

Вплив габаритів фундаментів зерносушильних комплексів на характер перерозподілу зусиль у фундаментних конструкціях

Василь Підлуцький¹, Олександр Литвин²

Київський національний університет будівництва і архітектури
31, просп. Повітрофлотський, Київ, Україна, 03037,

¹vasiliytsar@gmail.com, orcid.org/0000-0002-1936-3990

²sasha32582@gmail.com, orcid.org/0000-0002-2818-3457

DOI: 10.32347/0475-1132.42.2021.30-38

Анотація. Проведено дослідження роботи пальового фундаменту зерносушильного комплексу при зміні габаритів фундаментної плити, а саме зміні її товщини. Проведено розрахунки за допомогою числового моделювання за методом скінченних елементів трьох варіантів: 1) при товщині фундаментної плити 400 мм; 2) при товщині фундаментної плити 500 мм; 3) при товщині фундаментної плити 600 мм.

Після проведення розрахунків було проаналізовано напружено-деформований стану (НДС) фундаментних конструкцій зерносушильного комплексу, а саме: перерозподіл зусиль в палях, осідання фундаментних конструкцій, перерозподіл згинальних моментів у фундаментній плиті та підібрано відповідну площу робочого армування фундаментної плити.

В роботі в якості фундаментів зерносушильних комплексів застосовано пальові фундаменти у зв'язку з присутністю слабких ґрунтів та лесових просідаючих ґрунтів з поверхні будівельного майданчика.

Для проектування польових фундаментів було враховано навантаження від ваги зерна від власної ваги конструкції силосу та від ваги фундаментної плити. При чому навантаження від зерна було враховано як змінним в часі за рахунок завантаження та розвантаження силосу.

Дослідження проведено у глинистих ґрунтах тугопластичної, напівтвердої та твердої консистенції. В основі пальового фундаменту залягають суглинки напівтвердої консистенції.

В результаті проведеної роботи, показано, що збільшення товщини фундаментної плити практично не впливає на зміну осідання фундаментної плити. При збільшенні товщини фундаментної плити (відповідно підвищується жорсткість) збільшуються згинальні моменти в



Василь Підлуцький
доцент кафедри
геотехніки
к.т.н., доц.



Олександр Литвин
асистент кафедри
геотехніки

ній, що призводить до збільшення армування фундаментної плити, в окремих зонах до 20 %, а площа підсилення до 4 разів. Зусилля в палях змінюється наступним чином: в зовнішньому ряді паль зусилля збільшується до 15 %, а в середньому ряді зусилля зменшується до 10 %. Всебічний аналіз результатів досліджень дозволяє проектувати надійні та економічні рішення пальових фундаментів зерносушильних комплексів.

Ключові слова. Пальовий фундамент, параметри ґрунтів, зерносушильний комплекс, силос, числове моделювання.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

В сьогоденні умовах у сільськогосподарській сфері актуальним є питання зберігання зернових. Тому для цього споруджують зерносушильні комплекси (Рис. 1) найчастіше круглої форми в плані, яка є що зручною для завантаження та розвантаження зернових, а також для автоматичного механізованого очищення даних споруд по

колу. Дані споруди отримали поширену назву «силосів», що часто вживається у практиці. Для даних споруд влаштовують як плитні, так і пальові фундаменти. Вибір варіанту фундаменту залежить від багатьох факторів, основним з яких є надійними ґрунтові умови, в яких з поверхні майданчика залягають ґрунти, на яких можна передавати навантаження. Переваги та недоліки влаштування плитних та пальових фундаментів розглянуто в роботі [6]. У випадку наявності з поверхні майданчика ґрунтів, які не можуть нести навантаження від силосів та зерна, необхідно проектувати пальові фундаменти, які передають навантаження на шари ґрунтів, що знаходяться на значній глибині. При проектуванні пальових фундаментів виникає багато питань для їх детального вивчення. Це можуть бути вибір габаритів паль, технології їх виготовлення, вплив параметрів ґрунтів на перерозподіл зусиль у фундаментах, вплив змінного навантаження, вибір методики розрахунків, вибір моделі деформування ґрунтового середовища та багато інших факторів, які впливають на прийняття остаточного рішення конструкцій фундаментів зерносушильних комплексів. В даній роботі наведено дослідження впливу товщини фундаментної плити на перерозподіл зусиль у фундаментних конструкціях зернових комплексів. В кінцевому стані прийнята товщина фундаментної плити безпосередньо впливає на витрати бетону та арматури, що визначає кінцеву вартість та терміни влаштування фундаментів.

АНАЛІЗ ПОПЕРЕДНІХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Дослідження формування напружено-деформованого стану (НДС) у фундаментних конструкціях зерносушильних комплексів при зміні параметрів ґрунтів детально розглянуто у роботі [6]. Також в роботі наведено проблемні питання при проектуванні плитних та пальових фундаментів для зерносушильних комплексів. Наведено результати дослідження формування напружено-деформованого стану фундаментних конструкцій при різних параметрах ґрунтів.

А дана робота є продовженням дослідження перерозподілу зусиль у фундаментах зерносушильного комплексу від різних факторів.

Також впливу параметрів ґрунтів на формування напружено-деформованого стану фундаментів займалися Бойко І.П., Зоценко М.Л., Винников Ю.Л., Харченко М.О. та ін. [1-4, 6]. Вивчення саме перерозподілу зусиль у фундаментних конструкціях (та вибору їх типів) у «силосах» на сьогоднішній день наукових праць не так і багато, враховуючи широке використання. Знайдені роботи авторів Зоценко М.Л., Винников Ю.Л., Пічугін С.Ф. [4], де автори описують проблемність використання плитних фундаментів силосів на основі виникнення критичних нерівномірних осідань основи та необхідність підсилення слабких основ ґрунтоцементними палями, а також важливість використання параметрів ґрунтів, визначених за компресійними випробуваннями, без підвищувальних коефіцієнтів. У роботі Винникова Ю.Л., Харченка М.О., Марченка В.І. [2] автори роблять акцент на використанні коректних моделей деформування ґрунтової основи, які описують зміну параметрів ґрунтів та етапи завантаження та розвантаження силосів при виконанні числових розрахунків за методом скінчених елементів (МСЕ).

МЕТА РОБОТИ

Дослідити характер перерозподілу зусиль у фундаментних конструкціях зерносушильних комплексів в залежності від зміни габаритів фундаментної плити, а саме від її товщини, за допомогою числового моделювання за методом скінчених елементів (МСЕ).

ОСНОВНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ

В роботі [6] авторами було наведено переваги використання саме пальових фундаментів на відміну від плитних. В даній роботі розглянуті пальові фундаменти (Рис.2), так як з поверхні майданчика присутні слабкі ґрунти та лесові просідаючі ґрунти

(Рис.4., Табл. 1). Вибір технології палів був зумовлений наявністю виконавців в даній місцевості, а вибір параметрів палів був обраний, виходячи з їх несучої здатності та геологічних умов. Так, палі прийняті задовленими перерізом 300x300мм, довжиною 10,0 м.

Вибір товщини фундаментної плити є також важливим питанням при проектуванні польових фундаментів, тому що це впливає на кінцеву вартість фундаментів (витрати бетону та витрати арматури).



Рис.1. Зерносушильні комплекси.
Fig.1. Grain drying complexes (silos).

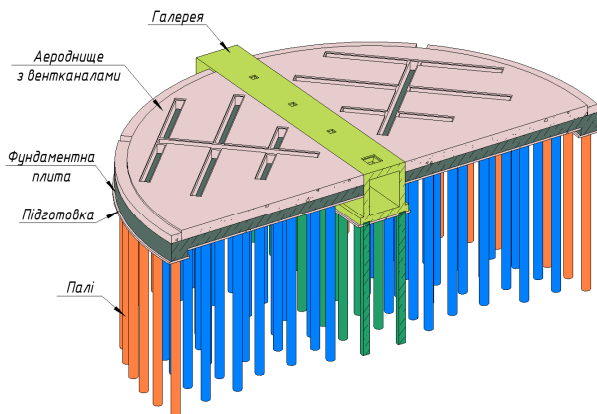


Рис.2. Загальний вид фундаментів зерносушильного комплексу.
Fig.2. General view of the foundations of the grain drying complex.

Дослідження виконано на прикладі реального об'єкту: металевий зерносушильний

комплекс (силос) діаметром 22,0 м та вагою 600 кН, який вміщує зерно вагою до 50 000 кН. Для створення умов зберігання зерна передбачено аероднище товщиною 500 мм з вентиляційними каналами для подачі повітря. Для обслуговування силосу та розвантаження зерна проектом передбачено по центру силосу галерею висотою 1,8 м та шириною 1,6 м. Фундаментом для даного силосу обрано залізобетонну фундаментну плиту на палі на палітовому фундаменті (Рис. 2).

Загальний вигляд зерносушильних комплексів та їх фундаментів наведено на Рис. 1 та Рис. 2 відповідно.

На майданчику дослідження присутні наступні ґрунтові умови: глинисті ґрунти тугопластичної, напівтвердої та твердої кон-систенції. лесоподібні, з поверхні - просідаючі. В основі палів залягають залягають суглинки напівтвердої консистенції. Характерний інженерно-геологічний розріз будівельного майданчика наведено на Рис. 4. В Табл. 1 представлено основні фізико-механічні характеристики ґрунтів основи.

Скінченно-елементна модель включає в себе всі елементи силосу та фундаментів. Навантаження від силосу прикладене як лінійно-розподілене по периметру, а від зерна - як рівномірно-розподілене. По периметру силосу у фундаментній плиті передбачено потовщення для сприйняття навантаження від конструкції силосу. Ґрунтова основа задавалася як суцільне багатопарове об'ємне середовище (Рис. 3), в якому враховані нашарування ґрунтів та їх фізико-механічні характеристики. Ґрунт у розрахунковій схемі заданий як модель пружного середовища, в якому враховані щільність ґрунту ρ , коефіцієнт Пуассона ν , модуль загальних деформацій E .

В процесі дослідження аналізувалися наступні результати: зусилля в палях (Рис.6), осідання фундаментних конструкцій (Рис.5), згинальні моменти та площа армування у фундаментній плиті (Рис.7). Діаграми зміни зусиль у фундаментах (зусилля в палях та площа армування фундаментної плити) при збільшенні товщини фундаментної плити наведено на Рис.8.

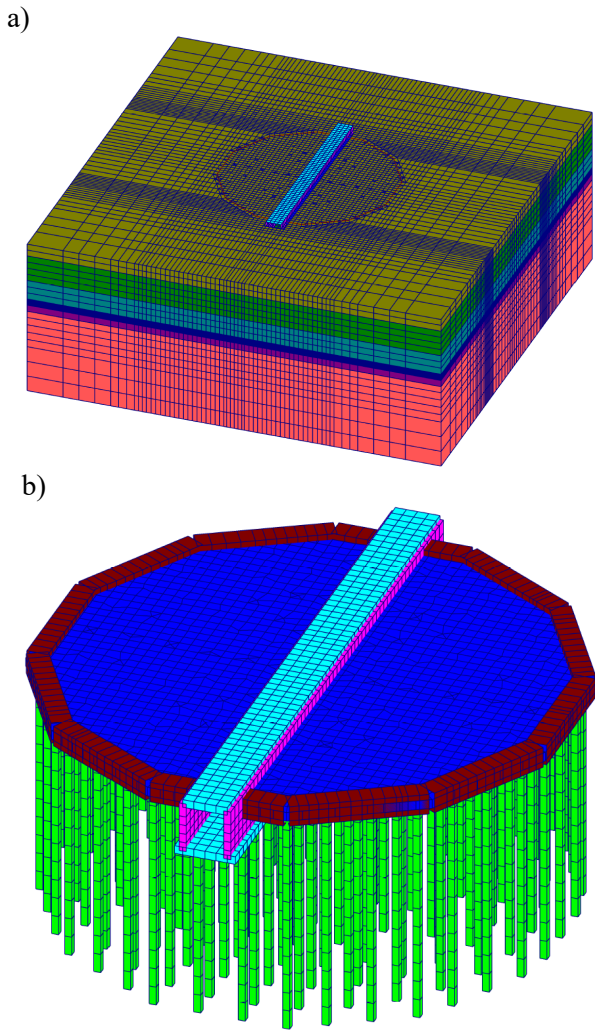


Рис.3. Скінченно-елементна модель силосу:
 а) фундаментів та ґрунтового масиву;
 б) фундаментних конструкцій.
 Fig.3. Finite element model of silage:
 а) foundations and soil mass;
 б) foundation structures.

Скінченно-елементна модель складається з об'ємного ґрунтового масиву у відповідності до інженерно-геологічних досліджень, пальового фундаменту та конструкцій галереї і аероднища силосу. Низ ґрунтового масиву обмежений площиною, яка закріплена від вертикальних переміщень (вважається, що осіданнями можна знехтувати на цій глибині). Також в'язі накладені на бічні площини, дані граничні умови перешкоджають нормальним переміщенням.

Розташування, потужність та механічні властивості ґрунтових шарів відповідають даним інженерно-геологічних вишукувань.

Розрахунки напружено-деформованого стану фундаментних конструкцій з ґрунтовою основою виконувались методом скінчених елементів (МСЕ) у тривимірній постановці. Виконувалося згущення сітки по периметру конструкцій силосу, безпосередньо під фундаментною плитою та галереєю, а також під вістрям паль.

Несуча здатність паль та розрахункове навантаження на палі визначене за формулами норм [5] та становить відповідно $Fd=560$ кН та $N=400$ кН. Для підтвердження несучої здатності паль було запропоновано виконати натурні випробування паль статичним навантаженням згідно окремо розробленої програми випробування.

В роботі було проведено розрахунки трьох варіантів фундаментної плити, при її товщині 400 мм, 500 мм та 600 мм.

В результаті попередніх досліджень було встановлено, що перерозподіл зусиль між палями (Рис. 6, Рис 8) розподіляється наступним чином. Для дослідження перерозподілу зусиль у палях палеве поле було умовно поділено на три зони: центральну, середню та периферійну (зовнішню). Найбільш завантаженими палями у палевому полі є палі периферійної зони, а найменш завантаженими палями – палі центральної зони. Це пояснюється тим, що палі, які знаходяться на периферії фундаментної плити повністю реалізують свою несучу здатність за рахунок більш повного використання бічної поверхні на відміну від паль центральної та середньої зони, бічна поверхня яких «затиснута» між палями. При збільшенні товщини фундаментної плити з 400 мм до 600 мм у палях зовнішнього ряду також збільшуються зусилля до 13 %. Зусилля середнього ряду паль зменшуються до 7 %. Тобто, при збільшенні фундаментної плити, у периферійних палях, які є і так перевантаженими, зусилля збільшуватимуться, що приводить до більш нерівномірного перерозподілу зусиль між палями усього палевого поля. Тому, найбільше рівномірний характер перерозподілу зусиль між палями є при товщині плити 400 мм.

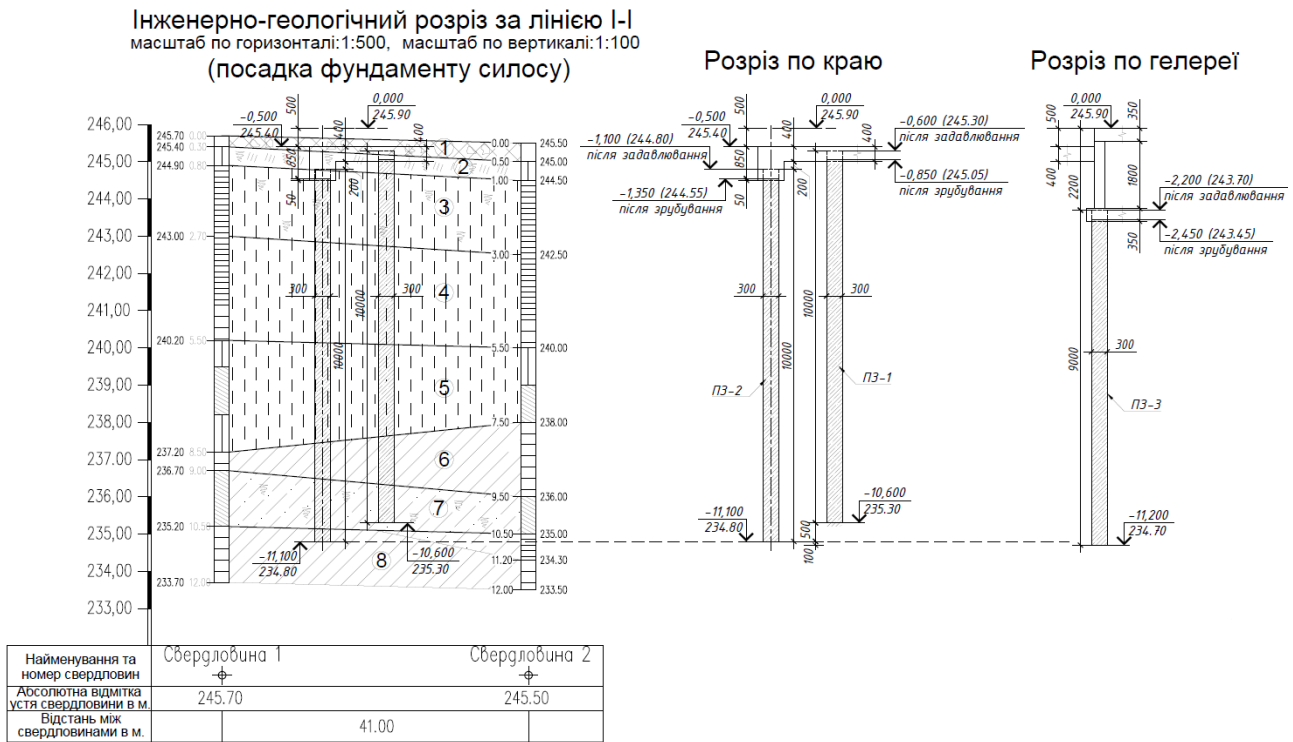


Рис.4. Інженерно-геологічний розріз майданчика будівництва та посадка фундаментів.
Fig.4. Engineering-geological section of the construction site and landing of the foundations.

Табл. 1. Показники фізико-механічних властивостей ґрунтів будівельного майданчика
Table 1. Indicators of physical and mechanical properties of the soils of the site

№ ПЕ	Щільність ґрунту, г/см ³	Природна вологість, д.о.	Коефіцієнт пористості, д.о.	Кут внутрішнього тертя, градуси	Питоме зчеплення, кПа	Модуль деформації, МПа
	ρ	W	e	φ	c	E
2	-	0,23	-	-	-	-
3	1,71	0,19	0,856	16	11	7
4	1,76	0,16	0,740	18	10	16
5	1,81	0,24	0,811	17	12	10
6	1,75	0,20	0,856	17	15	13
7	1,72	0,11	0,724	19	7	15
8	1,72	0,13	0,783	20	8	19

Примітка. Найменування ґрунтів:

ПЕ-1: Техногенні утворення - асфальт, щебінь, уламки цегли.

ПЕ-2: Ґрунтово-рослинний шар (чорнозем типовий) - суглинок тугопластичної консистенції з домішками органічних речовин - 6.3%.

ПЕ-3: Суглинок лесоподібний твердої консистенції, з домішками органічних речовин: 4.9-5.7%, просідаючий.

ПЕ-4: Суглинок лесоподібний, напівтвердої консистенції, просідаючий.

ПЕ-5: Суглинок лесоподібний, тугопластичної консистенції, непросідаючий.

ПЕ-6: Суглинок напівтвердої консистенції.

ПЕ-7: Викопний ґрунт: супісок пластичної консистенції з домішками органічних речовин - 3.0%.

ПЕ-8: Суглинок напівтвердої консистенції.

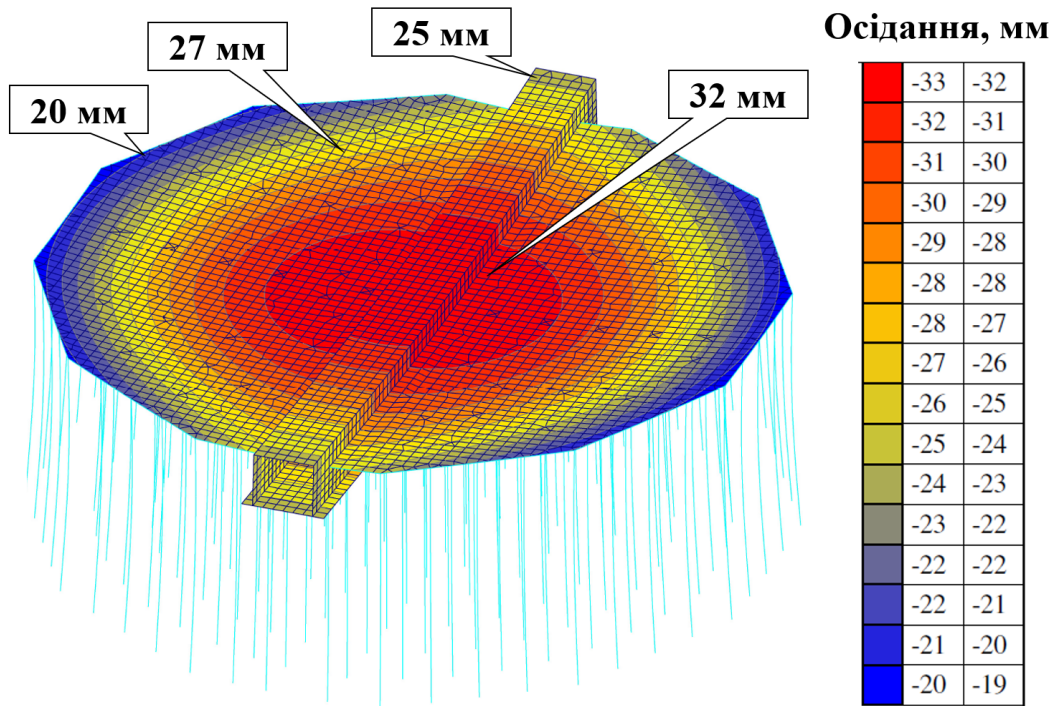


Рис.5. Осідання фундаментних конструкцій.
Fig.5. Settlement of foundation structures.

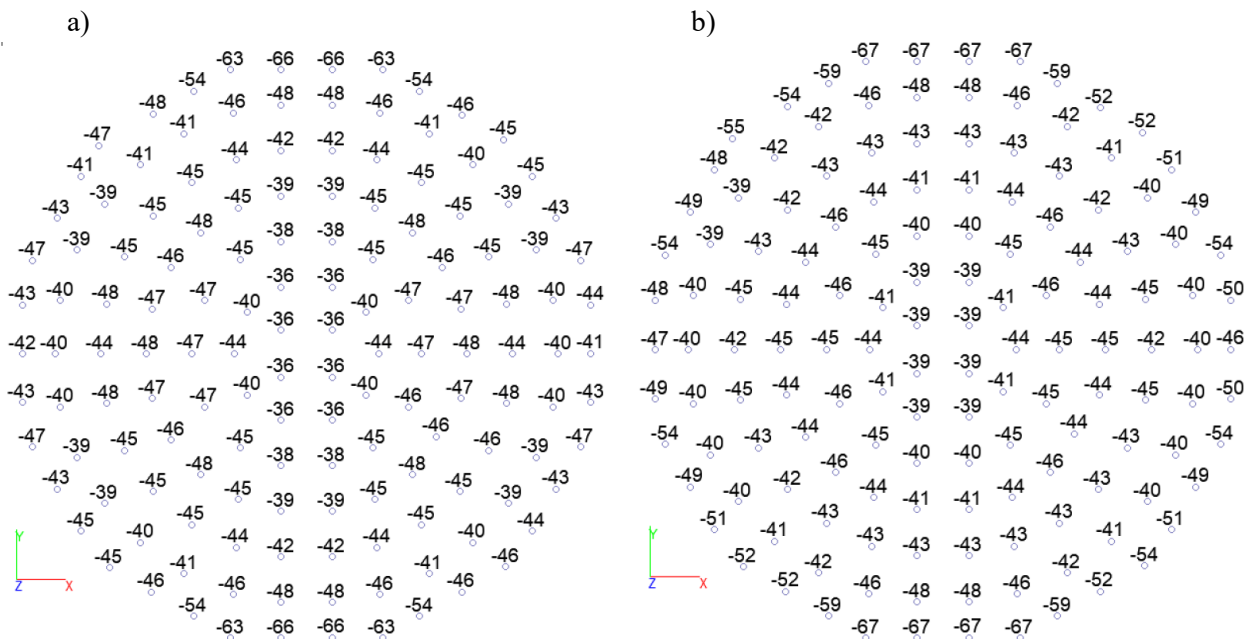


Рис.6. Зусилля в палях (тс) при товщині фундаментної плити: а) $t=400$ мм; б) $t=600$ мм.
Fig.6. Forces in piles (ts) at a thickness of a base plate: а) $t=400$ мм; б) $t=600$ мм.

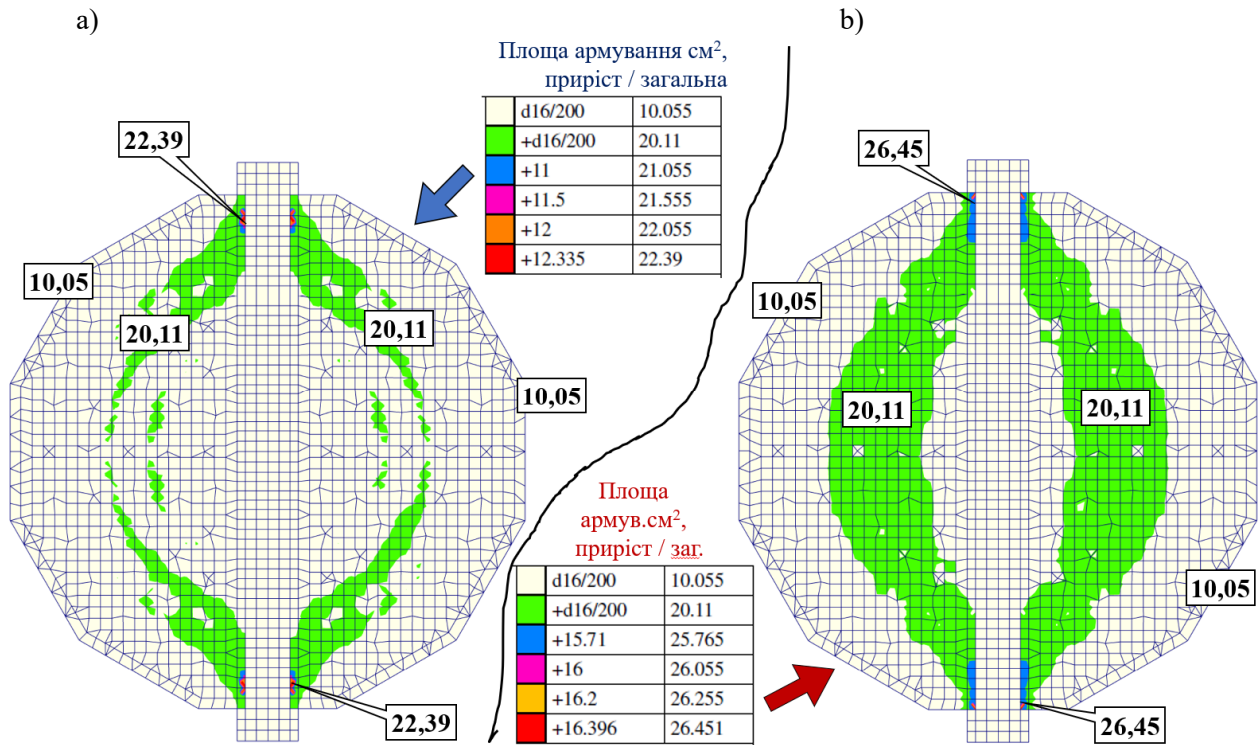


Рис.7. Площа робочої арматури у фундаментній плиті , нижня зона по осі «X» (см²), при товщині фундаментної плити: а) t=400 мм; б) t=600 мм.

Fig.7. The area of the working reinforcement in the foundation slab, the lower zone along the «X» axis (cm²), at a thickness of a base plate: а) t=400 mm; б) t=600 mm.

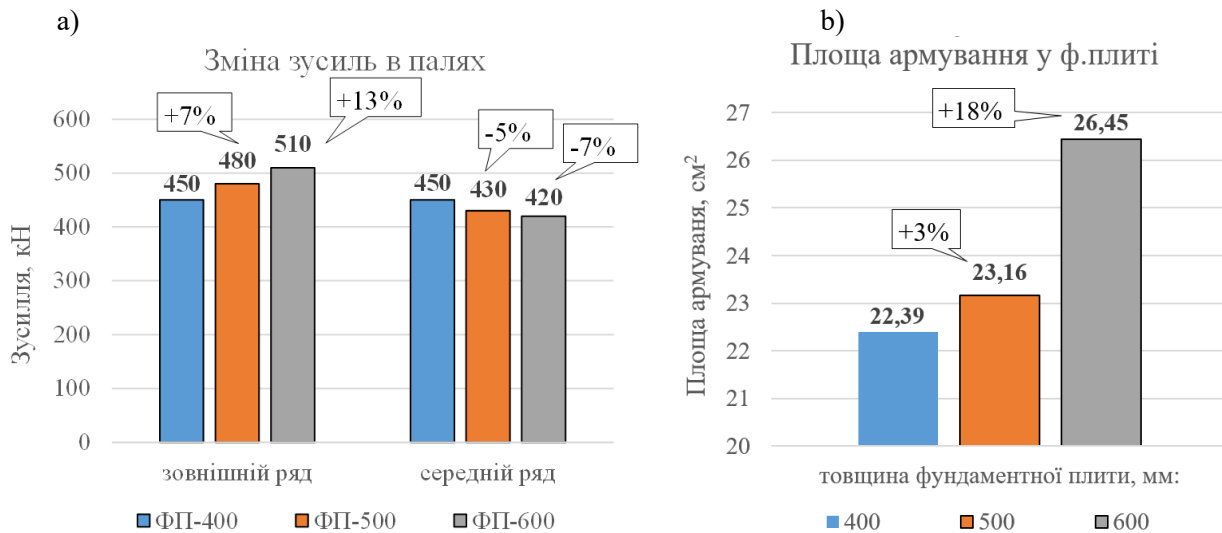


Рис.8. Діаграми зміни зусиль у фундаментах при збільшенні товщини фундаментної плити: а) зусилля в палях (кН); б) площа робочої арматури у фундаментній плиті, нижня зона по осі «X» (см²).

Fig.8. Diagrams of changes in forces in the foundations with increasing thickness of the foundation slab: а) force in piles (кН); б) the area of the working reinforcement in the foundation slab, the lower zone along the «X» axis (cm²).

Збільшення товщини фундаментної плити практично не впливає на зміну її осідання. Значення знаходяться в межах 19-33 мм. Найбільші значення вертикальних деформацій концентруються в центрі фундаментної плити, а найменші по периметру. Наявність галереї приводить до додаткових осідань на краю фундаментної плити (Рис. 5).

При аналізі згинальних моментів M_x , M_y у фундаментній плиті встановлено, що їх переважаючі значення знаходяться в середній зоні фундаментної плити з деяким зміщенням від проходження галереї з радіальним напрямом розповсюдження. При збільшенні фундаментної плити з 400 мм до 600 мм максимальні згинальні моменти збільшуються до 20 %, але вони не є визначальними, так як розташовані в зонах концентраторів та носять точковий характер. Це зони виходу галереї, відповідають площі робочої арматури 22-26 см². Визначальним є аналіз формування зони підсилення фундаментної плити додатковим армуванням (проаналізована зона з площею робочої арматури 20,11 см² (Рис. 7)). Так, зона підсилення робочої арматури у фундаментній плиті збільшується до 4-ох разів, що призводить до перевитрат її армування та відповідно збільшення фінансових затрат.

Всебічний аналіз результатів досліджень дозволяє проектувати надійні та економічні рішення пальових фундаментів зерносушильних комплексів.

ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ

Проведені дослідження дають змогу зробити наступні висновки:

Встановлено, що зміна габаритів фундаментів зерносушильних комплексів впливає на характер перерозподілу зусиль у фундаментних конструкціях та на формування їх напружено-деформованого стану.

Показано, що збільшення товщини фундаментної плити практично не впливає на зміну осідання фундаментної плити. При збільшенні товщини фундаментної плити (відповідно підвищується жорсткість) збільшуються згинальні моменти в зоні концентрації напружень до 20 %, що призво-

дить до збільшення армування фундаментної плити в даних зонах до 20 %. При цьому необхідно контролювати саме збільшення площі підсилення армування, яка в даному випадку збільшилася до 4-ох разів.

Наведено, що при збільшенні товщини фундаментної плити з 400 мм до 600 мм, зусилля в палях змінюється наступним чином: в зовнішньому ряді паль зусилля збільшується до 15 %, а в середньому ряді зусилля зменшується до 10 %, що призводить до більш нерівномірного завантаження паль у палювому полі.

Тому встановлено, що найбільш раціональним варіантом палювого фундаменту зерносушильних комплексів є фундамент з товщиною фундаментної плити 400 мм.

Для надійного та економічного проектування фундаментів зерносушильних комплексів необхідно проводити комплексні числові розрахунки з врахуванням комбінації складного завантаження і розвантаження, а також досліджувати та виконувати пошук впливу параметрів фундаментних конструкцій.

ЛІТЕРАТУРА

1. Бойко І.П. Особливості взаємодії пальових фундаментів під висотними будинками з їх основою. / І.П.Бойко // *Основи і фундаменти: Міжвідомчий науково-технічний збірник*. – К.: КНУБА. – 2006. – Вип. 30. – С. 3-8.
2. Винников Ю.Л. Розрахунок фундаментної плити силосів на армованій стохастичній основі / Ю.Л. Винников, М.О. Харченко, В.І. Марченко // *Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика*. – Дніпро: ДНУЗТ, 2012. – Вип. 3. – С. 26 – 32.
3. Дворник А.М. Основи та фундаменти циліндричних силосів для зерна / А.М. Дворник, І.Г. Любченко, В.А. Титаренко, О.В. Шидловська // *Наука та будівництво*. – Київ, 2019. – Вип. 21 (3). – С. 12 – 18.
4. Зоценко М.Л. Особливості визначення осідань основ плитних фундаментів зерносушильних силосного типу / М.Л. Зоценко, Ю.Л. Винников, С.Ф. Пічугін, М.В. Бібік, В.І. Марченко, М.І. Лапін // *Зб. наук. праць (галузеве машинобуд., буд-во)*. – Полтава: ПНТУ, 2009. – Вип. 2 (27). – С. 101 – 110.

5. Основи та фундаменти споруд. Зміна № 1: ДБН В.2.1–10–2009. – [Чинний від 2011–07–01]. – К.: Мінрегіонбуд України, 2011. – 55с.
6. Підлущкий В.Л. Формування НДС у фундаментах зерносушильних комплексів при зміні параметрів ґрунтів. / В.Л.Підлущкий, О.В.Литвин // *Основи та фундаменти: Науково-технічний збірник*. – К.: КНУБА. – 2020. – Вип. 41. – С. 55-63.

REFERENCES

1. Boyko I.P. (2006). Osoblyvosti vzaiemodii palovykh fundamentiv pid vysotnymy budynkamy z yikh osnovoju [Features of the interaction of pile foundations under high-rise buildings with their foundation]. *Osnovu i fundamenty: Mizhvidomchyj naukovo-tekhnichnyj zbirnyk*. Kyiv: KNUBA, 30, 3-8 (in Ukrainian).
2. Vynnykov Y.L., Kharchenko M.O., Marchenko V.I. (2012). Rozrakhunok fundamentnoi plyty sylosiv na armovanii stokhastychnii osnovi [Design of foundation plate of grain silage on reinforced stochastic soil base]. *Mosty ta tuneli: teoriia, doslidzhennia, praktyka*. Dnipro: DNURT, 2, 26-32 (in Ukrainian).
3. Dvornyk A., Liubchenko I., Tytarenko V., Shydlovska O. (2019). Osnovy ta fundamenty tsylindrychnykh sylosiv dlia zerna [Bases and foundations for grain cylindrical silos]. *Nauka ta budivnytstvo*. Kyiv, 21 (3), 12-18 (in Ukrainian).
4. Zotsenko M.L., Vynnykov Y.L., Pichuhin S.F., Bibik M.V., Marchenko V.I., Lapin M.I. (2009). Osoblyvosti vyznachennia osidan osnov plytynykh fundamentiv zernoskhovyshch sylosnogo typu [Peculiarities of determining the subsidence of the foundations of slab foundations of grain-silo-type storages]. *Zbirnyk naukovykh prats (haluzeve mashynobuduvannia, budivnytstvo)*. Poltava: PNTU, 2 (27), 101-110 (in Ukrainian).
5. Osnovy ta fundamenty sporud. Zmina 1: DBN V.2.1–10–2009. (2011). Kyiv: Minregionbud Ukrayiny, 55 (in Ukrainian).
6. Pidlutskyi V.L. (2020). Formuvannia NDS u fundamentakh zernosushylnykh kompleksiv pry zmini parametriv hruntiv [Formation of stress-strain state in the foundations of grain drying complexes when changing soil parameters]. *Osnovu ta fundamenty: Naukovo-tekhnichnyj zbirnyk*. Kyiv: KNUBA, 41, 55-63 (in Ukrainian).

Influence of foundation dimensions of grain drying complexes on the nature of the redistribution of efforts in the foundation structures

Vasyl Pidlutskyi,
Oleksandr Lytvyn

Summary. the work of the pile foundation of the grain drying complex at change of dimensions of the base plate, namely change of its thickness is investigated. Calculations were performed using numerical simulation by the finite element method of three variants: 1) at a base plate thickness of 400 mm; 2) at a thickness of a base plate of 500 mm; 3) at a thickness of a base plate of 600 mm.

After the calculations, the stress-strain state (SSS) of the foundation structures of the grain-drying complex was analyzed: redistribution of forces in the piles, deformation of the foundation structures, redistribution of bending moments in the foundation slab and selected the appropriate area of working reinforcement of the foundation slab.

In the work, pile foundations were used as the foundations of grain drying complexes due to the presence of weak soils and loess subsidence soils from the surface of the construction site.

For the design of pile foundations, the load from the weight of the grain from the own weight of the silo structure and from the weight of the foundation slab was taken into account. Moreover, the load from the grain was taken into account as a variable over time due to the loading and unloading of silage.

The study was conducted in clay soils of refractory, semi-hard and hard consistency. At the base of the pile foundation are loams of semi-solid consistency.

As a result of this work, it is shown that the increase in the thickness of the foundation slab has almost no effect on the change in the settlement of the foundation slab. As the thickness of the foundation slab increases (the stiffness increases accordingly), the bending moments in it increase, which leads to an increase in the reinforcement of the foundation slab, in some areas up to 20%, and the reinforcement area up to 4 times. The force in the piles varies as follows: in the outer row of piles the force increases to 15%, and in the middle row of the force decreases to 10%. Comprehensive analysis of research results allows to design reliable and economical solutions of pile foundations of grain drying complexes.

Key words. Pile foundation, soil parameters, grain drying complex, silage, numerical modeling.