(1-\mu_1^2)}, \quad (1)$$

де E_1 , μ_1 , E_2 , μ_2 – модулі деформації та коефіцієнти поперечної деформації верхнього та нижнього шарів ґрунту відповідно.

Для прикладу розглянемо реалізований фундамент силосу, що виконаний на посиленій основі з урахуванням нормативних осідань та міцності підстилаючого шару ґрунту. Фундамент з підземною галереєю та периметральною стінкою типу стрічкового фундаменту. Висота стрічки залізобетон-ного фундаменту 600 мм, периметральна стінка прийнята товщиною 450 мм, стіни галереї і фундаментна плита завтовшки 450 мм.

Для порівняння розглянемо варіант реалізованої конструкції фундаменту з підсилюючим поверхом. Фундаментна плита товщиною 600 мм із локальним збільшенням товщини в місцях спирання колонн підземного поверху на 500 мм. Колони згідно розрахунку прийнято із прямокутними перерізами із розмірами від 700×600 мм до 500×500 мм. Переріз кільцевої обрамлюючої балки перекриття 600×1200 (h) мм. Стінки діафрагм товщиною 300 мм. Несуча плита покриття товщиною 500 мм.

Фундаменти побудовано в подібних геологічних умовах посиленого ґрунту методом вертикального армування включеннями з ґрунтоцементних елементів. Критерії першої та другої груп граничних станів при розрахунку та проектуванні було витримано. Обчислення осідання, контактних напружень та визначення напружено-деформованого стану виконувалось за допомогою методу скінчених елементів при вирішенні задачі на пружному напівпросторі. Осідання окремо перевірялися розрахунком за методом пошарового підсумовування.

Слід зауважити, що будівництво морських та річкових терміналів для перевалки зернових культур часто відбувається в умовах підтоплених територій за умови географічного розташування. Так, силоси на фундаментах з підсилюючим поверхом було побудовано на території з високим рівнем ґрунтових вод, де заглиблення фундаментів і влаштування підземної галереї було неможливим. Приведемо показники витрат на влаштування силосів при однакових діаметрах та об'ємах силосів. Результати отриманих показників наведено в табл. 1, 2.

Таблиця 1

Показники витрат при влаштуванні фундаментів силосів з підсилюючою галереєю

№ з/п	Найменування показника та одиниці виміру	Величина показника	Перевищення матеріальних витрат	Перевищення вартості (тис. грн)
1	Загальний об'єм бетону (m^3)	560	-41%	-350
2	Загальна витрата арматури (т)	101	-27%	-1170
3	Питома витрата сталі (kg/m^3)	170	13%	–
4	Об'єм земляних робіт (m^3)	1900	104%	165

Таблиця 2

Показники витрат при влаштуванні фундаментів силосів з підсилюючим поверхом

№ з/п	Найменування показника та одиниці виміру	Величина показника	Перевищення матеріальних витрат	Перевищення вартості (тис. грн)
1	Загальний об'єм бетону (m^3)	950	70%	350
2	Загальна витрата арматури (т)	140	39%	1170
3	Питома витрата сталі (kg/m^3)	150	-12%	–
4	Об'єм земляних робіт (m^3)	930	-51%	-165

Із аналізу показників можна зробити висновок, що конструкція фундаменту з підсилюючим поверхом у свою чергу має значно більшу матеріалоемність на відміну від фундаменту з підсилюючою галереєю в той час, коли економія об'ємів земляних робіт не надає економічного ефекту.

Осідання плитного круглого фундаменту силосу залежить від геологічних умов основи, значень навантажень, розподільчих властивостей конструкції фундаменту, його розмірів, глибини його закладення, впливу навантажень від сусідніх споруд.

Для визначення осідання фундаменту застосовуються численні рішення та інженерні методи розрахунків [2]. Точність визначення розрахункових осідань та параметрів жорсткості основи суттєво впливає на визначення напружено-деформованого стану фундаменту і подальше його проектування. При порівнянні з даними геодезичного моніторингу осідання силосів на різних об'єктах можна зробити висновок, що методи розрахунків часто дають завищені результати щодо осідань та деформацій, окрім випадків будівництва на слабких ґрунтах.

Для великих розмірів фундаментів із значними навантаженнями, що мають відповідну глибину стисливої зони ґрунту дані розрахункових та фактичних осідань, обчислених за підходами як для висотних будівель з плитними фундаментами великих розмірів згідно з узагальненими та приведеними даними [24] вказують на те, що у процесі збільшення розмірів фундаменту приріст глибини стислового ґрунту основи суттєво не збільшується. Таким чином, розрахунок має відбуватися із обмеженням граничної стислової товщини ґрунту H_c , як для моделі скінченого шару. При цьому запропонована градація

$$\sigma_{zp} = k \cdot \sigma_{zg}, \quad (2)$$

де σ_{zp} – вертикальні напруження від зовнішнього навантаження;

σ_{zg} – побутові напруження;

$k = 0,2$ при $b \leq 20$ м; $k = 0,5$ при $b \geq 50$ м; при $20 \leq b \leq 50$ м значення k визначається по інтерполяції;

b – ширина фундаменту.

Але це ствердження не може бути цілком прийняте для слабких ґрунтів з модулем деформації E . Товщина стислової зони ґрунту H_c при цьому не залежить від гнучкості фундаменту, оскільки вертикальні напруження σ_{zp} за глибиною вирівнюються.

Вважається, що 70 % деформацій осідання відбувається на глибині $0,25 d$ (діаметру фундаменту) через високі концентрації деформацій у верхній зоні ґрунту.

Враховуючи особливості конструкції фундаментів розрахунок осідань має виконуватися за двома групами граничних станів. Розміри подошви локальних елементів фундаменту силосу визначаються за умови забезпечення міцності ґрунту R , але контактні напруження не можуть перевищувати значень, при яких може бути досягнуте граничне значення осідань споруди S_u . Повне осідання фундаменту має відбуватися за умови дотримання критерію граничної міцності ґрунту основи R .

Для фундаментів металевих силосів збільшених діаметрів жорсткість основи суттєво впливає на напружено-деформований стан фундаменту та розподіл контактних напружень під його подошвою. Конструкція фундаменту та деформаційні параметри його основи надають можливість регулювання осідань і прогинів фундаменту та, як наслідок, розподілу контактних напружень. Визначення напружено-деформованого стану конструкції залізобетонного фундаменту та розподіл контактних напружень залежить від власної гнучкості фундаменту як споруди. У випадку, коли деформації основи та жорсткість споруди є порівняними, то має місце перерозподіл контактних напружень

внаслідок їх сумісної роботи. За критерій гнучкості фундаменту, загалом, можна прийняти залежність Горбунова-Посадова:

$$t \approx 10 \frac{El^2}{E_k h^2}, \quad (3)$$

де E та E_k – модуль деформації ґрунту основи та матеріалу конструкції;

l та h – напівдовжина (радіус) та висота перерізу конструкції.

Під час осідання фундаменту більші значення напружень виникають в центральній частині фундаменту, а на бічних ділянках – менші внаслідок розсіювання. Механізм утворення ущільненого ядра основи зумовлює підвищення жорсткості основи в центральній частині фундаменту. Таким чином, при збільшенні навантаження на фундамент контактні напруження σ_z перерозподіляються від країв фундаменту до центру.

Особливістю конструкцій фундаментів для металевих силосів великих розмірів є характерна підвищена гнучкість конструкції, яка значно впливає на розподіл контактних напружень і напружено-деформований стан самого фундаменту.

У фундаментів з підсилюючим поверхом, представлених на рис. 1 та плитних фундаментів із бічним вивантаженням гнучкість майже однакова в усіх напрямках і напружено-деформований стан майже не відрізняється від стандартного для круглих плитних фундаментів. Для плитної конструкції фундаменту з підсилюючим поверхом характерна незначна глибина закладення, що зумовлено конструктивно. Слід зауважити, що за умов високих напружень та високої концентрації деформацій у верхній зоні ґрунту вплив поперечних

деформацій значно зростає. Таким чином, при незначному заглибленні вкрай можливе виникнення випору ґрунту, що призведе до додаткових значень осідань та перерозподілу зусиль до центру фундаменту. Тому, при розрахунку опору ґрунту слід приймати найменше значення заглиблення плити фундаменту від рівня планування.

Для фундаментів із підземними галереями, поданих на рис. 2, що розміщені у напрямку розвантаження продукту, гнучкість кардинально відрізняється. Так, в напрямку галереї – це фундамент скінченої жорсткості, а в поперечному – це абсолютно гнучкий фундамент. Товщина плити з урахуванням розмірів відноситься до тонких плит або жорстких мембран, що мають незначну жорсткість на згин. Так, напружено-деформований стан окремих частин фундаменту силосу має свої особливості. Підземний тунель суттєво підвищує жорсткість в одному напрямку і навантаження частково передається на периметральну стінку. При цьому трансформуються контактні напруження в середній зоні фундаменту – відбувається їх передача на зовнішній контур в місці примикання тунелю та концентрація реакцій від зовнішніх навантажень відповідно жорсткості конструкції. У периметральній зоні заглибленої вертикальної стінки фундаменту напруження різко зростають унаслідок передачі лінійного навантаження від металевих силосів. Це явище стримує утворення ущільненого ядра в центральній частині фундаменту на відміну від звичайного плитного фундаменту.

Для фундаментів однакового діаметру характерні різні форми деформування, різна величина осідання і, як наслідок – різне розподілення контактних напружень.

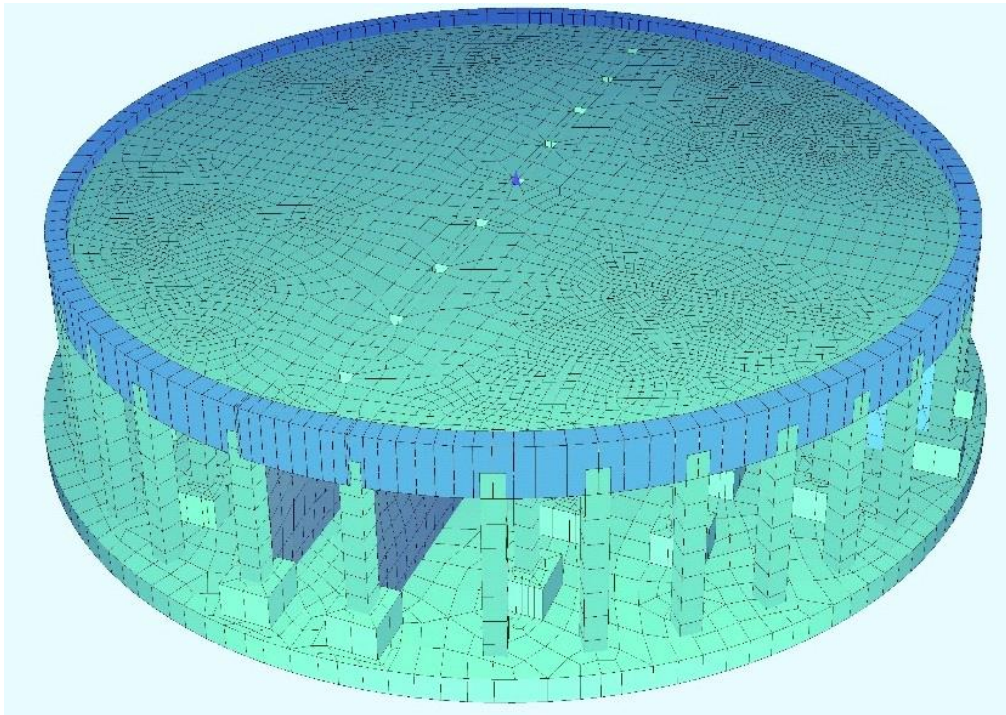


Рис. 1. Скінчено-елементна модель фундаменту силосу з підсилюючим поверхом

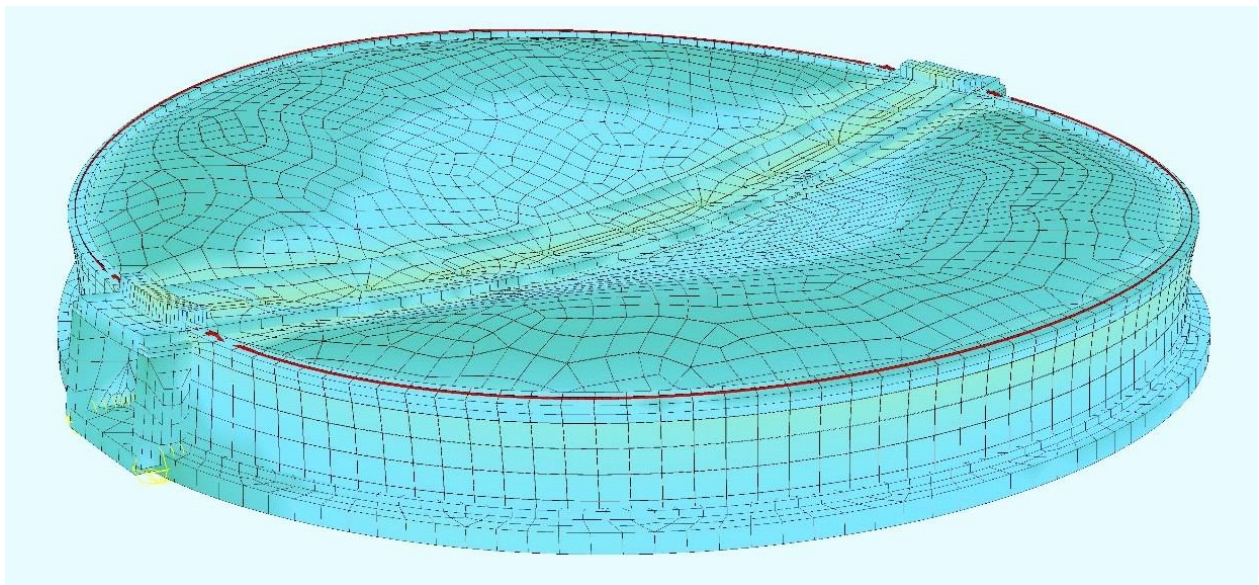


Рис. 2. Скінчено-елементна модель фундаменту силосу з підземною галереєю

Аналіз результатів. Як приклад реалізації розглянутих вище конструктивних рішень фундаментів силосів проаналізовано загальне осідання в межах фундаменту для конструкції з підсилюючим поверхом, подане на рис. 3, та для конструкції з підземною галереєю,

подане на рис. 4 для силосів діаметром 27,5 м. Осідання фундаменту обчислено методом скінчених елементів із використанням розрахункової схеми у вигляді лінійно-деформованого напівпростору.

Для фундаменту з підземною галереєю прийнято середній тиск під подошвою $p_{\text{сер}} = 230$ кПа, а середнє значення вертикального напруження від власної ваги ґрунту під подошвою фундаменту силосу $\sigma_{zg} = \sum \gamma_i \cdot h_i = 22,8$ кПа. Нижню межу стисливої товщі основи прийнято на глибині $z = H_c$, де виконується умова $\sigma_{zp} \leq 0,5 \cdot \sigma_{zg}$.

У результаті розрахунку визначено, що максимальне розрахункове осідання

фундаменту становить $S = 8,0$ см. Максимальне розрахункове значення стисливої товщі становить $H_c = 20$ м. Для фундаменту з підсилюючим поверхом прийнято середній тиск під подошвою $p_{\text{сер}} = 240$ кПа. Осідання фундаментів силосів склало $S = 12$ см. При цьому $S < S_{\text{max,u}} = 15$ см, де $S_{\text{max,u}}$ – величина гранично допустимого значення осідання.

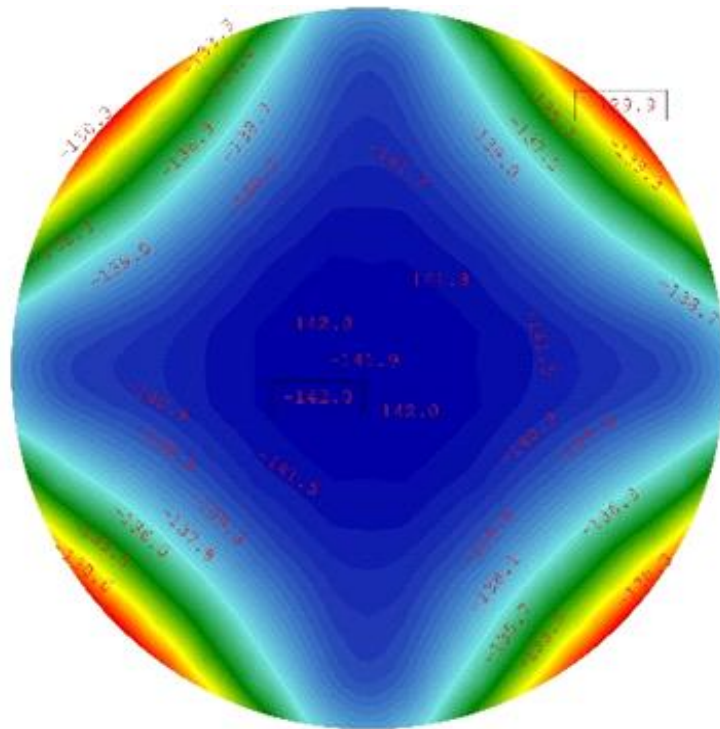


Рис. 3. Вертикальні переміщення (осідання) фундаменту з підсилюючим поверхом за шкалою:
 ■ – 143.9 мм, ■ – 137 мм, ■ – 129.9 мм, крок – 0.388 мм

Фундамент з підземною галереєю та периметральною стінкою у вигляді стрічкового фундаменту не тільки більш економічний, але й більш ефективний за величиною осідань у порівнянні з плитним

круглим фундаментом з плоским днищем та підсилюючим поверхом. Це можна пояснити особливостями розподілення контактних напружень та їх розсіювання у стисливій товщі ґрунту [25].

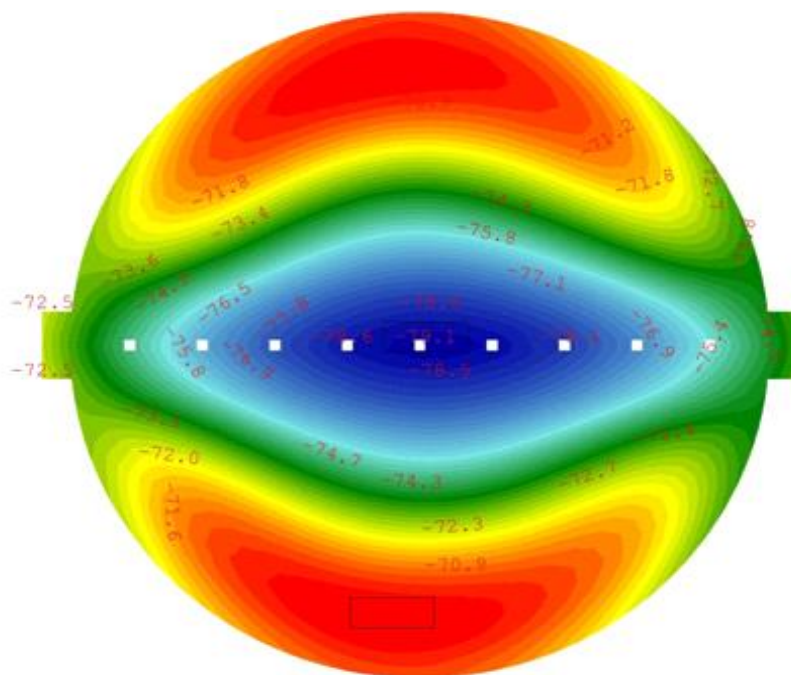


Рис. 4. Вертикальні переміщення (осідання) фундаменту з підземною галереєю за шкалою:
 ■ – 79.1 мм, ■ – 74.6 мм, ■ – 70.2 мм, крок – 0.222 мм

Висновки. Під час численної апробації запропонованих конструктивних рішень фундаментів силосів встановлено, що значення нерівномірності деформації в межах фундаменту складає до 10 % для фундаменту з підсилюючим поверхом і 15 % для фундаменту з підсилюючою галереєю. Для конструкції сталевих силосів важливі не абсолютні значення деформацій, а й відносні осідання в межах ділянок периметру подібно крену. Так, для фундаменту з підсилюючою галереєю маємо більш сприятливий режим роботи щодо локальних осідань в межах фундаменту.

Слід зауважити щодо різкого переходу деформацій в межах радіусу фундаменту з підземною галереєю та якісного вирівнювання деформацій в межах фундаменту з підсилюючим поверхом. Таке

розподілення визначається жорсткістю конструкції фундаменту з підсилюючим поверхом, що зумовлена влаштуванням вертикальних діафрагм в обох напрямках.

Враховуючи геометричні розміри фундаментів силосів і напружено-деформований стан окремих його конструктивних елементів слід зазначити доцільність застосування попереднього напруження з метою підвищення тріщиностійкості. До таких елементів здебільшого можуть бути віднесені стіни та перекриття, що сприймають згин та розтяг. Підвищення жорсткості внаслідок попереднього напруження позитивно впливає на загальний напружено-деформований стан конструкції фундаменту в цілому.

Список використаних джерел

1. Латышев Б. В. Практические методы расчета железобетонных силосных корпусов: монография. 2-е изд., доп. и перераб. Ленинград: Стройиздат, 1985. 192 с.
2. Руководство по проектированию плитных фундаментов каркасных зданий и сооружений башенного типа / НИИОСП им. Н. М. Герсеванова. Москва: Стройиздат, 1984. 263 с.

3. Bozozuk M. The instrumented tower silo at Hammond, Ontario. *Canadian Agricultural Engineering*. 1979. Vol. 21, No 2. P. 79–84. URL: <https://nrc-publications.canada.ca/eng/view/ft/?id=226f85b4-be7b-4c13-90b6-b5ffeb8dfce2> (last access: 04.10.2021).
4. Scott J. D., Haile G., Bozozuk M. Foundation Performance of a Steel Tower Silo at Richmond, Ontario. *Canadian Agricultural Engineering*. 1979. Vol. 21, No 2. P. 85–89. URL: <https://goo.su/aPtY> (last access: 03.10.2021).
5. Becker D. B., Lo K. Y. Settlement and load transfer of ring foundation for tower silos. *Canadian Geotechnical Journal*. 1979. Vol. 21, No 2. P. 97–110. URL: <https://goo.su/abEu> (last access: 03.10.2021).
6. Turnbull J. E., Jackson H. A., Lowe D. Reinforced extended ring foundations for top-unloading concrete tower silos. *Canadian Agricultural Engineering*. 1979. Vol. 21, No 2. P. 111–116. URL: <https://goo.su/bfqq> (last access: 03.10.2021).
7. Turnbull J. E., Munroe J.A., Darisse J.P.F. Should silo foundations be placed below frost? *Agricultural Engineering*. 1982. Vol. 24, No 149. P. 149–155. URL: <https://goo.su/by4c> (last access: 04.10.2021).
8. Тетиор А. Н. Проектирование и сооружение экономичных конструкций фундаментов: монография. Киев: Будівельник, 1975. 204 с.
9. Martins C. J., Figueiredo O. A., Martins L. A. & Peixoto R. A. F. Silo foundation optimization through reinforcement concrete shell structure. *Computer Aided Optimum Design in Engineering XI*. Ashurst : WIT Press, 2009. P. 233–243. URL: <https://www.witpress.com/Secure/elibrary/papers/OP09/OP09021FU1.pdf> (last access: 04.10.2021).
10. Jiang H., Xie H. J., Zhang W. Analysis of Dynamic Characteristics for Cylinder Reinforced Concrete Silo Supported by Columns-cylinder. *Xihua Daxue Xuebao (Ziran Kexue Ban)*. 2012. Vol. 31, No 1. P. 102–105. URL: https://en.cnki.com.cn/Article_en/CJFDTototal-SCGX201201027.htm (last access: 04.10.2021).
11. Fank M. Z., do Nascimento J. W. B., Cardoso D. L., Meira A. S. & Willrich F. L. Vertical pressures and compressive friction force in a large silo. *Engenharia Agrícola*. 2018. Vol. 38. P. 498–503. URL: <https://doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v38n4p498-503/2018> (last access: 04.10.2021).
12. Azadi M. R. E., Soltani A. A. The effects of soil-foundation-structure interaction on the dynamic response of Delijan cement-storage silo under earthquake loading. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*. 2010. Vol. 15. P. 659–676. URL: <https://goo.su/aQ3M> (last access: 07.10.2021).
13. Durmus A., Livaoglu R. A simplified 3 DOF model of A FEM model for seismic analysis of a silo containing elastic material accounting for soil-structure interaction. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 2015. Vol. 77. P. 1–14. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0267726115001165> (last access: 05.10.2021).
14. Li S., Zhao W., Guo Z. Study on Seismic Response of Silo-Stock-Foundation Interaction System. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*. 2018. Vol. 39, No 12. p. 1764. URL: <https://goo.su/aFYb> (last access: 10.11.2021).
15. Shiva Bhushan J. Y. V., Mohammed A. A., Madhira M. Re-evaluation of Failure of Silo Tower Foundations. *Ground Characterization and Foundations*. Singapore: Springer, 2022. P. 831–843. URL: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-981-16-3383-6_72 (last access: 10.11.2021).
16. Бровко И. С. Негативные последствия взаимного влияния свайных фундаментов и их неравномерного нагружения при эксплуатации силосов. *Повышение качества образования, современные инновации в науке и производстве*. 2018. С. 308–310.

17. Geffen S., Birnbaum I. Raft and piles foundation of a silo. Proceedings of the 16th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. 2005. P. 1979–1982. URL: <https://goo.su/bif7> (last access: 10.11.2021).
18. Rejowski K., Iwicki P. Buckling analysis of cold formed silo column. *Mechanics and Mechanical Engineering*. 2016. Vol. 20, No 2. P. 109–120. URL: http://www.kdm.p.lodz.pl/articles/2016/20_2_3RKPI.pdf (last access: 10.11.2021).
19. ДБН В 2.2-8-98 Підприємства, будівлі і споруди по зберіганню та переробці зерна. [На заміну СНіП 2.10.05-85; чинний від 1998-07-01]. Вид. офіц. Київ: Державний комітет будівництва, архітектури та житлової політики України, 1998. 40 с.
20. Основания и фундаменты резервуаров: производств. изд. / Ю. К. Иванов, П. А. Коновалов, Р. А. Мангушев, С. Н. Сотников; под. ред. П. А. Коновалова. Москва: Стройиздат, 1989. 95 с.
21. Poulos H. G. Tall building foundations: design methods and applications. *Innovative Infrastructure Solutions*. 2016. Vol. 1, No 1. P. 1–51. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s41062-016-0010-2> (last access: 10.11.2021).
22. Основи та фундаменти циліндричних силосів для зерна / А. М. Дворник, І. Г. Любченко, В. А. Титаренко, О. В. Шидловська. *Наука та будівництво*. 2019. Т. 21, № 3. С. 12–18. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/ntab_2019_3_3 (дата звернення: 10.11.2021).
23. Butenko A., Gerasimenko O. Regulation of stress-strain state and calculation of deformations of continuous foundations under increased multiple loads. MATEC Web Conf. 6th International Scientific Conference «Reliability and Durability of Railway Transport Engineering Structures and Buildings» (Transbud-2017). 2017. P. 1–5. URL: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201711601002> (last access: 10.11.2021).
24. Кушнер С. Г. Расчет деформаций оснований зданий и сооружений: монография. Запорожье: ООО «ИПО Запорожье», 2008. 496 с.
25. Santos M. G. C., Correa M. R. S. Analysis of the effects of soil-structure interaction in reinforced concrete wall buildings on shallow foundation. *Structures and Materials Journal*. 2018. Vol. 11, No 5. P. 1076–1109. URL: <https://doi.org/10.1590/S1983-41952018000500010> (last access: 10.11.2021).

Мозговий Андрій Олексійович, доктор технічних наук, доцент кафедри геотехніки, підземних та гідротехнічних споруд Харківського національного університету будівництва та архітектури. ORCID iD: 0000-0002-9142-3169. Тел. (050) 749-03-04. E-mail: mozgovoyandrey@ukr.net

Бутенко Анатолій Анатолійович, аспірант кафедри геотехніки, підземних та гідротехнічних споруд Харківського національного університету будівництва та архітектури. ORCID iD: 0000-0002-5642-983X. Тел. (067) 281-88-49. E-mail: butenkoanatoliy@gmail.com

Mozgovuy Andriy, Dr. Sc. (Tech), Associate Professor, Department of Geotechnics, Underground and Hydraulic Structures, Kharkiv National University of Civil Engineering and Architecture. ORCID iD: 0000-0002-9142-3169. Tel.: (050) 749-03-04. E-mail: mozgovoyandrey@ukr.net

Butenko Anatolii, postgraduate student, Department of Geotechnics, Underground and Hydraulic Structures, Kharkiv National University of Civil Engineering and Architecture. ORCID iD: 0000-0002-5642-983X. Tel.: (067) 281-88-49. E-mail: butenkoanatoliy@gmail.com

Статтю прийнято 14.02.2022 р.