

*Ю.Л. Винников, д.т.н., профессор, В.І. Марченко, аспірант
Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка*

ОЦІНЮВАННЯ ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ АРМОВАНИХ ОСНОВ ЗЕРНОСХОВИЩ ПРИ ЦИКЛІЧНОМУ РЕЖИМІ ЗАВАНТАЖЕННЯ ЗА ПРОСТОРОВОЮ ЗАДАЧЕЮ МЕТОДУ СКІНЧЕННИХ ЕЛЕМЕНТІВ

Викладено методику чисельного розрахунку армованих за бурозмішувальною технологією слабких глинистих основ плитних фундаментів зерносховищ за просторовою версією методу скінченних елементів із використанням пружно-пластичної моделі ґрунту та порівняння її результатів із натурними спостереженнями.

Ключові слова: *армована основа, плитний фундамент, метод скінченних елементів, пружно-пластична модель, циклічне завантаження.*

*Ю.Л. Винников, д.т.н., профессор, В.И. Марченко, аспирант
Полтавский национальный технический университет имени Юрия Кондратюка*

ОЦЕНКА ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ АРМИРОВАННЫХ ОСНОВАНИЙ ЗЕРНОХРАНИЛИЩ ПРИ ЦИКЛИЧЕСКОМ РЕЖИМЕ ЗАГРУЗКИ ПО ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ЗАДАЧЕ МЕТОДА КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Изложена методика численного расчета армированных по буросмесительной технологии слабых глинистых оснований плитных фундаментов зернохранилищ по пространственной версии метода конечных элементов с использованием упруго-пластической модели грунта и сравнение ее результатов с натурными наблюдениями.

Ключевые слова: *армированное основание, плитный фундамент, метод конечных элементов, упруго-пластическая модель, циклическая загрузка.*

*Y.L. Vynnykov, DrSc, Prof., V. Marchenko, postgraduate student
Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University*

DEFORMED STATE ESTIMATION OF GRANARY BASES REINFORCED BY DRILL AND MIXING TECHNOLOGY AFFECTED BY CYCLIC LOADING THROUGH THE INSTRUMENTALITY OF THREE-DIMENSIONAL PROBLEM OF FINITE ELEMENT METHOD

The numerical calculation method of reinforced by drill and mixing technology soft clay bases of plate foundations of granaries by spatial version of finite element method through the instrumentality of elasto-plastic soil model and comparison its results with outcomes of field observations are presented.

Keywords: *reinforced base, plate foundation, finite element method, reinforcement, elasto-plastic model, cyclic loading.*

Постановка проблеми в загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями. Сучасна практика проектування базується на розрахунках кінцевих стабілізованих осідань основ будівель і споруд, що коректно при зведенні об'єктів з одноразовим завантаженням основи. Для цих задач придатні нормативні методики розрахунків осідань, що базуються на лінійних залежностях деформацій від напружень, чисельні методи з використанням пружно-пластичних моделей тощо. Однак для споруд, що передають на основу циклічні навантаження, як

то зерносховища, резервуари, склади врахування такого режиму необхідне для забезпечення їх нормальної експлуатації.

Аналіз останніх досліджень і публікацій, у яких започатковано розв'язання цієї проблеми. Спроби оцінити вплив циклічного режиму завантаження для прогнозування осідань основ і кренів плитних фундаментів робилися з використанням нормативних аналітичних методів, але вони дають змогу визначити осідання лише при первинному завантаженні [1, 2]. Основною проблемою таких розрахунків є завищення здатності основ до відновлення деформацій та неврахування осідань, досягнутих на попередніх стадіях при складному режимі завантаження [3, 4]. Розроблення чисельних методів, зокрема методу скінченних елементів (МСЕ), дозволила розв'язати проблему врахування впливу попередніх стадій навантаження на подальше деформування основи [5].

Для оцінки циклічного режиму навантаження розроблено моделі ґрунтів, які можуть адекватно прогнозувати осідання на стадіях завантаження-розвантаження, використовуючи МСЕ. Серед них можна виділити модель ізотропного зміцнення ґрунту Hardening soil model [6], модель пружно-в'язко-пластичної основи О.Г. Шашкіна [5] та ін. Указані моделі зарекомендували себе як достатньо достовірні при моделюванні відкопування глибоких котлованів із подальшим завантаженням основ до значних тисків, тобто вони дають змогу враховувати як завантаження, так і розвантаження основ.

Виділення не розв'язаних раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується стаття. Проте не достатньо розроблено методика прогнозування за моделями зміцнення ґрунту осідань основ, у т.ч. армованих, при декількох циклах їх завантаження-розвантаження [2, 7].

Тому за мету дослідження прийнято вдосконалення методики розрахунку осідань природних та армованих основ споруд при циклічному режимі їх завантаження з використанням моделей зміцнення ґрунту й порівняння визначених за нею осідань із результатами натурних спостережень.

Виклад основного матеріалу дослідження. Завантаження основ плитних фундаментів зерносховищ силосного типу на природних основах, зведених поблизу с. Івківці Прилуцького р-ну Чернігівської обл., спричинило їх значні осідання, що перевищили гранично допустимі у 2 – 2,5 рази [8 – 10]. Тому було вирішено підсилити основи плитних фундаментів двох нових силосів марки СМВУ 220.16.В12 об'ємом 7785 м³ (6230 т зерна) вертикальними ґрунтоцементними елементами (ГЦЕ), які виготовляли за бурозмішувальною технологією [11, 12]. Інженерно-геологічний розріз із конструктивним рішенням підсилення основ силосів наведено на рисунку 1, а характеристики ґрунтів – у таблиці 1.

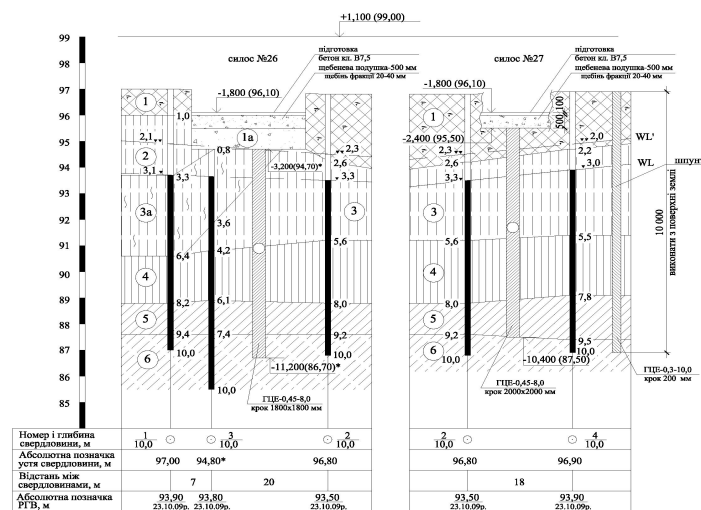


Рисунок 1 – Інженерно-геологічний розріз із конструктивним рішенням підсилення основ плитних фундаментів силосів №26 і №27

Таблиця 1 – Фізико-механічні характеристики ґрунтів

№	Найменування ґрунту	γ , кН/м ³	W	W_L	W_p	φ_{II} , °	c_{II} , кПа	E , МПа
1	Ґрунтово-рослинний шар	15,0	-	-	-	-	-	-
2	Супісок лесоподібний, пластичний	18,2	0,24	0,26	0,20	22	12	3
3	Супісок лесоподібний пластичний, текучий	19,2	0,26	0,26	0,21	22	10	4
4	Суглинок м'якопластичний	18,8	0,31	0,34	0,22	16	21	3,5
5	Суглинок м'якопластичний	19,4	0,27	0,29	0,21	22	18	6,5
6	Супісок флювіогляціальний, пластичний	20,3	0,22	0,24	0,20	27	15	17

Розрахунок армування основ фундаментів зерносовищ проведено за умови приведення середньозважених модулів деформації ґрунтів у межах армованого масиву до такого значення, при якому розраховані за нормативним методом пошарового підсумовування на максимальний (за проектом) тиск під подошвою фундаменту ($p = 205,4$ кПа) осідання не перевищували б гранично допустимих значень $S_u = 150$ мм [9 – 12]. При цьому модуль деформації ґрунтоцементу приймали рівним $E_{sc} = 150$ МПа.

Таким чином, для армування основ силосів №26 і 27 прийнято влаштування ГЦЕ глибиною 8 м і діаметром поперечного перерізу 0,45 м.

У результаті розрахунку проектом підсилення основ під ці силоси передбачено влаштування 156 (для силосу №26) і 129 (для силосу №27) ГЦЕ з кроком 1,8 і 2,0 м відповідно. При такому розміщенні ГЦЕ відсоток АРМування масиву становить $i = 5\%$ (для силосу №27) та $i = 6\%$ (для силосу №26).

При розрахунках механічних характеристик армованих ґрунтів, крім їх модулів деформації, визначали ще й середньозважені значення питомого зчеплення, приймаючи за даними попередніх досліджень [11, 12] його величину для ґрунтоцементу $c_{sc} = 100$ кПа. При цьому величини кута внутрішнього тертя та питомої ваги ґрунту приймали незмінними (табл. 2).

Під час зведення зерносовищ за осіданнями їх основ організовано геодезичні спостереження. Їх виконували на кожному етапі завантаження-розвантаження. Результати спостережень використано для вдосконалення методики моделювання МСЕ різних стадій експлуатації зерносовищ на армованих і природних основах.

Моделювання МСЕ проведено з використанням програмного комплексу Plaxis 3D Foundation. При моделюванні використано дві моделі ґрунту: ідеально пружно-пластичну модель з умовою міцності Мора – Кулона – Mohr – Coulomb (далі скорочено МС) і пружно-пластичну модель ізотропного зміцнення ґрунту – Hardening Soil Model (HSM).

Таблиця 2 – Розраховані значення характеристик армованого ґрунту

№ силосу	Номер ПГЕ	γ , кН/м ³	c_{II} , кПа	φ_{II} , °	E , МПа
26	ПГЕ-3	19,2	15,4	22	12,7
	ПГЕ-4	18,8	25,7	16	12,2
	ПГЕ-5	19,4	22,9	22	15,1
	ПГЕ-6	20,3	20,1	27	24,9
27	ПГЕ-3	19,2	14,4	22	11,2
	ПГЕ-4	18,8	24,9	16	10,7
	ПГЕ-5	19,4	22,0	22	13,6
	ПГЕ-6	20,3	19,2	27	23,6

Найбільш поширеною моделлю в розрахунках МСЕ є модель Mohr – Coulomb (далі МС), насамперед через достатність стандартних механічних параметрів ґрунтів: модуль загальної деформації E , параметри міцності (кут внутрішнього тертя φ і питома зчеплення c), що визначають стандартними лабораторними випробуваннями ґрунтів. Проте ця модель не враховує зміцнення (ущільнення) основи, а при її розвантаженні відновлення деформацій (так звана пружна складова) значно перевищують їх фактичні величини тощо [3, 5, 6].

Основною відмінністю моделі ізотропного ущільнення від пружно-пластичної моделі Мора – Кулона є зміцнення ґрунту основи, що проявляється у зміні положення граничної поверхні в просторі головних напружень [5, 6].

У цій моделі поєднано два види зміцнення: зрушення та стиснення (ущільнення). Перше зумовлено переважно девіатором напружень, а друге – компресією. Ця модель придатна для моделювання поведінки різних видів ґрунтів, зокрема й слабких. При навантаженні за межею пружної роботи ґрунту відбувається зниження модуля деформації ґрунту, а також розвиток невідновних (пластичних) деформацій. У цій моделі використовують положення теорії пластичності, а не пружності. Залежність між девіатором напружень та осьовою деформацією за HSM апроксимують гіперболою (рис. 2).

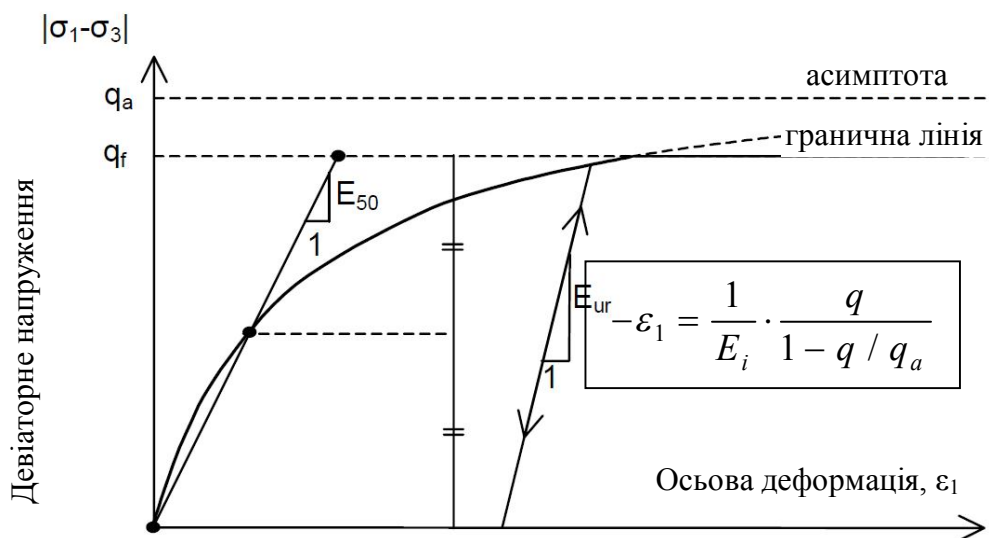


Рисунок 2 – Гіперболічна залежність осьової деформації від девіатора напружень у *Hardening soil model*

Параметри жорсткості моделі призначають за результатами випробувань ґрунту в приладі трьохосового стиснення чи на базі штампових випробувань ґрунту. Для моделювання необхідно задавати такі характеристики: E_{50}^{ref} – модуль деформації ґрунту, який визначають при досягненні деформації від тиску, що дорівнює половині від руйнуючого навантаження (рис. 2); E_{oed}^{ref} – компресійний модуль деформації ґрунту, який визначають за початковою ділянкою кривої (рис. 2); E_{ur}^{ref} – модуль пружності ґрунту, який визначають за випробуваннями ґрунту в режимі «розвантаження-повторне завантаження» (рис. 2); параметр зміцнення m , який показує, наскільки змінюються модулі деформації ґрунту відносно базового тиску p^{ref} , його визначають на базі трьохосових випробувань.

До параметрів міцності моделі відносять питоме зчеплення C , кут внутрішнього тертя φ , кут дилатансії ψ , які отримують за результатами стандартних методів випробувань ґрунтів.

З метою обґрунтованого вибору моделі для коректного опису поведінки армованого ґрунтового масиву проведено так зване тестове моделювання МСЕ лоткового експерименту [13] при циклічному режимі завантаження. Результати моделювання штампових лоткових випробувань неармованої основи подано на рисунку 3, а, а армованої – на рисунку 3, б.

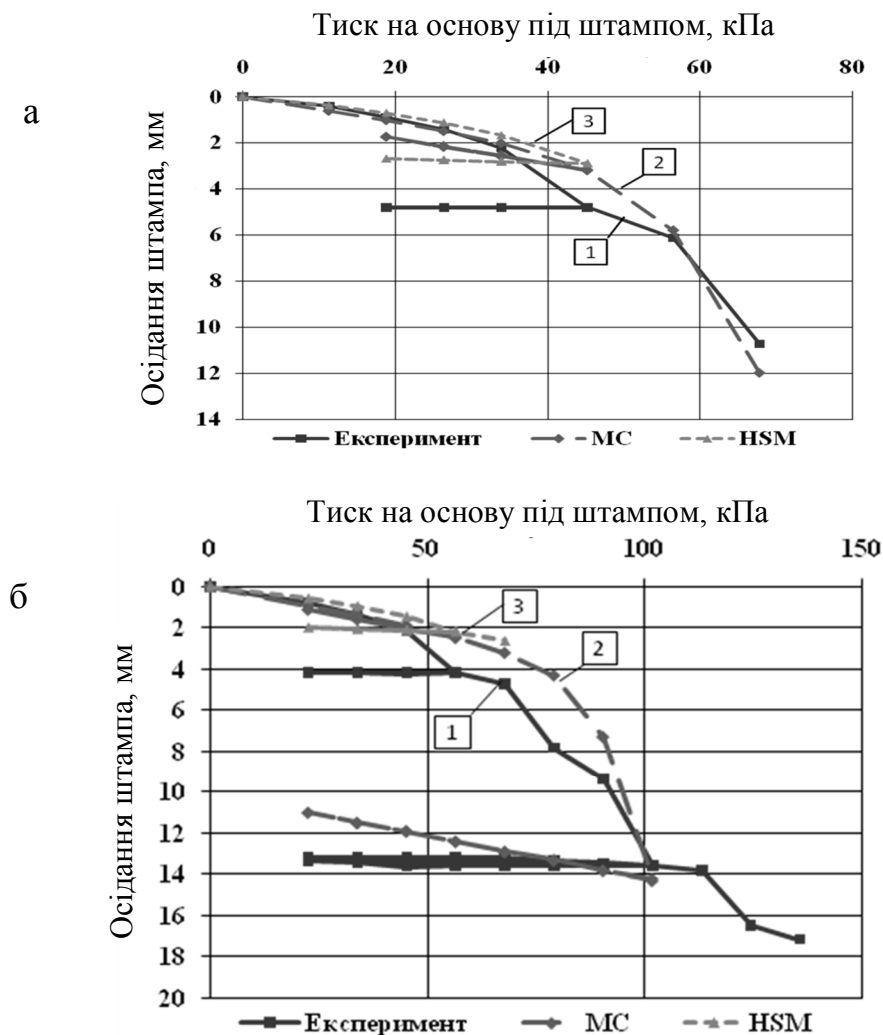


Рисунок 3 – Результати лоткових досліджень і чисельного моделювання штампових випробувань неармованої (а) і армованої (б) основи в лотку на циклічний режим завантаження; 1 – крива залежності осідання штампa S від тиску на основу p за лотковими випробуваннями; 2 – те ж за результатами моделювання з використанням моделі MC; 3 – те ж з використанням моделі HSM

Ці графіки показують високу відповідність експериментальних і теоретичних залежностей при використанні штампових характеристик ґрунтової пасти (модулів деформації та параметрів міцності) й середньозважених характеристик армованого масиву. При цьому моделі MC відповідає необмежений розвиток деформацій навіть за межами другого критичного тиску, тоді як HSM – вичерпання несучої здатності при досягненні другого критичного тиску, для якого власне й визначалися характеристики міцності [13].

За результатами моделювання штампових випробувань армованої основи в лотку при циклічному режимі навантаження на неї можливо зробити узагальнення про завищення значень відновлюваних деформацій моделлю МС, а при використанні HSM є можливість більш адекватно оцінювати вплив циклічності в межах лінійної залежності між напруженнями та деформаціями. Подальше деформування глинистої пасти із заданими параметрами при використанні програмою HSM не виконується (рис. 2), а за моделлю МС завантаження моделюється цілком адекватно до експериментальної залежності, але при цьому дещо завищується здатність основи до відновлення деформацій.

Отже, для коректного моделювання НДС природних і армованих за бурозмішувальною технологією слабких глинистих основ плитних фундаментів зерносховищ доцільно використати модель HSM з однаковими модулями E_{50}^{ref} і E_{oed}^{ref} , а модуль пружності $E_{ur}^{ref} = 10 \cdot E_{50}^{ref}$ – для слабких ґрунтів і $E_{ur}^{ref} = 5 \cdot E_{50}^{ref}$ для ґрунтів з модулями деформації більше 5 МПа.

Для підтвердження адекватності обґрунтованої вище моделі ґрунту (HSM) для подальших досліджень проведено моделювання МСЕ фактичної поведінки силосів. Інженерно-геологічні умови задачі прийнято за рисунком 1 і таблицею 1.

Фундаменти силосів являють собою круглі в плані плити коробчастого типу, порожнини яких заповнені ущільненим піском (рис. 4) діаметром $D = 22,5$ м і глибиною закладення $d = 2,2$ м.

Розміри розрахункової області в плані приймали за умови виключення впливу її меж на деформування основи. За умови припущення розвитку осідань силосів до 350 мм оптимальні розміри розрахункової області в плані склали 100×100 м (рис. 4). При цьому осідання на межі розрахункової області складуть менше 15%.

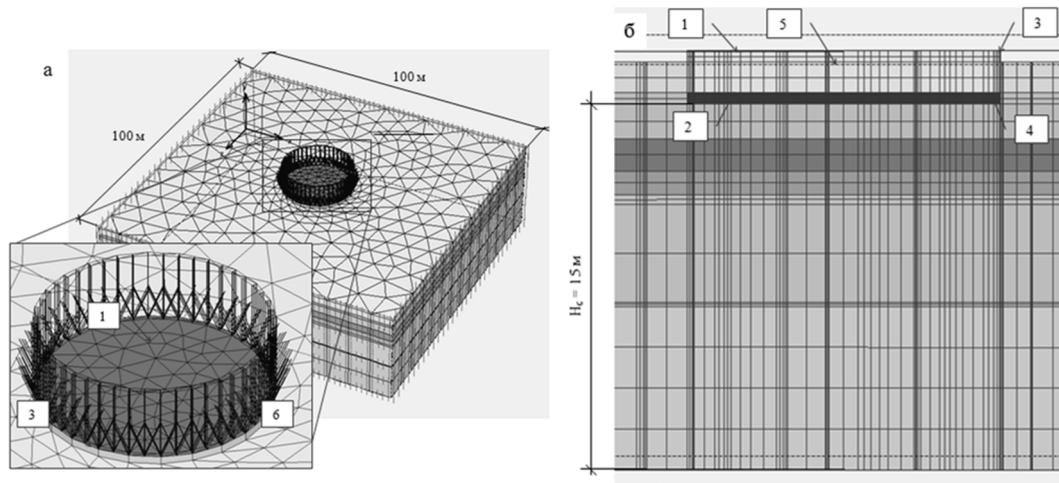


Рисунок 4 – Розрахункова схема для моделювання НДС окремого силосу СМВУ 220.16.В12: а – загальний вигляд моделі та сітки скінченних елементів; б – вигляд розрахункової схеми у розрізі; 1 – верхня залізобетонна плита; 2 – нижня залізобетонна плита (дно силосу); 3 – стінка плитного фундаменту; 4 – щебенева подушка; 5 – ущільнений пісок; 6 – навантаження від ваги стін силосу та надсилосних конструкцій; H_c – глибина товщі ґрунтів, яка стискається

Глибина розрахункової області обмежувалася умовною подошвою стисливої товщі нижче подошви фундаменту, визначеною за результатами методу пошарового сумування за умови $\sigma_{zp} = 0,5 \sigma_{zg}$ (за [9] для плит із шириною фундаменту $b > 20$ м) і складала 15 м.

Приклади графіків осідань природних й армованих основ, розраховані за моделями МС і HSM, подано на рисунку 5, де також наведено графік зміни тиску в часі та графік осідань за результатами натурних геодезичних спостережень.

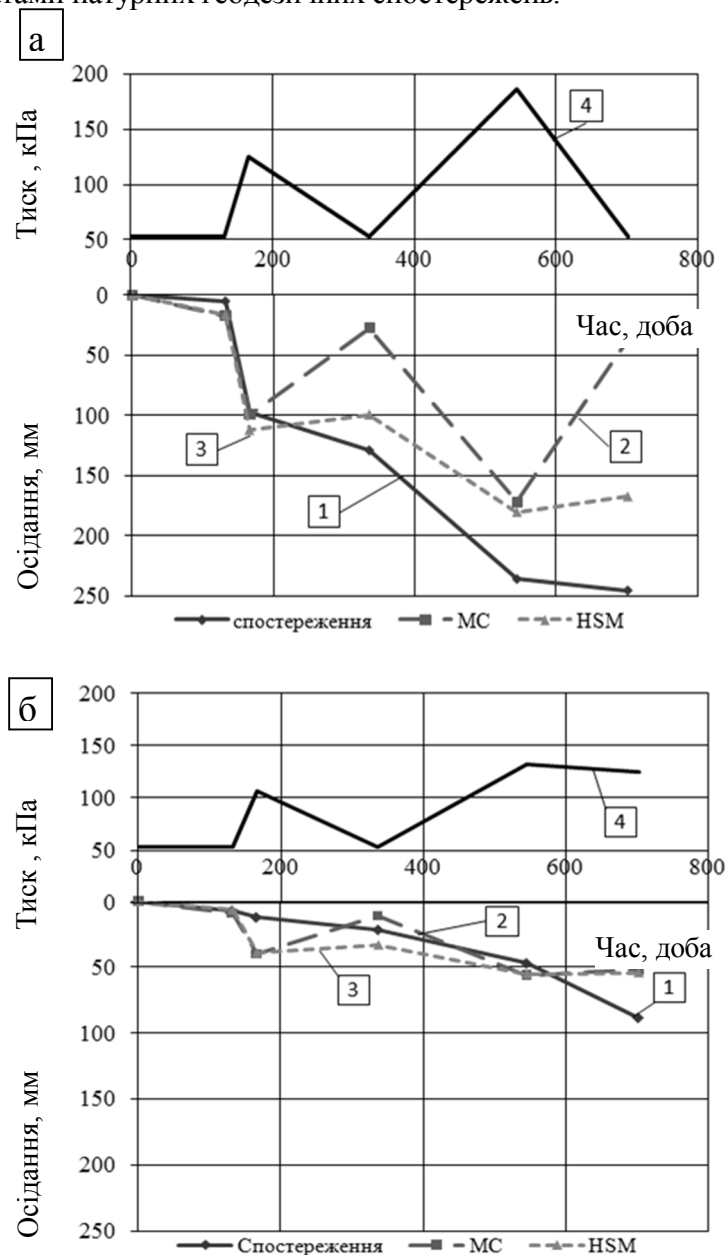


Рисунок 5 – Середні осідання силосів на природній (а) та армованій (б) основі за результатами натурних спостережень (1), моделювання за моделлю МС (2) і HSM (3) при змінному в часі тиску на основу (4)

Результати чисельних розрахунків і порівняння їх з натурними спостереженнями дають можливість зробити такі **висновки**.

Для моделювання НДС природних й армованих основ споруд при їх циклічному навантаженні доцільніше використовувати пружно-пластичну модель ізотропного зміцнення ґрунту Hardening Soil Model, ніж модель Mohr – Coulomb, оскільки вони обидві практично однаково моделюють НДС основи при первинному завантаженні, але при розвантаженні модель Mohr – Coulomb показує завищені значення відновлюваних деформацій. Це підтверджується моделюванням лоткових штампових випробувань армованих і неармованих ґрунтових основ.

Адекватність застосування Hardening Soil Model для оцінювання НДС природних й армованих основ плитних фундаментів зерносховищ силосного типу підтверджується порівнянням осідань розрахованих за нею основ з відповідними даними геодезичних спостережень. Різниця у розрахованих і вимірних значеннях осідань знаходиться в межах 20 – 30% як для армованих, так і природних основ, що спричинено недостатнім урахуванням цією моделлю реологічних параметрів.

Література

1. 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.
2. Фундаменты стальных резервуаров и деформации их оснований / [П.А. Коновалов, Р.А. Мангушев, С.Н. Сотников и др.]. – М.: Изд-во АСВ, 2009. – 336 с.
3. Улицкий, В.М. Геотехническое сопровождение развития городов (практическое пособие по проектированию зданий и подземных сооружений в условиях плотной застройки) / В.М. Улицкий, А.Г. Шашкин, К.Г. Шашкин – СПб.: Стройиздат Северо-Запад, Группа компаний «Геореконструкция», 2010. – 551 с.
4. Фадеев, А.Б. Параметры модели упрочняющегося грунта программы «PLAXIS» / А.Б. Фадеев // Численные методы расчетов в практической геотехнике: сб. статей научн.-техн. конф. – СПб.: СПбГАСУ, 2012. – С. 13 – 20.
5. Бойко, І.П. Моделювання нелінійного деформування ґрунтів основи з урахуванням структурної міцності в умовах прибудови / І.П. Бойко, В.О. Сахаров // Будівельні конструкції: міжвідомчий наук.-техн. зб. наук. праць (будівництво). – Вип. 61: в 2-х кн. Кн. 1. – К.: ДП НДІБК, 2004. – С. 27 – 32.
6. Петраков, А.А. Исследование кренов жестких плитных фундаментов / А.А. Петраков, Н.А. Петракова // Будівельні конструкції: міжвідомчий наук.-техн. зб. наукових праць (будівництво). – Вип. 75: в 2-х кн. Кн. 1. – К.: ДП НДІБК, 2011 – С. 470 – 477.
7. Марченко, В.І. Деформації основ фундаментів зерносховищ силосного типу / В.І. Марченко, П.М. Омельченко // Зб. наук. праць (галузеве машинобудування, будівництво). – Полтава: ПолтНТУ, 2010. – Вип. 3 (28) – С. 144 – 150.
8. ДБН В.2.1-10-2009. Основи та фундаменти будівель і споруд. Основні положення проектування – К.: Мінрегіонбуд України. – 2009. – 107 с.
9. ДБН В.2.2-8-98. Підприємства, будівлі і споруди по зберіганню та переробці зерна. К.: Держбуд України. – 1998. – 41 с.
10. Characteristics of manmade stiff grounds improved by drill-mixing method / M. Zotsenko, Yu. Vynnykov, I. Lartseva, V. Shokarev, V. Krysan // Proc. of the 15th European conf. on soil mechanics and geotechnical engineering. – Athens, 2011 – P. 1097 – 1102.
11. Зоценко, Н.Л. Закрепление оснований цементацией буросмесительным методом / Н.Л. Зоценко, И.И. Ларцева, В.И. Марченко // Тр. Междунар. конф. по геотехнике «Геотехнические проблемы мегаполисов». Т. 5. – М.: ПИ «Геореконструкция», 2010. – С. 1781 – 1788.
12. Марченко, В.І. Штампові випробування водонасиченої глинистої основи, армованої вертикальними ґрунтоцементними елементами, у лотку / В.І. Марченко // Збірник наукових праць (галузеве машинобудування, будівництво). – Полтава: ПолтНТУ, 2011. – Вип. 2 (30) – С. 192 – 200.
13. Bahar, R. Settlements of silos founded on compressible soils reinforced by stone columns / R. Bahar, O. Sadaoui, E. Vincens // Proc. of the Intern. geotechnical conf. «Geotechnical challenges in megacities». – Moscow, 2010. – P. 965 – 970.

Надійшла до редакції 03.10.2012

© Ю.Л. Винников, В.І. Марченко