

М.Л. Зоценко, д.т.н., проф., Ю.Л. Винников, д.т.н., проф.,
С.Ф. Пічугін, д.т.н., проф., М.В. Бібік, к.т.н., доцент, В.І. Марченко, аспірант
Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка
М.І. Лапін, інженер, ТОВ «ЕКФА», м. Полтава

ОСОБЛИВОСТІ ВИЗНАЧЕННЯ ОСІДАНЬ ОСНОВ ПЛИТНИХ ФУНДАМЕНТІВ ЗЕРНОСХОВИЩ СИЛОСНОГО ТИПУ

Викладені порівняльні результати визначення осідань основ, складених слабкими глинистими ґрунтами, плитних фундаментів зерносховищ силосного типу методом пошарового підсумовування та моделюванням методом скінченних елементів із даними геодезичних спостережень після повного завантаження силосів.

Ключові слова: модуль деформації ґрунту, плитний фундамент, осідання, вирва осідання, взаємний вплив фундаментів.

Изложены сравнительные результаты определения осадок оснований, сложенных слабыми глинистыми грунтами, плитных фундаментов зернохранилищ силосного типа методом послойного суммирования и моделированием методом конечных элементов с данными геодезических наблюдений после полного загрузки силосов.

Ключевые слова: модуль деформации ґрунта, плитный фундамент, осадка, воронка оседания, взаимное влияние фундаментов.

The comparison results of determination of settlement of poor-bearing clay bases of slab foundation of the granary of silo type the method of layer-by-layer summing up and modeling by method of ultimate elements with dates of geodetic observation after total stress of the silos are presented.

Key words: modulus of soil deformation, slab foundation, settlement, settlement hole, interaction of foundations.

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими практичними завданнями. Ураховуючи вимоги діючого земельного законодавства щодо раціонального використання земель, новобудови планують перш за все на непридатних для сільського господарства ділянках, тобто актуальною є потреба використання для забудови майданчиків, складених слабкими ґрунтами. Зараз за таких умов у країні зводять значну частину зерносховищ із металевих силосів.

При цьому, однак, за нормами [1, 2] головною умовою розрахунку за деформаціями основ окремих металевих силосів не залежно від властивостей ґрунтів є граничнодопустиме осідання $S_u = 15$ см.

Аналіз останніх досліджень і публікацій, у яких започатковано розв'язання даної проблеми. Найбільше поширення в якості фундаментів зерносховищ силосного типу на слабких ґрунтах отримали плитні на природній і штучній основі та плитно-пальові фундаменти. Багаторічний досвід експлуатації таких зерносховищ [3 – 6] показав неминучість значного ризику при використанні слабких ґрунтів у якості природних основ фундаментів; суттєвий взаємний вплив сусідніх силосів на осідання їх основ; особливість напруженого стану основ – у циклічному впливі тиску від періодичного завантаження та розвантаження зерна в силоси; обов'язковість точних геодезичних спостережень за подібними спорудами.

Розрахунки осідань основ фундаментів зерносховищ силосного типу виконують аналітичними методами (пошарового підсумовування та лінійно деформованого шару) [1, 5, 7 – 9], а також моделюванням методом

скінченних елементів (МСЕ) [1, 7, 8, 10, 11], щоправда застосування способу лінійно деформованого шару для слабких ґрунтів є некоректним.

Основним параметром ґрунту, що впливає на достовірність прогнозу осідань основ зерносховищ, є його модуль деформації E . Зіставленням даних польових і лабораторних методів випробувань для четвертинних глинистих відкладів І.А. Агішевим у 1957 р. та О.І. Ігнатовою у 1966 р. [7] запропоновано підвищувальний коефіцієнт m_k до модулів деформації, отриманих на базі компресійних досліджень. Величина m_k при показникові текучості $0,5 < I_L \leq 1$ супіску, суглинку і глини, за даними посібника [9], змінюється від 2 до 6 залежно від виду ґрунту та коефіцієнта його пористості. Але, з іншого боку, підсумки тривалих геодезичних спостережень за осіданнями будівель і споруд на слабких (з $E < 5$ МПа), у т. ч. деградованих лесоподібних, ґрунтах [7, 12] вказують, що для розрахунку осідань їх основ більш правильно використовувати результати саме компресійних випробувань без коригуючих коефіцієнтів m_k .

Виділення не розв'язаних раніше частин загальної проблеми, яким присвячується стаття. Звичайно ж лише порівняння даних точних геодезичних спостережень за деформаціями основ, складених слабкими глинистими ґрунтами, плитних фундаментів зерносховищ силосного типу з результатами їх аналітичних розрахунків і чисельного моделювання можуть слугувати за критерій достовірності двох підходів призначення величин модуля деформації слабких ґрунтів.

Тому за **мету роботи** було прийнято порівняти на натурних об'єктах результати прогнозу осідань основ з водонасичених деградованих лесоподібних ґрунтів плитних фундаментів зерносховищ методом пошарового підсумовування та моделюванням МСЕ при застосуванні коефіцієнтів m_k до підсумків компресійних випробувань і без них із даними геодезичних спостережень після повного завантаження силосів.

Виклад основного матеріалу дослідження. До складу зерносховища на 100 тис. т зберігання зернових (проектант – ЧП «ПроектКонтактСервіс», м. Миколаїв) у с. Івківці, поблизу м. Прилуки Чернігівської області, входять 30 силосних корпусів (рис. 1), розміщених у три поздовжні ряди, в т. ч.: ряд з 10-ти силосів СМБУ 147.14.В12 ємністю 2965 м³ (на 2370 т зерна кожний); дворядне розміщення 12-ти силосів СМБУ 165.18.В12 ємністю 4773 м³ (на 3818 т); дворядне розміщення 10-ти силосів СМБУ 220.16.В12 ємністю 7785 м³ (на 6230 т). Параметри силосів подані в табл. 1.

Таблиця 1 – Параметри силосних корпусів зерносховища

№	Параметр	Марка силоса		
		СМБУ 220.16.В12	СМБУ 165.18.В12	СМБУ 147.14.В12
	1	2	3	4
1	Діаметр силоса D , м	22,00	16,50	14,67
2	Діаметр фундаментної плити $D_{\text{ф}}$, м	23,00	18,40	15,50
3	Висота до верху силоса H , м	26,46	26,02	20,88
4	Висота стін силоса h , м	18,43	20,74	16,13
5	Об'єм силоса, м ³	7785	4773	2965
6	Вага металоконструкцій силоса, т	66,84	42,44	36,03

Силоси металічні являють собою вмістилища циліндричної форми з конічною покрівлею та плоским бетонним днищем (рис. 2), з розвантажувальними транспортерами і каналами аероднища. Корпуси силосів монтують з оцинкованих панелей хвилястого профілю, які з'єднують на болтах, і додатково підсилюють зовнішніми вертикальними ребрами

жорсткості. Над корпусами влаштована сталева надсилосна транспортерна галерея, що спирається на парні сталеві ферми.

У геоморфологічному відношенні ділянка належить до надзапlavної тераси р. Удай. Потужність товщі лесоподібних супісків і суглинків у її межах складає близько 8 м, з глибини 9 – 9,5 м залягають достатньо щільні флювіогляціальні супіски та піски. Рівень ґрунтових вод на майданчику склав близько 3 м від поверхні землі. Ділянка – підтоплена. Лесоподібні ґрунти перейшли у замokлий деградований стан і належать до слабких.

При призначенні величин модуля деформації лесоподібних відкладів фахівцями ВАТ «ІНПРОЕКТСЕРВІС» (м. Миколаїв) до даних компресійних випробувань застосовані коефіцієнти m_k , а спеціалістами ТОВ «ЕКФА» – ні. На рис. 3 та у табл. 2 порівнюються значення модуля деформації E деградованих лесоподібних ґрунтів за даними обох організацій. Отже, за даними «ІНПРОЕКТСЕРВІС», величини модуля деформації ґрунтів виявились завищеними переважно у 2 – 3 рази, що при експлуатації зерносковищ, зведених на цих основах, призвело до суттєвого перевищення граничнодопустимих значень осідань таких споруд [1, 2].



Рисунок 1 – Конструкції силосних корпусів

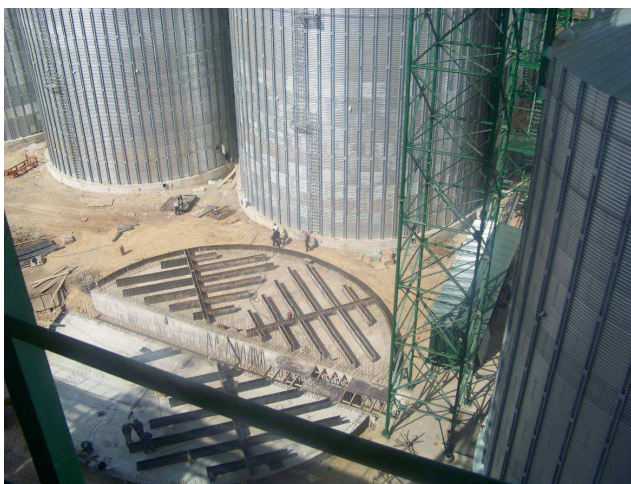


Рисунок 2 – Зведення фундаменту під зерносковище силосного типу

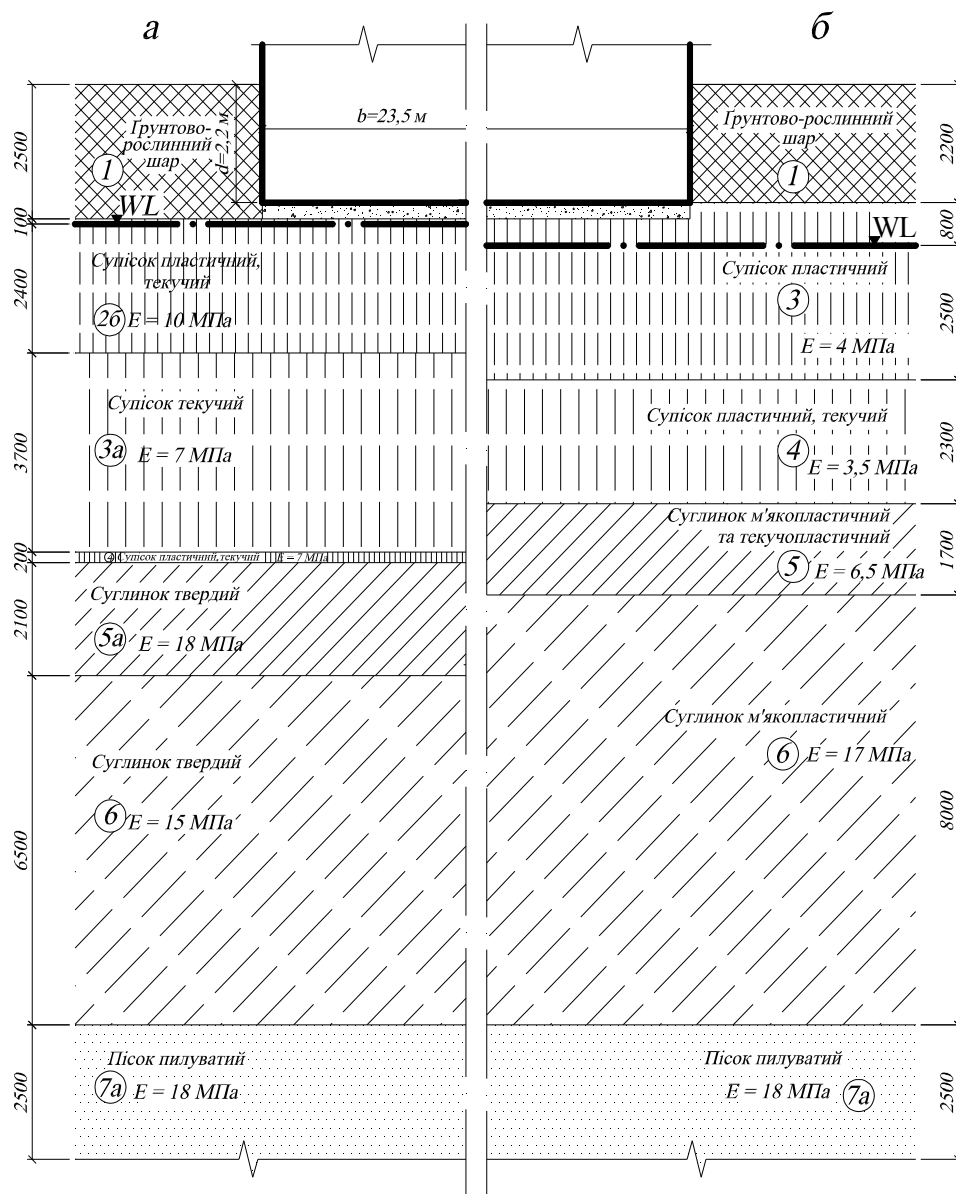


Рисунок 3 – Вихідні дані до визначення методами пошарового підсумовування і чисельного моделювання осідань основи плитного фундаменту для силоса СМВУ 220.16.В12: а – за дослідженнями ВАТ «ІНПРОЕКТСЕРВІС»; б – за дослідженнями ТОВ «ЕКФА»

Таблиця 2 – Порівняння значень модуля деформації ґрунтів

№ ПЕ	дані ВАТ «ІНПРОЕКТСЕРВІС»		дані ТОВ «ЕКФА»	
	назва ґрунту	E , МПа	назва ґрунту	E , МПа
ПЕ-2	супісок твердий, пластичний	10	супісок пластичний, текучий	3
ПЕ-2а	супісок твердий, пластичний	10	супісок пластичний, текучий	4
ПЕ-26	супісок пластичний, текучий	7	супісок пластичний, текучий	3,5
ПЕ-3	суглинок від тугопластичного до текучого	7	супісок пластичний, текучий	4
ПЕ-3а	супісок текучий	7	супісок пластичний, текучий	3,5
ПЕ-5	суглинок від твердого до текучопластичного	13	суглинок м'якопластичний	6,5

Фундаменти (рис. 2) зерносховищ силосного типу являють собою монолітні залізобетонні плити (на природній основі) з тунелями розвантажувальних транспортерів, на які зерно подають із силоса через люки в днищі. Діаметр поперечного перерізу фундаменту силоса СМВУ 147.14.В12 становить $b = 15,5\text{ м}$, силоса СМВУ 165.18.В12 – $b = 18,4\text{ м}$, а силоса СМВУ 220.16.В12 – $b = 23,5\text{ м}$. Глибина закладання їх підшви

від рівня планування складає $d = 2,2$ м. Значення характеристичного тиску під подошвою фундаментів силосів відповідно складає 182,1; 201,2 та 205,4 кПа. Величини середнього тиску під подошвою фундаментів силосів виявились меншими за розрахунковий опір ґрунту (як за даними ВАТ «ІНПРОЕКТСЕРВІС», так і ТОВ «ЕКФА»), тобто попередня умова розрахунку основ силосів за деформаціями [1] виконується. Тому їх можна визначати методами лінійної механіки ґрунтів, зокрема пошаровим підсумовуванням. Підсумки визначення осідань основ плит трьох типів силосів без урахування впливу сусідніх фундаментів зведено в табл. 3.

Таблиця 3 – Визначення осідань основ фундаментів зерносклади

Тип силоса	Характеристики ґрунтів за даними ТОВ «ЕКФА»			Характеристики ґрунтів за даними ВАТ «ІНПРОЕКТСЕРВІС»		
	Пошарове підсумовування	Моделювання	Моделювання з урахуванням впливу сусідніх фундаментів	Пошарове підсумовування	Моделювання	Моделювання з урахуванням впливу сусідніх фундаментів
СМВУ 147	227	237	248	112	126	143
СМВУ 165	279	297	319	145	185	198
СМВУ 220	298	315	333	180	231	241

З неї, зокрема, видно наступне. Визначені за даними ВАТ «ІНПРОЕКТСЕРВІС» величини осідань основ силосів СМВУ 147.14.В12 та СМВУ 165.18.В12 ($S = 11,2$ см і $S = 14,5$ см) не перевищують граничнодопустиму величину осідання окремих металевих силосів $S_u = 15$ см [2], а величина осідання основ силоса СМВУ 220.16.В12 складає $S = 18,0$ см, що на 20 % перевищує величину S_u . Аналогічно визначені за даними ТОВ «ЕКФА» величини осідань основ силосів СМВУ 147.14.В12, СМВУ 165.18.В12 і СМВУ 220.16.В12 ($S = 22,7$ см, $S = 27,9$ см, $S = 29,8$ см) навіть без урахування впливу сусідніх силосів значно перевищують (на 51,3; 86,0; 98,7 %) граничнодопустиму величину їх осідання $S_u = 15$ см [2].

Суттєва різниця розрахованих осідань основ силосів пояснюється відповідною різницею у значеннях модулів деформації ґрунтів у межах 8 – 9 м безпосередньо під подошвою фундаментів, а саме їх завищенням ВАТ «ІНПРОЕКТСЕРВІС» при інтерпретації даних компресійних випробувань.

Для оцінювання напружено-деформованого стану (НДС) основ плитних фундаментів силосів, зокрема у розрахунках деформацій їх основ, відповідно до розділу 8 [1] використано програмний комплекс «Plaxis 3D Foundation», призначений для розв'язання задач геотехніки МСЕ. Проектування геотехнічних споруд вимагає складання дискретних моделей для імітації нелінійної поведінки ґрунту. «Plaxis 3D Foundation» має можливості роботи з багатьма аспектами геотехнічних споруд. Він може бути застосований для вирішення просторових задач у сфері традиційної механіки ґрунтів (улаштування котлованів, траншей, насипів), будівництва підпірних стін, інфільтрації тощо. Програмний комплекс має зручний для користувача інтерфейс (табличні та графічні форми).

У постановці пружно-пластичної задачі прийняті такі передумови: враховані прояви нелінійності містять пластичну деформацію формозміни при складному напруженому стані (НС), безперешкодне деформування при розтязі; при складному НС (стиску зі зсувом) загальні деформації включають у себе лінійну (пружну) та пластичну частини, причому пластична складова деформацій виникає після досягнення НС межі міцності відповідно до умови Мора – Кулона для плоскої задачі

$$0,5 \cdot (\sigma_1 - \sigma_2) + 0,5 \cdot (\sigma_1 + \sigma_2) \cdot \sin \varphi - c \cdot \cos \varphi = 0. \quad (1)$$

Дискретизацію розрахункової області виконують МСЕ. Програма дозволяє розглядати НДС при одночасному чи покроковому прикладанні навантажень. Може бути врахований вихідний НДС, досягнений системою до прикладання навантаження. Компоненти напружень визначають лише в центрах континуальних скінченних елементів, що моделюють ґрунт, переміщення – у вузлах сітки. Особливістю методу є виконання розрахунків за граничними станами обох груп на одній розрахунковій схемі й при одній моделі ґрунту. Розрахунок може бути виконано шляхом поетапного навантаження: діючим навантаженням надається величина, що відповідає розрахунку за граничними станами другої групи, потім сили збільшують до найневигодніших розрахункових величин. Центральним питанням розрахунку основ і ґрунтових споруд за граничними станами першої групи є оцінка можливості втрати міцності та стійкості внаслідок розвитку значних зрушень та допустимість пластичних деформацій ґрунту.

Пружно-пластична задача поставлена так, щоб властивості ґрунтового середовища, які враховуються в розрахунку, могли бути описані реально визначеними характеристиками. При підготовці вихідних даних необхідні шість параметрів кожного шару: питома вага γ , модуль деформації E , коефіцієнт Пуассона ν , кут внутрішнього тертя φ , питома зчеплення c , параметр дилатації.

За вихідними даними до визначення осідань основи фундаментів для трьох типів силосів (як за даними «ІНПРОЕКТСЕРВІС», так і ТОВ «ЕКФА») було змодельовано НДС основ як окремих плитних фундаментів силосів (приклад подано на рис. 4), так і цілих груп плитних фундаментів силосів (приклад наведено на рис. 5). Підсумки моделювання НДС основ фундаментів зерносковищ силосного типу також вміщені в табл. 3.

Порівняно з осіданнями основ окремих силосів, що визначені методом пошарового підсумовування, за даними «ІНПРОЕКТСЕРВІС», величини осідань, отримані моделюванням, більші на 12,5 – 28,3 %, а за даними ТОВ «ЕКФА» – більші на 4,4 – 5,7 %. При врахуванні взаємного впливу силосів на осідання їх основи моделюванням величини цих осідань зростають на 4,3 – 13,5 %, за даними «ІНПРОЕКТСЕРВІС», і на 4,6 – 5,7 %, за даними ТОВ «ЕКФА», порівняно з осіданням основ окремих силосів.

При врахуванні взаємного впливу фундаментів силосів на осідання їх основи шляхом моделювання МСЕ величини осідань основ силосів СМВУ 147.14.В12, СМВУ 165.18.В12 і СМВУ 220.16.В12 ($S=24,8$ см, $S=31,9$ см та $S=33,3$ см) перевищують граничнодопустиму величину для металевих силосів $S_u=15$ см, за даними ТОВ «ЕКФА» відповідно на 65,3; 112,7 і 122 %; аналогічно, за даними «ІНПРОЕКТСЕРВІС», осідання основ силосів СМВУ 165.18.В12 та СМВУ 220.16.В12 на 32 і 60,7 % перевищують граничнодопустиму величину осідання. Це також свідчить про розвиток окремих зон пластичних деформацій в основі фундаментів.

За периметром кожного силоса влаштовано по 4 стінових марки, за якими в міру завантаження силоса розпочато геометричне нівелювання. Результати визначення осідань основ силосів методами пошарового підсумовування та моделюванням, за даними ТОВ «ЕКФА», підтверджують дані спостережень за осіданнями зерносковищ після їх повного завантаження, якими на початок березня 2010 р. уже зафіксовано розвиток осідань основ окремих зерносковищ до 24 – 29 см.

З початком експлуатації силосів навколо них виникли вирви осідання та, як наслідок їх розвитку, – руйнування бетонних вимощень (рис. 6). Стан

конструкцій підсиленої галереї в місці деформаційного шва через нерівномірні осідання основ фундаментів зернохочищ подано на рис. 7.

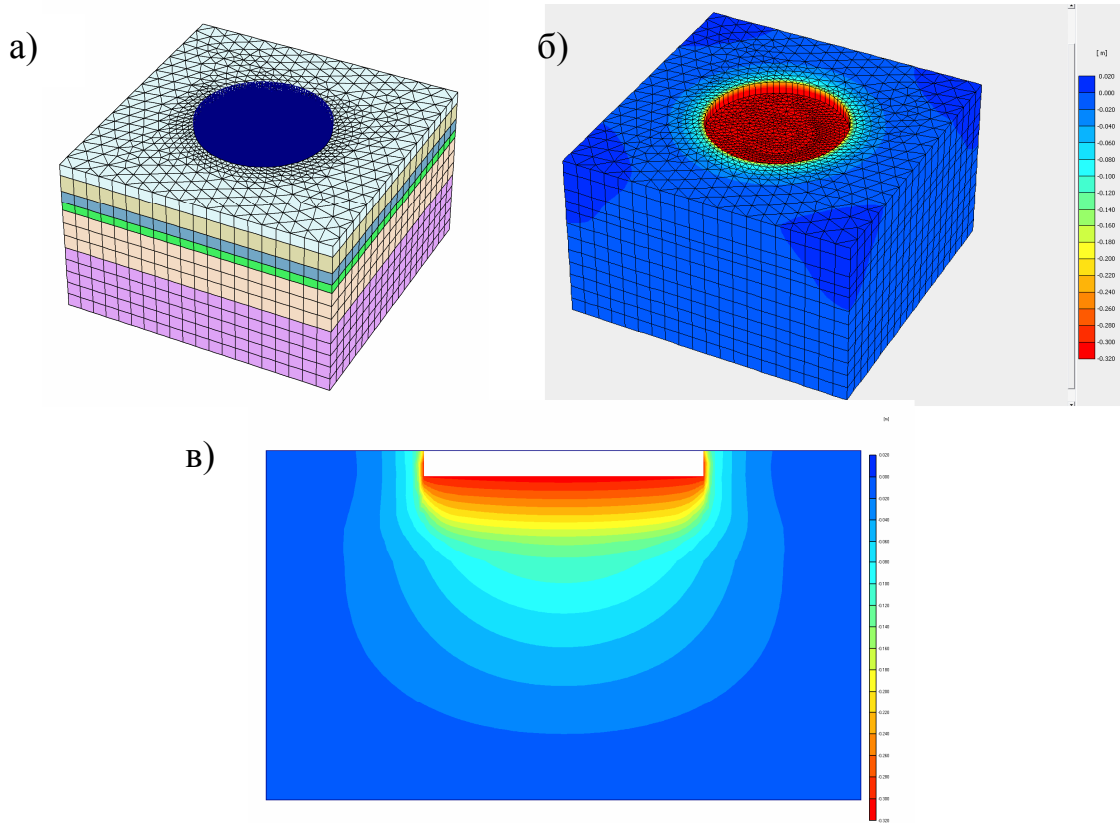


Рисунок 4 – Результати моделювання НДС основ окремого плитного фундаменту силосів СМВУ 220.16.В12 з характеристиками ґрунтів, за даними ТОВ «ЕКФА»: а – сітка скінченних елементів розміром 50x50x30 (h) м; б – вертикальні деформації основи; в – вертикальні деформації основи (переріз)

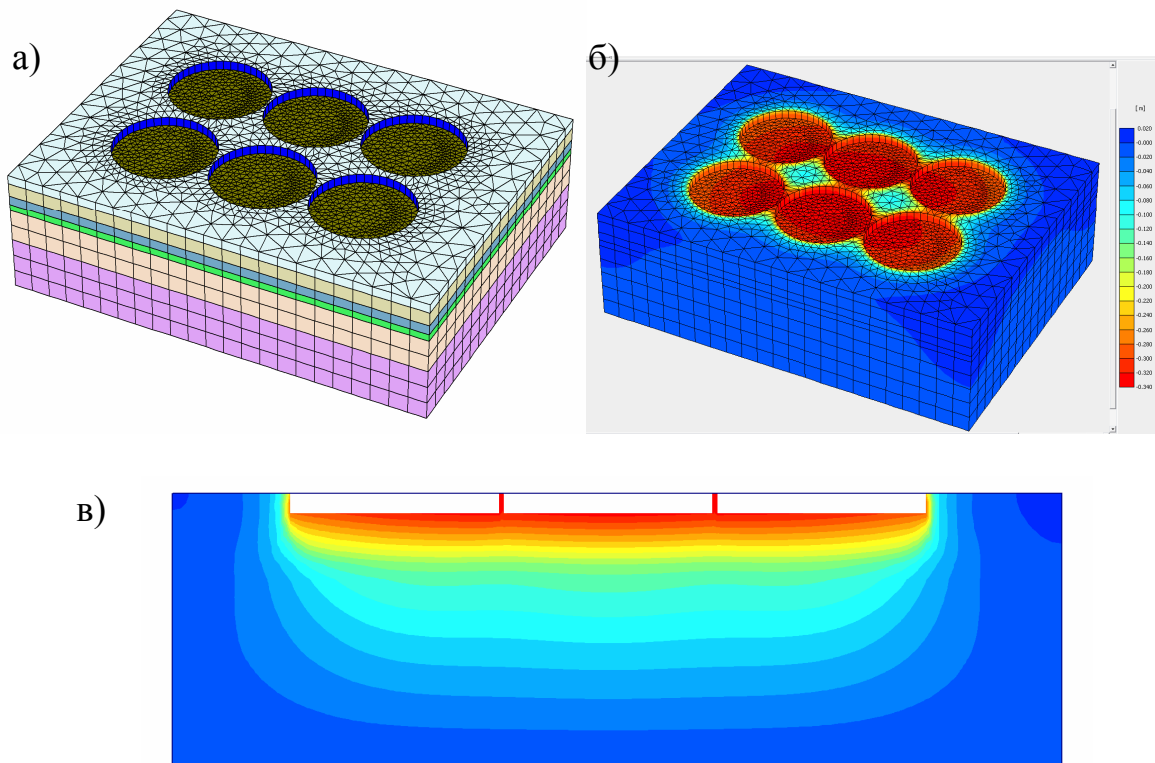


Рисунок 5 – Результати моделювання основ фундаментів силосів СМВУ 220.16.В12 з урахуванням впливу сусідніх силосів із характеристиками ґрунтів, за даними ТОВ «ЕКФА»: а – сітка скінченних елементів розміром 80х100х30 (h) м; б – вертикальні деформації основи; в – вертикальні деформації основи (переріз)



Рисунок 6 – Заміри параметрів вирви осідання навколо зерносховища



Рисунок 7 – Стан конструкцій підсилосної галереї в місці деформаційного шва через нерівномірні осідання основ фундаментів зерносховищ

Металеві ферми надсилосної транспортерної галереї виконані фактично як нерозрізні й над силосами СМВУ 147.14.В12 і СМВУ 165.18.В12 спираються на стійки, закріплені на силосах. Тому переміщення, що виникли (і далі зростатимуть) через нерівномірні осідання силосів, передаються безпосередньо на конструкції галереї та провокують їх відповідні деформації. Унаслідок нерозрізності ферм ці осідання вже викликали пошкодження опорних вузлів ферм (рис. 8) і відхилення стійок від вертикалі; при зростанні нерівномірних деформацій основи вони можуть створити небезпеку обвалення ферм галереї.



Рисунок 8 – Руйнування вузла надсилосної галереї внаслідок нерівномірного осідання фундаментів

Вищеописаний досвід реалізовано в проектному рішенні основи плитних фундаментів зерносховищ силосного типу СМВУ 220.16.В12 на тому ж майданчику, її було посилено в межах товщі деградованих лесів вертикальними ґрунтоцементними елементами.

Висновки з даного дослідження. Отже, у підсумку порівняння на натурних об'єктах результатів визначень осідань основ, складених водонасиченими слабкими ґрунтами, плитних фундаментів зерносховищ методами пошарового підсумовування і моделювання з даними геодезичних спостережень після повного завантаження силосів доведено, що для розрахунку осідань таких основ дані компресійних випробувань ґрунтів слід використовувати без підвищувальних коефіцієнтів m_k .

Література

1. ДБН В.2.1-10-2009. Основи та фундаменти будівель і споруд. – К.: Мінрегіонбуд України, 2009. – 107 с.
2. ДБН В.2.2-8-98. Підприємства, будівлі і споруди по зберіганню та переробці зерна. – К.: Держбуд України, 1998, 41 с.
3. Алексеев В.М. Осадки элеваторных сооружений на водонасыщенных пылевато-глинистых грунтах / В.М. Алексеев, Г.А. Липсон, В.Е. Курмес // Строительство на торфах и деформации сооружений на сильносжимаемых грунтах: тр. II Балтийской конф. по механике грунтов и фундаментостроению. – М.: ВНИИОСП, 1988. – Т. 2. – С. 193 – 200.
4. Егоров К.Е. К расчету деформаций оснований: сб. ст. / К.Е. Егоров. – М.: ФГУП «ВНИИГТИ», 2002. – 400 с.
5. Фундаменты стальных резервуаров и деформации их оснований / П.А. Коновалов, Р.А. Мангушев, С.Н. Сотников, А.А. Землянский, А.А. Тарасенко // Научное издание. – М.: Изд-во АСВ, 2009. – 336 с.
6. Тугаенко Ю.Ф. Процессы деформирования грунтов в основаниях фундаментов, свай и свайных фундаментов / Ю.Ф. Тугаенко. – Одесса: Астропринт, 2008. – 216 с.
7. Інженерна геологія. Механіка ґрунтів, основи та фундаменти: підручник / М.Л. Зоценко, В.І. Коваленко, А.В. Яковлев, О.О. Петраков, В.Б. Швець, О.В. Школа, С.В. Біда, Ю.Л. Винников. – Полтава: ПолтНТУ, 2004. – 568 с.
8. Тер-Мартirosян З.Г. Механика грунтов: учебное пособие / З.Г. Тер-Мартirosян. – М.: АСВ, 2005. – 488 с.
9. Пособие по проектированию оснований зданий и сооружений (к СНиП 2.02.01-83). – М.: Стройиздат, 1986. – 415 с.
10. Eurocode 7 for geotechnical design – a model code for non-EU countries? / B. Schuppener, A.J. Bond, P. Day, R. Frank, T.L.L. Orr, G. Scarpelli, B. Simpson // Proc. of the

17th International Conf. on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. – Olexandria, Egypt, 2009. – Amsterdam, Berlin, Tokyo, Washington: JOS Press. – 2009. – P. 1132 – 1146.

11. Зоценко Н.Л. Сравнительная оценка эффективности армирования основания по данным штамповых испытаний и математического моделирования / Н.Л. Зоценко, Н.И. Лапин, Р.В. Петраш // *Основания, фундаменты и механика грунтов.* – 2008. – №4. – С. 17 – 20.

12. Сотников С.Н. *Строительство и реконструкция фундаментов зданий и сооружений на слабых грунтах: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.23.02 / С.Н. Сотников.* – М.: ВНИИОСП, 1987. – 49 с.

Надійшла до редакції 14.04. 2010

© М.Л. Зоценко, Ю.Л. Винников, С.Ф. Пічугін,
М.В. Бібік, В.І. Марченко, М.І. Лапін