

ОСНОВИ ТА ФУНДАМЕНТИ

УДК 624.954

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ КОНСТРУКТИВНИХ РІШЕНЬ ПАЛЬОВО-ПЛИТНОГО ФУНДАМЕНТУ МЕТАЛЕВОГО СИЛОСУ НА ОСОБЛИВОСТІ ДЕФОРМУВАННЯ ФУНДАМЕНТНОЇ ПЛИТИ

CONSTRUCTIVE SOLUTIONS INFLUENCE STUDY OF THE METAL SILO PILE-SLAB FOUNDATION ON THE FOUNDATION SLAB DEFORMATION FEATURES

Підгурський М.І., д.т.н., проф., ORCID 0000-0002-0218-8874, Підгурський І.М., к.т.н., доц., ORCID 0000-0002-5937-7625, Підвисоцький О.І., Биків Д.З. (Тернопільський національний технічний університет ім. І. Пулюя, м. Тернопіль)

Pidgurskyi M.I., doctor of technical sciences, professor, Pidgurskyi I.M., candidate of technical sciences, Pidvysotskyi O.I., Bykiv D.Z. (Ternopil Ivan Puluj National Technical University, Ternopil)

Головною особливістю сучасних металевих циліндричних силосів є його тонкостінна оболонка, яка є чутливою до нерівномірних осідань. Розглянуто вплив конструктивних рішень пальово-плитного фундаменту, а саме товщини фундаментної плити та габаритів конвеєрної галереї, на особливості деформування фундаментної плити.

Trends in the construction of elevator complexes for grain storage are considered. The most modern and optimal technology is its storage in thin-walled metal silos. Their construction mostly is carried out in territories with unfavorable engineering and geological conditions. Types of foundations for metal silos of large volume are considered. Metal silos are important building structures. Accidents of metal silos and their causes are analyzed. It was established that a significant part of the complications and emergency situations during the operation of silos can be caused by uneven deformations of the soil, which are transmitted to the thin-walled shells of the silos, causing additional efforts not foreseen by the project. The study of the stress-strain state of the foundations for large metal silos was carried out using the finite element method. The study was conducted for a pile-slab foundation, taking into account the structural features of the underground conveyor gallery and the thickness of the foundation slab. It is shown that the slab thickness has almost no effect on the settlement of the pile-slab foundation. The stiffness characteristics of the underground gallery have a significant influence on the

uneven settlement of the foundation slab: in the longitudinal direction, the gallery is a foundation of finite stiffness, and in the transverse direction (perpendicular to the gallery), its influence is insignificant. Coefficients of non-uniformity of settlement of the foundation slab were obtained during the joint operation of pile-slab foundation structures, taking into account the operation of gallery stiffness piles and changes in dimensions (thickness) of the slab. It has been demonstrated that the application of the finite element method allows for the assessment of foundation settlement and the unevenness of these settlement, which allows for the design of reliable foundations for metal silos.

Ключові слова:

Металевий силос, пальово-плитний фундамент, підземна конвеєрна галерея, нерівномірність осідання, метод скінчених елементів.

Metal silo, pile-slab foundation, underground conveyor gallery, settlement unevenness, finite element method.

Вступ. У сучасному будівництві практика спорудження металевих силосів для зберігання зерна набула широкого розповсюдження у порівнянні з залізобетонними спорудами. Собівартість зведення металевих силосів є високою завдяки використанню для їх монтажу збірних конструктивних елементів заводського виготовлення, типових матеріалів, а також швидкості зведення за малих затрат праці. При цьому металеві силоси різняться великим різноманіттям форм, розмірів та конструктивних рішень [1]. Одним з визначальних чинників під час проектування металевих силосів різних типів є забезпечення їх надійного функціонування. У зв'язку з цим особливої актуальності набувають питання проектування фундаментів для таких споруд.

Аналіз останніх досліджень. Основною особливістю сучасних металевих силосів є тонкостінна оболонка, що є чутливою до нерівномірних навантажень та осідань [2, 3]. У зв'язку з цим, у сучасних нормативних документах [4] осідання металевих силосів обмежені до 15 см; також обмежена величина крену споруд до 0,002. Для забезпечення вказаних вимог важливим є проектування надійних фундаментів.

Основними типами фундаментів металевих силосів великих об'ємів є різновиди кільцевих і плитних [5, 10] на природній та штучній основах та пальово-плитні фундаменти [5, 6].

За конструктивними особливостями зазначені вище фундаменти можна класифікувати на заглиблені з підземною галереєю, фундаменти з надземним підсилосним поверхом та плитні фундаменти з бічним вивантаженням [2].

Переваги та недоліки влаштування плитних та пальово-плитних фундаментів наведено у роботі [2, 5, 6, 10]. Зазначається, що серед вказаних, кільцеві фундаменти мають найнижчий рівень експлуатаційної надійності.

Характерною особливістю плитних фундаментів, які проектується для металевих силосів великої ємності, є їх підвищена гнучкість. Так, встановлено [2], що значення нерівномірності деформацій в межах фундаменту складає до 10 % для фундаменту з підсилюючим поверхом і 15 % для фундаменту з підсилюючою галереєю. Очевидно, що деформації плити залежатимуть від її жорсткісних характеристик, зокрема товщини [6] та особливостей конструкції, зокрема жорсткості наявної підземної галереї [2]. Дане питання є важливим і вимагає додаткових досліджень. Адже при осіданнях та деформаціях фундаменту силос, що працює сумісно з фундаментом, також отримує відповідні деформації та пошкодження, що можуть привести до його руйнувань [7, 8, 14].

У зв'язку з цим, **метою роботи** є дослідження нерівномірності деформацій фундаментної плити в залежності від зміни її товщини та конструктивних особливостей у плитно-пальовому фундаменті металевих силосів великої ємності для зберігання зерна при моделюванні сумісної роботи основа-фундамент-споруда.

Основна частина. За останні 30-40 років пальові фундаменти витіснили фундаменти мілкового закладання, а 80-90% їх припадає на території зі складними інженерно-геологічними умовами [9]. Саме на такій ділянці у 2022 році споруджено елеваторний комплекс, що складається з ряду металевих силосів СМВУ-220 та СМВУ-275.12 (рис. 1). Елеваторний комплекс запроектовано і збудовано на непридатній для аграрних робіт ділянці. При цьому враховано вимоги діючого земельного законодавства щодо раціонального використання родючих земель [10].



Рис 1. Металевий силос для зберігання зерна

Для споруд елеваторного комплексу запроектовано пальово-плитні фундаменти. Застосування саме пальово-плитних фундаментів обґрунтовується наявністю кількох проблемних факторів ділянки будівництва:

наявності товщі насипних ґрунтів з включеннями будівельних відходів до 30% та рослинно-ґрунтового шару;

наявність у верхній зоні ґрунтового масиву просідних та слабких ґрунтів.

Варто зазначити, що пальово-плитні фундаменти мають високу вартість і їх доцільність обґрунтовується, як вказано вище, конкретними інженерно-геологічними умовами ділянки будівництва (слабкими приповерхневими ґрунтами та ін.) За можливості [2] варто підсилити основи фундаментів ґрунтовими подушками, ін'єктуванням ґрунтової товщі мінеральними чи полімерними в'язучими.

Основою для обпирання нижнього кінця висячих паль вибрано пісок середньозернистий, середньої щільності, насичений водою, кварцевий з зернами карбонатних порід. Фізико-механічні характеристики ґрунту: $E = 22$ МПа; $\gamma_{II} = 18,9$ кН/м³; $c_{II} = 0,8$ кПа; $\varphi_{II} = 33^\circ$; $e = 0,69$.

Металевий силос з плоским дном СМВУ-275.12 має діаметр 27,5 м та вагу 9000 кН і вміщує 76700 кН зерна (рис. 1) [11]. Загальна висота силосу 22,8 м. Місткість силосу – 9874 м³. Для якісного зберігання зерна споруджено аероднище товщиною 450 мм з вентиляційними каналами для подачі повітря. Для вивантаження зерна запроєктовано центральну конвеєрну галерею висотою 2,2 м та шириною 2,7 м. Палі, запроєктовані під фундаментною плитою, мають довжину 13 м (рис. 2).

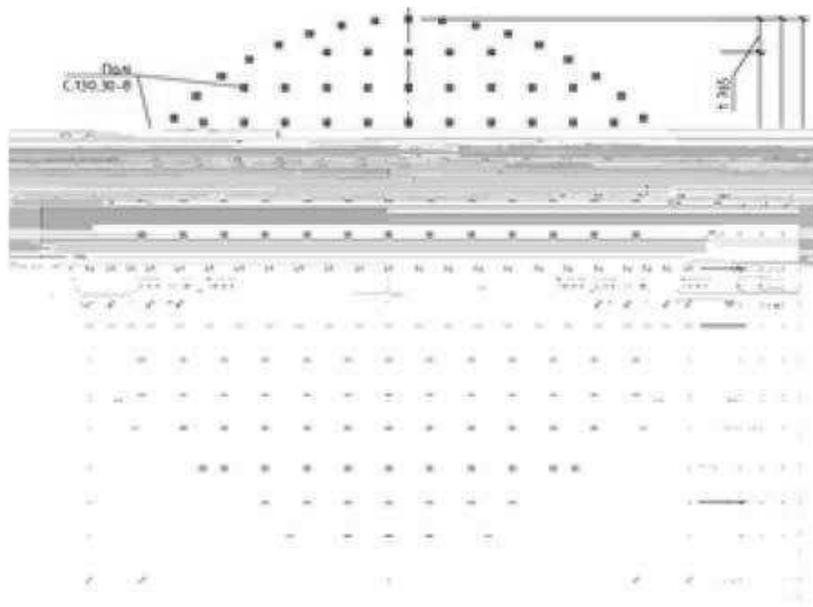


Рис. 2. План пального поля для фундаменту з кроком паль 5D-6D

Стіни конвеєрної галереї опираються на палі довжиною 11 м. Поперечний переріз палі 0,3x0,3 м. Відстань між палями під фундаментом плитою силосу становить 5-6 D (рис. 3). Відстань між двома рядами палей, на які спираються стіни конвеєрної галереї, становить 10 D.

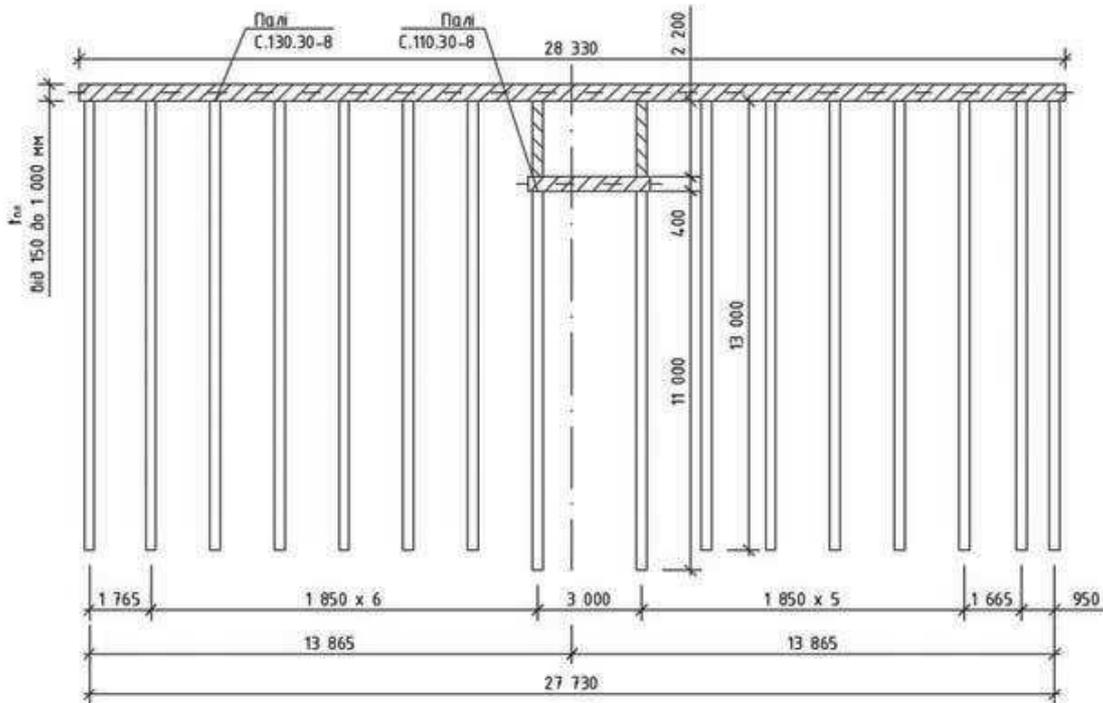


Рис.3. Поперечний розріз фундаменту з кроком палей 5D-6D

Несуча здатність палей та їх розрахункове навантаження обчислене за формулами норм [12] становить $F_d = 690$ кН та $N = 490,5$ кН відповідно.

На сучасному етапі при розрахунку та моделюванні плитних та плитно-пальових фундаментів зазвичай застосовують чисельне моделювання здебільшого ґрунту на методі скінчених елементів (МСЕ) для врахування сумісної роботи ґрунту-фундаменту-споруди [2, 6, 13].

Моделювання напружено-деформівного стану фундаментних конструкцій та ґрунту здійснювали в програмному комплексі ЛІРА-САПР. Для аналізу розрахункової схеми фундаменту використано підсистему ВІЗОР, а для аналізу і розрахунку ґрунтової основи під ним – підсистему ГРУНТ. Скінчено-елементну модель фундаментних конструкцій представлено на рис. 4.

Моделювання осідань пальово-плитного фундаменту проведено для випадку розташування основного масиву палей з кроком 5 D - 6 D при зміні товщини фундаментної плити від 150 мм до 1000 мм. Варто зауважити, що

при моделюванні пальових фундаментів конвеєрної галереї відстань між рядами паль була незмінною – $10 D$.

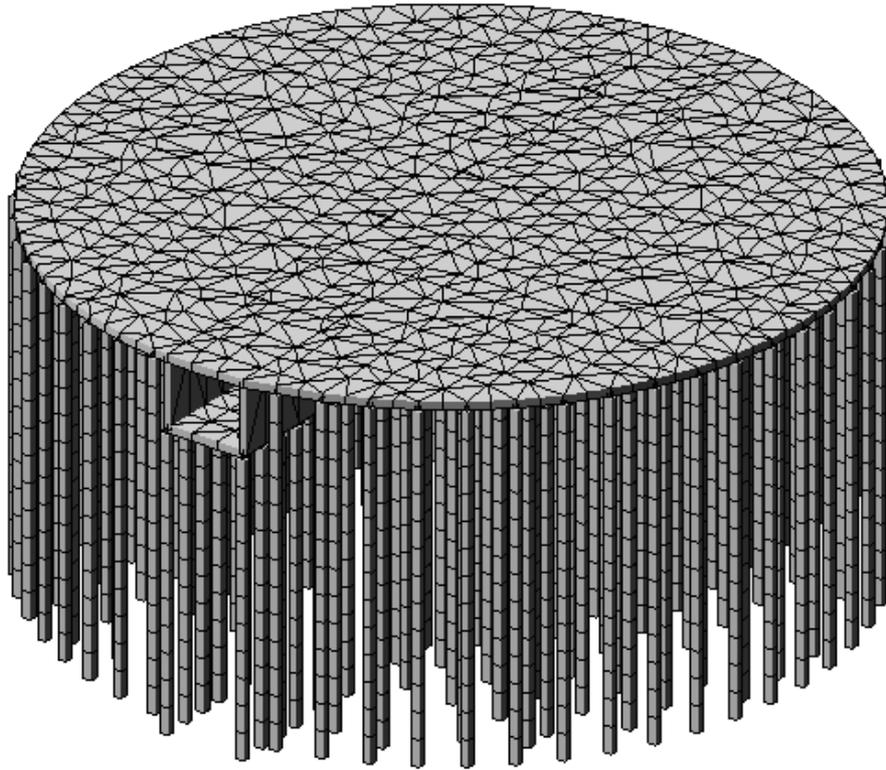


Рис 4. Скінчено-елементна модель фундаментних конструкцій металевого силосу СМВУ-275.12

Аналіз ізополів осідань (рис. 5 та рис. 6) свідчить, що максимальні осідання плити у пальово-плитному фундаменті зосереджені в її центральній частині. Це пояснюється тим, що палі, які розташовані у периферійній та центральній частинах пальового фундаменту працюють по-різному [9, 15]. Пояснюється це тим [9], що при навантаженні пальового фундаменту з близьким розташуванням паль одна від одної, ґрунт у міжпальовому просторі є затиснутим між ними і переміщується з фундаментом як єдине ціле. При цьому сили тертя на бічній поверхні паль у центральній частині пальового поля майже не реалізується, а виникають переважно на бічній поверхні паль зовнішнього ряду. Таким чином, несуча здатність паль, спричинена тертям, зменшується. При цьому зростає опір під п'ятою паль, у результаті чого збільшується їх осідання у порівнянні з периферійною областю.

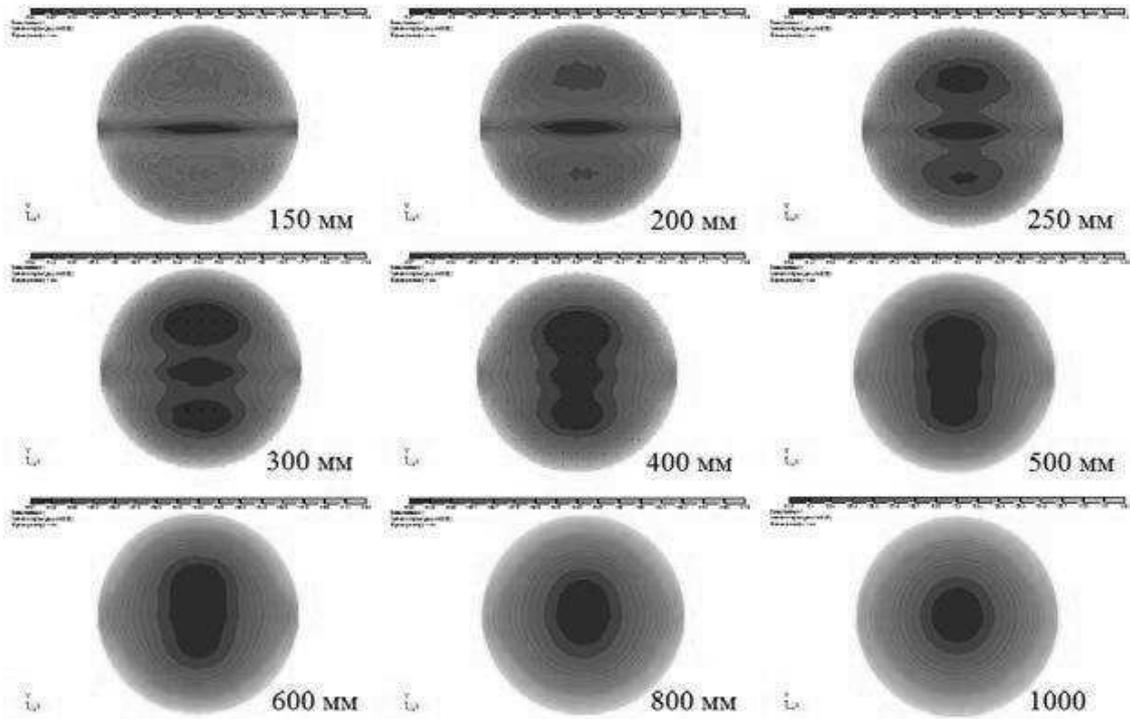


Рис. 5. Картини осідань фундаментної плити у пальово-плитному фундаментів з підземною конвеєрною галереєю при зміні товщини плити

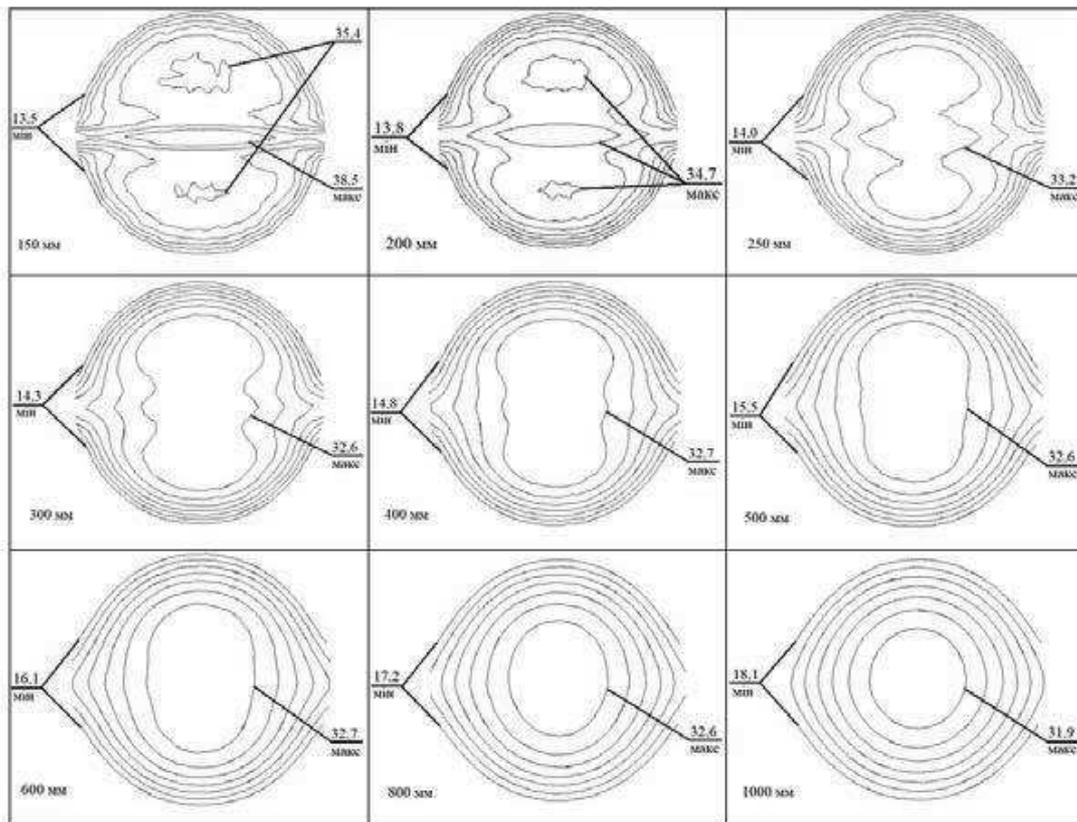


Рис. 6. Ізополя осідань фундаментної плити в залежності від її товщини

Аналіз значень осідань пальово-плитного фундаменту при моделюванні товщини плити від 150 мм до 1000 мм вказує на його високі жорсткісні характеристики, які у першу чергу забезпечуються пальовим полем. Їх величини, які не перевищують 40 мм, є суттєво меншими від гранично допустимого осідання 15 см [4]. Зміна товщини плити в діапазоні 150 – 1000 мм практично не впливає на осідання фундаменту. Дані про те, що товщина плити від 400 мм до 600 мм не впливає на її осідання отримано у роботі [6]. Варто зазначити, що при менших товщинах плити (150 і 200 мм) відбувається збільшення її прогину над конвеєрною галереєю. Це пов'язано з великим кроком (10 D) паль, на які спираються стінки галереї і, відповідно, плита над нею.

Крім величини максимальних осідань фундаментів, важливою є оцінка нерівномірності цих осідань по площі фундаментної плити. Варто зазначити, що нерівномірність цих осідань може впливати на зміну напружено-деформівного стану тонкостінного металевого силосу і спричинити його пошкодження та руйнування [7, 8]. Аналіз деформування плити в залежності від її товщини свідчить, що при значних її товщинах (600 – 1000 мм) жорсткість плити є настільки значною, що на її деформування не впливають ні крок паль, ні жорсткість конвеєрної галереї. Нерівномірність осідання пов'язана з тим, що палі, які розташовані в периферійній та середніх зонах, як уже зазначалось, працюють по-різному (в середній області ґрунт в міжпальовому просторі переміщається з палями як єдине ціле; у результаті цього частка несучої здатності паль, що зумовлена тертям зменшується) [9, 15]. У результаті осідання середньої області плити є найбільшим, а на периферії – найменшим.

При зменшенні товщини плити (≤ 500 мм) її жорсткість знижується і на деформацію плити починає впливати конвеєрна галерея. Причому в поздовжньому напрямку галереї, як зазначається у роботі [2], – це фундамент скінченної жорсткості, а в поперечному (перпендикулярному до галереї) її вплив несуттєвий. У зв'язку з цим по обидва боки від галереї утворюються “лінзи гнучкості” (рис. 5 та рис. 6). При товщині ≤ 200 мм спостерігаються прогини плити над конвеєрною галереєю. Максимальні їх значення концентруються над центральною частиною галереї та на периферійних ділянках.

Інтегральна оцінка впливу конструкцій пальово-плитного фундаменту з влаштованою підземною галереєю та їх параметрів на нерівномірність осідання фундаментної плити представлена на рис. 7.

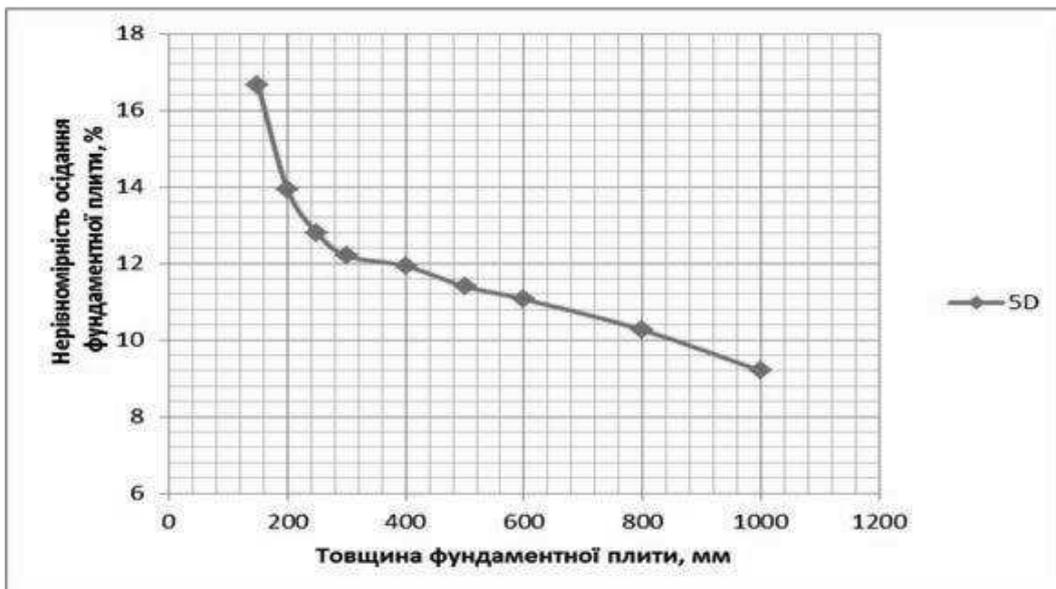


Рис. 7. Нерівномірність осідання фундаментної плити

Нерівномірність осідання фундаментної плити оцінювали за залежністю:

$$\varepsilon_S = \frac{S_{\max} - S_{\min}}{S_u} \cdot 100\%, \quad (1)$$

де S_{\max} , S_{\min} – максимальне та мінімальне осідання плити, см;

$S_u = 15$ см – нормативне осідання фундаменту для металевих силосів.

Аналіз кривої, представленої на рис. 7 показує, що величини нерівномірностей осідань змінюються від 8,4 % до 13,1 % при досліджуваних товщина фундаментної плити ≥ 300 мм. Це свідчить, що пальово-плитний фундамент має достатню жорсткість для згладжування нерівномірностей осідання, спричинених наявною конвеєрною галереєю.

При подальшому зменшенні товщини фундаментної плити до 150 мм нерівномірності деформування фундаментної плити пов'язані як з осіданням фундаменту, яке має менший вплив, так і з прогинами фундаментної плити над конвеєрною галереєю, який при зменшенні товщини перекриття має суттєвіший вплив. Максимальні прогини спостерігаються по центру конвеєрної галереї, а також у місцях її закінчення на краю фундаментної плити. Коефіцієнт нерівномірності деформацій в центральній зоні зростає до 16,7 % при кроці паль 5 D вздовж стін галереї. Це свідчить про значні нерівномірності деформацій в межах фундаментної плити, на які потрібно звернути увагу при проектуванні фундаментів металевих силосів.

Висновки. У результаті моделювання напружено-деформівного стану фундаменту металевих силосів встановлено:

1. Пальово-плитний фундамент для металевих силосів має досить високі жорсткісні характеристики. Разом з цим його конструктивні особливості (товщина плити, влаштування конвеєрної галереї) впливають на напружено-деформівний стан фундаментних конструкцій.

2. Вплив товщини плити в межах 150 – 1000 мм на осідання пальово-плитного фундаменту є несуттєвим (зміна значень осідань не перевищує 7 мм при максимальній величині осідань 38,5 мм), що зумовлено різними особливостями роботи паль посередині та на периферійній частині пальового поля.

3. Суттєвий вплив на нерівномірність осідання фундаментної плити пальово-плитного фундаменту мають жорсткісні характеристики підземної галереї. Розрахунки НДС показують, що у поздовжньому напрямку галерея є фундаментом скінченої жорсткості, а у поперечному (перпендикулярно до галереї) її вплив є менш значним. Зміна величини осідань по площі фундаментної плити становить 25 мм при максимальному її осіданні 38,5 мм, що необхідно враховувати при розрахунках фундаментів металевих силосів.

4. Оцінка напружено-деформівного стану фундаментної плити за розрахунковою схемою, що включає роботу паль, вплив конструкцій підземної галереї свідчить, що для розглянутого пальово-плитного фундаменту найбільш ресурсоекономним варіантом є плита товщиною 300 мм.

1. Постельга К., Сліпенька В. На шляху створення ефективного обладнання для зберігання зерна. Техніка і технології АПК, 2018. № 10-11. С. 22–27.

Postelha K., Slipenka V. Na shliakhu stvorennia efektyvnoho obladnannia dlia zberihannia zerna. Tekhnika i tekhnolohii APK, 2018. № 10-11. S. 22–27.

2. Мозговий А.О., Бутенко А.А. Особливості конструкцій залізобетонних фундаментів силосів збільшених розмірів. Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту, 2022 № 199. С. 54 – 67.

Mozghoviyi A.O., Butenko A.A. Osoblyvosti konstrukttsii zalizobetonnykh fundamentiv sylosiv zbilshenykh rozmiriv. Zbirnyk naukovykh prats Ukrainskoho derzhavnogo universytetu zaliznychnoho transportu, 2022 № 199. S. 54 – 67.

3. Махінко Н. О. Вплив вертикальних ребер на жорсткісні характеристики силосних ємностей для зберігання зерна. Вісник Національного університету "Львівська політехніка". Теорія і практика будівництва, 2018. № 888. С. 101-110.

Makhinko N. O. Vplyv vertykalnykh reber na zhorstkisni kharakterystyky sylosnykh yemnostei dlia zberihannia zerna. Visnyk Natsionalnoho universytetu "Lvivska politekhnika". Teoriia i praktyka budivnytstva, 2018. № 888. S. 101-110.

4. ДБН В.2.6-221:2021 Конструкції силосів сталевих з гофрованою стінкою для зерна. Основні положення – К.: Мінрегіон України, 2022. 11 с.

DBN V.2.6-221:2021 Konstrukttsii sylosiv stalevykh z hofrovanoi stinkoiu dlia zerna. Osnovni polozhennia – K.: Minrehion Ukrainy, 2022. 11 s.

5. А. М. Дворник, І. Г. Любченко, В. А. Титаренко, О. В. Шидловська Основи та фундаменти циліндричних силосів для зерна. Наука та будівництво, 2019. № 3. С. 12-18.

A. M. Dvornyk, I. H. Liubchenko, V. A. Tytarenko, O. V. Shydlovska Osnovy ta fundamenti tsylindrychnykh sylosiv dlia zerna. Nauka ta budivnytstvo, 2019. № 3. S. 12-18.

6. Підлущкий В., Литвин О. Вплив габаритів фундаментів зерносушильних комплексів на характер перерозподілу зусиль у фундаментних конструкціях. Основи та фундаменти, 2021. Вип. 42. С. 30-38.

Pidlutskiy V., Lytvyn O. Vplyv habarytiv fundamentiv zernosushylnykh kompleksiv na kharakter pererозpodilu zusyly u fundamentnykh konstruktsiiah. Osnovy ta fundamente, 2021. Vyp. 42. S. 30-38.

7. Банніков Д. О. Аварії та відмови сталевих тонкостінних циліндричних силосів для зернових культур. Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика. 2019. Вип. 15. С. 6-17.

Bannikov D. O. Avarii ta vidmovy stalevykh tonkostinnykh tsylindrychnykh sylosiv dlia zernovykh kultur. Mosty ta tuneli: teoriia, doslidzhennia, praktyka. 2019. Vyp. 15. S. 6-17

8. Rejowski K., Iwicki P. Buckling analysis of cold formed silo column. Mechanics and Mechanical Engineering, 2016. Vol. 20, No 2. P. 109–120.

9. Бойко І.П., Жук В.В., Корнієнко М.В., Сахаров О.С. Напружено-деформований стан пальового фундаменту висотної каркасної будівлі з урахуванням спільної роботи з ґрунтовим масивом. Будівельні конструкції. – 2004. – Вип. 61. – Т.1. – С. 19-22.

Boiko I.P., Zhuk V.V., Korniienko M.V., Sakharov O.S. Napruzhenodeformovanyi stan palovoho fundamentu vysotnoi karkasnoi budivli z urakhuvanniam spilnoi roboty z gruntovym masyvom. Budivelni konstruktsii. – 2004. – Vyp. 61. – T.1. – S. 19-22.

10. Зоценко М.Л., Винников Ю.Л., Пічугін С.Ф., Бібик М.В., Марченко В.І., Лапін М.І. Особливості визначення осідань основ плитних фундаментів зерносковищ силосного типу. Зб. наук. праць: галузеве машинобуд., буд-во. ПНТУ, 2009. Вип. 2 (27). С. 101 – 110.

Zotsenko M.L., Vynnykov Yu.L., Pichuhin S.F., Bibik M.V., Marchenko V.I., Lapin M.I. Osoblyvosti vyznachennia osidan osnov plytnykh fundamentiv zernoskhovyshch sylosnoho typu. Zb. nauk. prats: haluzeve mashynobud., bud-vo. PNTU, 2009. Vyp. 2 (27). S. 101 – 110.

11. Комплексні рішення для зберігання та обробки зерна. 48 с. <https://kmzindustries.ua/>
Kompleksni rishennia dlia zberihannia ta obrobky zerna. 48 s.

12. ДБН В.2.1-10-2018 Основи та фундаменти споруд. Основні положення проектування. К.: Мінрегіон України, 2018 – 42 с.

DBN V.2.1-10-2018 Osnovy ta fundamente sporud. Osnovni polozhennia proektuvannia. K.: Minrehion Ukrainy, 2018 – 42 s.

13. Poulos H. G. Tall building foundations: design methods and applications. Innovative Infrastructure Solutions, 2016. Vol. 1, No 1. P. 1–51.

14. Підгурський І.М., Чоп Р.В., Бойчук Н.В. Порівняльний аналіз проектних рішень фундаментів для будівель і споруд елеваторного комплексу. Матер. X Міжн. наук.-техн. конф. молодих учених та студентів «Актуальні задачі сучасних технологій» 24-25.11.2021 р., Тернопіль: ТНТУ, 2021. С. 20.

Pidhurskiy I.M., Chop R.V., Boichuk N.V. Porivnialnyi analiz proektnykh rishen fundamentiv dlia budivel i sporud elevatornoho kompleksu. Mater. X Mizhn. nauk.-tekhn. konf. molodykh uchenykh ta studentiv «Aktualni zadachi suchasnykh tekhnolohii» 24-25.11.2021 r., Ternopil: TNTU, 2021. S. 20.

15. Бойко І. П., Пятков О. В., Підлущкий В. Л. Дослідження напружено-деформованого стану фундаментів з палями різної довжини багатопверхових будинків у м. Київ. Зб. наук. праць (галузеве машинобуд., буд-во). Полтава: ПНТУ, 2013. Вип. 3(2). С. 40-48.

Boiko I. P., Piatkov O. V., Pidlutskiy V. L. Doslidzhennia napruzhenodeformovanoho stanu fundamentiv z paliamy riznoi dovzhyny bahatopoverkhovykh budynkiv u m. Kyiv. Zb. nauk. prats (haluzeve mashynobud., bud-vo). Poltava: PNTU, 2013. Vyp. 3(2). S. 40-48.