

УДК 624.954.014.2-047.42

В. В. КАЧУРЕНКО^{1*}, Д. О. БАННИКОВ^{2*}

^{1*}Каф. «Будівельні конструкції», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (097) 532 54 46, ел. пошта valentina.kachurenko@gmail.com, ORCID 0000-0001-7383-205X

^{2*}Каф. «Будівельні конструкції», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (063) 400 43 07, ел. пошта bdo2013@yandex.ua, ORCID 0000-0002-9019-9679

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ РОЗПОДІЛУ ГОРИЗОНТАЛЬНОГО ТИСКУ НА ГОФРОВАНІ СТАЛІВІ СТІНКИ СИЛОСУ

Мета. У дослідженні потрібно зробити: 1) якісну оцінку характеру деформацій гофрованої стінки ємності при дії навантаження від сипучих матеріалів; 2) визначити схеми перерозподілу горизонтального тиску на кожну окрему пластину гофра та методи розрахунку, що ближчі до дійсної ситуації; 3) отримати кількісні показники деформацій для співставлення їх із розрахунковими, отриманими при моделюванні математичної моделі. **Методика.** Для досягнення поставленої мети були досліджені різні типи профілів ємнісних конструкцій та отримані значення вертикальних сумарних переміщень при дії навантаження. Для обчислювального експерименту був використаний проектно-обчислювальний комплекс Structure CAD для Windows. Крім того, проведено лабораторний експеримент, аналіз результатів якого важливий для підтвердження вірності попередньо виконаних комп'ютерних моделей. **Результати.** В роботі, внаслідок проведеного експерименту, було знайдено підтвердження отриманих при розрахунку методом скінченних елементів (МСЕ) даних, а саме – напрямок та характер деформацій повністю (якісно та кількісно) повторював розрахункову ситуацію в SCAD. Було виконано аналіз роботи гофрованого профіля при різних теоретично ймовірних схемах навантаження та різних методах розрахунку. Також викладені рекомендації для реального розрахунку за допомогою комп'ютерного моделювання. У процесі спільного дослідження авторів були отримані дані, що дозволяють більш точно та коректно оцінити роботу гофрованих профілів при дії тиску від сипучих матеріалів. **Наукова новизна.** Проведені дослідження та експериментальні випробування пояснюють та уточнюють способи можливого перерозподілу тиску сипучого матеріалу на кожні окремі пластини гофра, про що відсутня інформація в наявній рекомендованій літературі та нормативній базі в сфері проектування ємнісних споруд. **Практична значимість.** Застосування запропонованих рішень є корисним для коректного моделювання ємностей із гофрованими стінками при наступних розрахунках та пошуку нових напрямків подальшого дослідження.

Ключові слова: силос; ємнісна споруда; стінка силосу; гофрований профіль; експериментальне дослідження; деформації; комп'ютерне моделювання

Вступ

В Україні основна маса зерна зберігається на державних великотоннажних залізобетонних елеваторах, обладнання яких морально і фізично застаріло, через що знижується якість зерна та пропускна здатність елеваторів. Одночасно останні значно віддалені від зерновиробника, а вартість зберігання зерна в них дуже висока й складає майже 25 % вартості закладеного на зберігання зерна.

Одним із найважливіших шляхів зменшення втрат і підвищення якості продукції є очевидне забезпечення кожного господарства власним

сучасним зерносховищем. Так, в аграрно розвинених країнах до 80 % урожаю зберігається в його виробника. При цьому у світі перевагу надають баштовим сховищам. Технологія зберігання зерна в баштових сховищах, обладнаних активною вентиляцією, широко використовується у США та Канаді, а в останнє десятиріччя і в Європі [13].

Для зберігання зернових культур металеві вентилявані силоси заслужено вважаються найбільш рентабельними [10]. Збірні металеві зерносховища мають такі переваги: знижують капітальні витрати під час монтажу вдвічі-

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

втричі і трудомісткість монтажу – вчетверо-вп'ятеро; дають змогу максимально наблизити сховища до місця збирання і використання зерна; дають можливість впроваджувати повну механізацію та автоматизацію процесу зберігання [13]. Їх будівництво й обслуговування обходиться дешевше, а на процес самозігрівання, який відбувається у зерні, можна впливати за допомогою ефективних систем аерації, вентиляції та термометрії. За кордоном половина всіх зерносховищ припадає саме на металеві силоси. Їх кількість повільно, але впевнено зростає і в Україні [4].

Найбільш оптимальними з точки зору проектування та подальшої експлуатації виявилися жорсткі вертикальні ємності. Здебільшого вони складаються з двох частин: верхньої з вертикальним розташуванням стінок, призначеної для накопичення необхідного запасу сипучого матеріалу, що зберігається, і нижньої з похилими стінками, призначеної для його вивантаження самопливом [1]. Такий тип силосів реалізується у двох варіантах стінок: профільованих або гладких. Більшість силосів за кордоном виготовлені та експлуатуються з гофрованими сталевими листами стінок [16]. Для зберігання сипучого оптимальним чином найкраще підходять ємності, які мають гладкі стінки в нижніх відділах і профільовані стіни у верхніх відділах. Це сприяє зменшенню тиску в нижній частині силосу та поліпшенню потоку під час розвантаження завдяки гладкій ділянці стінки в нижньому відділі. Через те, що профільована стінка сама по собі дуже міцна, потрібно менше сталі, що підтверджує економічність цього рішення [15].

Мета

Для того, щоб спроектувати силос, інженер повинен визначити всі навантаження, які можуть діяти на нього. Ці навантаження включають в себе цілий спектр, серед яких вітрове, сейсмічне, снігове, а також навантаження на внутрішню поверхню силосу, викликане тиском сипучого матеріалу, що зберігається. Численні Єврокоди і державні стандарти [6, 7] визначають способи для розрахунку останнього навантаження [14]. Проте, регулярна повторюваність аварій та руйнувань силосних споруд

вказують на те, що існуючі методи розрахунку і проектування таких конструкцій не враховують усі особливості їх роботи [3]. І досі, однією з проблем на шляху створення надійних і економічних конструкцій такого типу є питання взаємодії сипучого матеріалу з гофрованими елементами стінки ємнісної конструкції [8]. У чинному з 2014 р. ДСТУ-Н Б EN 1991-4:2012 [6], на жаль, відсутня інформація про те, як правильно задавати горизонтальну складову тиску на профільовану стінку. В той час як, досвід експлуатації цих конструкцій демонструє необхідність удосконалення методики визначення тиску від сипучих матеріалів [2].

Для вирішення цього питання авторами неодноразово були виконані математичні моделі в програмному комплексі SCAD [11] та досліджена поведінка ємності при різних способах передачі навантаження на гофровані елементи стінки [8]. Проте отримані результати були неоднозначні за напрямком та характером деформацій і потребували уточнення.

Таким чином, виникла необхідність у постановці й виконанні більш досконалих експериментальних досліджень, які дозволять якісно визначити характер деформації гофрованої стінки при дії навантаження від сипучих матеріалів та допомогти зрозуміти, як саме горизонтальний тиск перерозподіляється на кожен окрему пластину гофра [9]. Крім того, необхідно було отримати кількісні показники деформацій для співставлення їх із розрахунковими, отриманими під час створення математичної моделі.

Методика

Дослідження в цій області здійснювались за допомогою виконання пошукового лабораторного модельного експерименту, оскільки не було можливості розглядати сам об'єкт, враховуючи його значні розміри [5]. Тому розглядалась модель досліджуваного об'єкта.

Підготовка та планування експерименту містили в собі багато задач, серед яких: попередній теоретичний аналіз і математичне моделювання передбачуваної в експерименті ситуації; вибір загальної форми експериментальної ємності та матеріалу, з якого вона має виготовлятися; точний вибір параметрів, якими мають

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

характеризуватися сипучі матеріали, що будуть використовуватись, і створена експериментальна ємнісна конструкція; визначення загальної кількості цих параметрів та їх ув'язка між собою; встановлення кількості змінних параметрів та інші. Крім того, обсяг досліджень лімітувався габаритами використовуваного приміщення (на відкритому повітрі була висока вірогідність впливу важкопрогнозованих небажаних факторів), обсягом фізичної роботи (завантаження та розвантаження ємності виконувалось в ручному режимі), кошторисною вартістю спланованих досліджень. Більш детально планування та підготовка до виконання експерименту наведена у попередній публікації авторів [9].

В остаточному дослідженні експериментальна конструкція була прийнята одноступеневою симетричною ємністю призматичного типу з трьома плоскими і однією змінною гофрованою стінками.

Як матеріал для виготовлення призматичної ємності були обрані для двох сторін та дна – листи МДФ товщиною 8 мм, для третьої сторони – скло такої ж товщини. Гофрована стінка виготовлялася з технічного паперу з товщиною листа 0,27 мм та густиною 220 г/м², що дорівнює 0,815 г/см³. Модуль пружності та коефіцієнт Пуассона згідно з дисертацією А. Х. Ягофарова [12] були прийняті 10000 МПа та 0,5 відповідно.

До основних параметрів, якими характеризувався експериментальний сипучий матеріал – просо, увійшли такі його фізико-механічні характеристики: діаметр зерна, насипна густина, питома вага, кут природного укосу, кут зовнішнього тертя та коефіцієнт тертя. Вони експериментально визначались під час виконання спеціальних додаткових досліджень та мали такі значення відповідно:

- $d_{\text{сер}} = 2,25$ мм;
- $\rho_n = 707,33$ кг/м³;
- $\gamma = 707,56$ кгс/м³;
- $\psi_{\text{сер}} = 24,8^\circ$;
- $\varphi_{\text{зовн}}^{\text{сер}} = 15^\circ$;
- $f = 0,27$.

Як варійовані конструктивні параметри були прийняті тип форми гофра та його розмір – висота та довжина хвилі.

Профіль гофра для панелі був виконаний у трьох варіантах: квадратний профіль з орієнтованою меншою пластиною до сипучого матеріалу, квадратний профіль з орієнтованою більшою пластиною до сипучого матеріалу та трикутний профіль (або зигзагоподібний), який виступав як спрощений варіант хвилястого (рис. 1). При цьому довжина хвилі, залежно від типу профілю та етапу експерименту, варіювалася від 22 до 78 мм, а висота хвилі досліджувалася в двох варіантах: 19 та 25 мм.

Для вирішення поставленої в експерименті задачі вимірювались деформації гофрованої стінки. Для цього конструкція була обладнана індикатором годинникового типу з точністю вимірів 0,01 мм для отримання значень сумарних вертикальних переміщень верхньої точки гофрованої панелі. А також на пазах, вздовж усієї гофрованої стінки, по обидві сторони прикріплювалась лінійка з ціною поділки шкали 1 мм для того, щоб фіксувати вертикальні деформації кожної окремої хвилі гофра по мірі заповнення ємності сипучим матеріалом. Засипка матеріалу виконувалась біля найбільш віддаленої стінки від гофрованої панелі для того, щоб навантаження від сипучого передавалось поступово, самопливом, без ударів.

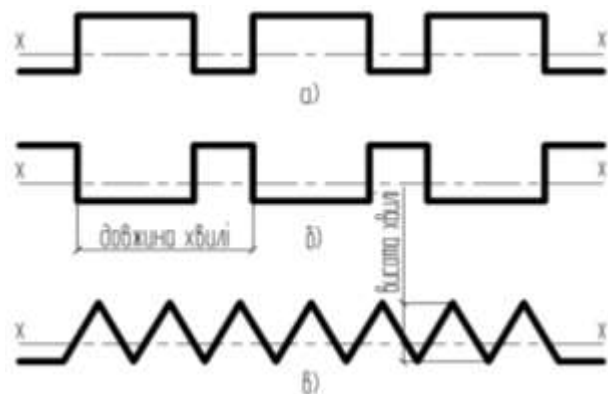


Рис. 1. Досліджувані типи профілю гофра: а – квадратний профіль з орієнтованою меншою пластиною до сипучого матеріалу; б – квадратний профіль з орієнтованою більшою пластиною до сипучого матеріалу; в – трикутний профіль

Експеримент виконувався двічі. Метою першого було якісне визначення характеру та напрямку деформацій різних типів гофра, оскі-

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

льки при попередньому математичному моделюванні експериментальної ситуації були отримані результати з різним напрямком вертикальних переміщень і вони потребували експериментального підтвердження. Завантаження ємності відбувалося для трьох вищенаведених типів гофра, розміри яких (рис. 2) підбиралися з умов пропорційності розмірів пластин до фракції сипучого матеріалу та відповідності розмірам пазів профілю.

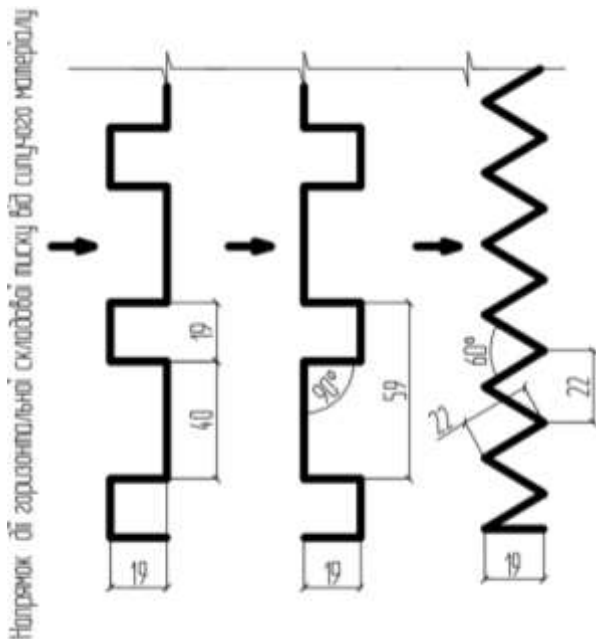


Рис. 2. Розміри окремих пластин гофра кожного типу перерізу для виготовлення гофрованої стінки ємності

Метою виконання повторного експерименту було отримання кількісних показників переміщень для уточнення схеми навантаження на кожен окрему пластину гофра, а також вибір методу розрахунку для виконання аналізу майбутніх математичних моделей в МСЕ (метод скінченних елементів).

В цьому варіанті випробовувались вже лише квадратні профілі з орієнтованими меншою та більшою пластинами до сипучого матеріалу. Теоретично під час розрахунку моделі, розглядалось 7 схем розподілу навантажень з різними варіантами розподілу тиску на кожен окрему пластину. Дані схеми та розміри для квадратного профілю з орієнтованою меншою пластиною до сипучого матеріалу зображено на рис. 3.

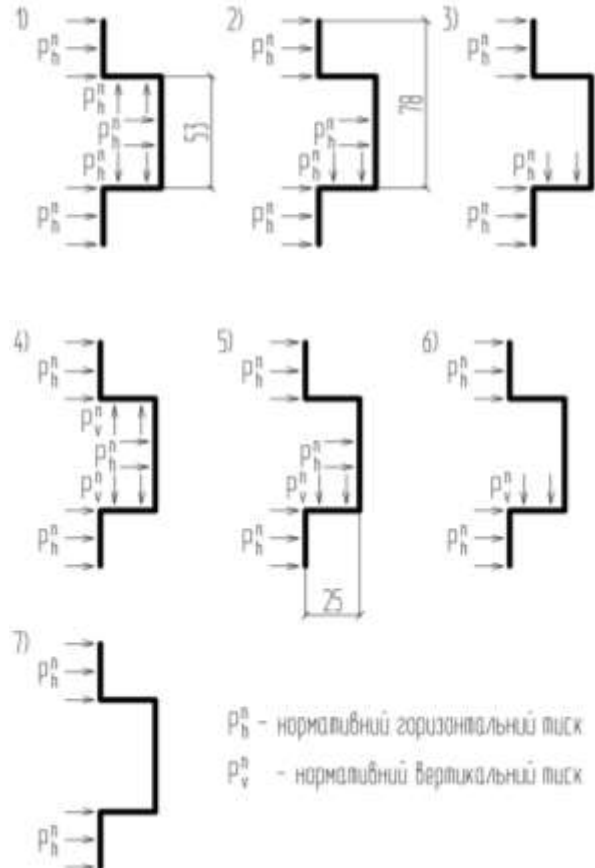


Рис. 3. Теоретично ймовірні схеми розподілу навантаження

Величини навантаження для моделювання в SCAD визначалися відповідно до ДБН [6] за теорією Янсена з урахуванням коефіцієнта місцевого підвищення тиску a_1 , прийнятого згідно з вимогами п. 4.11. Розрахунок виконувався лінійним та нелінійним методами.

Результати

Під час комп'ютерного моделювання першого експерименту за нелінійним методом розрахунку кожний тип перерізу профілів деформувалася по-різному і досить характерно. Напрямок сумарних вертикальних переміщень квадратного профілю з орієнтованою меншою пластиною до сипучого матеріалу був вниз і мав значення 4,34 мм, а квадратного профілю з орієнтованою більшою пластиною до сипучого матеріалу – вгору (співпадав з напрямком осі z в моделі

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

SCAD) на 5,79 мм. Для трикутного профілю значення вертикальних деформацій були значно меншими та становили 1,76 мм вниз, проте профіль досить суттєво деформувався з площини, чого не спостерігалось в двох попередніх варіантах.

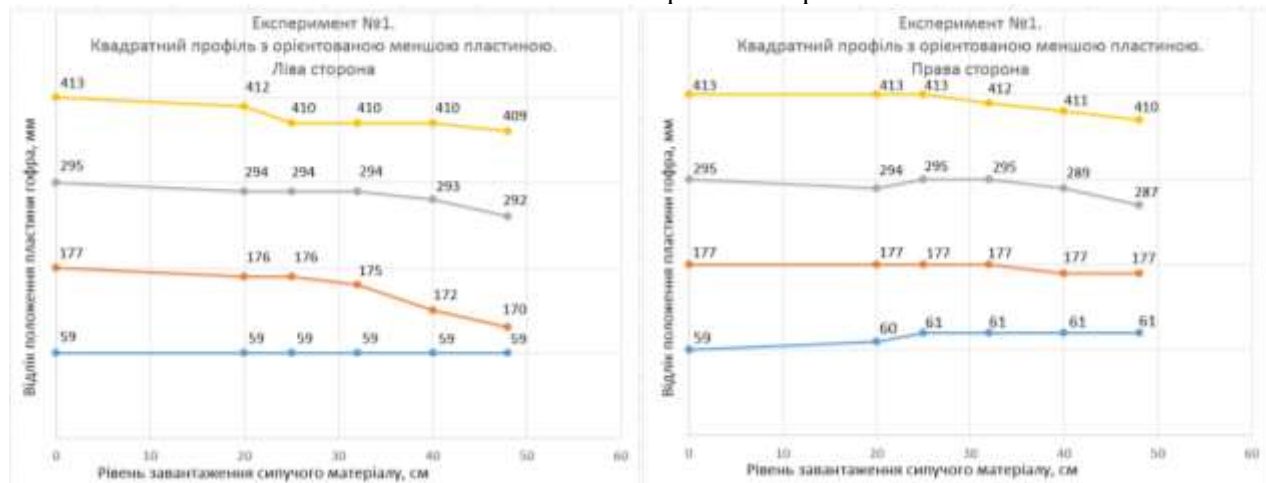
Внаслідок виконаного експерименту були підтвержені отримані під час розрахунку в МСЕ дані, а саме: якісно напрямком та характер деформацій повністю повторював розрахункову ситуацію в SCAD. Крім того, кількісні показники вертикальних деформацій верхньої відлікової точки пластини гофра для кожного типу перерізу при повному завантаженні були дуже близькими до попередньо розрахованих і відрізнялись за значенням менше ніж на 1 мм.

Фото з повним завантаженням експериментальної ємності на висоту 48 см наведено на рис. 4.



Рис. 4. Експериментальна ємність з квадратним профілем гофра орієнтованим меншою пластинною до силючого матеріалу при повному завантаженні

Для більш точного відстеження характеру деформацій відліки брались рівномірно по всій висоті гофрованої панелі для завчасно визначених контрольних точок при різних рівнях завантаження ємності. Отримані результати для кожного типу профілю у вигляді діаграм зображено на рис. 5.



ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

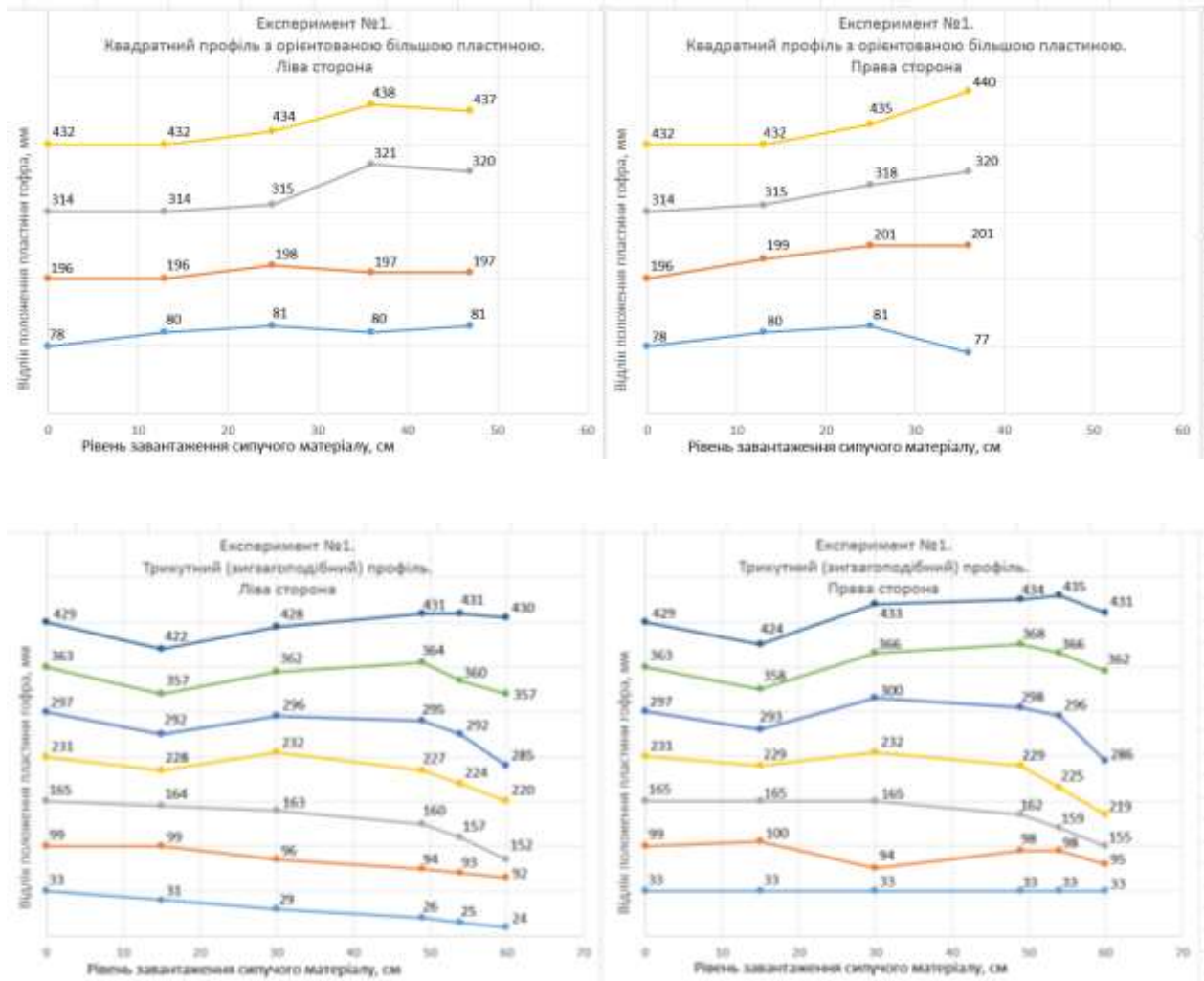


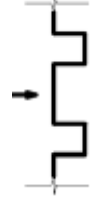
Рис. 5. Діаграми переміщень контрольних точок гофрованих панелей при завантаженні есмості силучим матеріалом

Порівняльні результати комп'ютерного розрахунку квадратних профілів в проектно-обчислювальному комплексі SCAD при різних схемах навантаження, які аналізувалися при повторному виконанні експери-

менту, наведені для повного завантаження есмості у табл. 1.

Таблиця 1

Результати розрахунку вертикальних сумарних переміщень гофрованих панелей

Тип профілю	Метод розрахунку	Значення вертикальних сумарних деформацій при відповідній схемі навантаження, мм						
		1	2	3	4	5	6	7
	Лінійний	-28,39	-187,57	-164,94	-58,53	-324,83	-302,37	+5,12
	Нелінійний	-10,74	-24,21	-22,38	-15,86	-27,93	-25,90	+1,4
	Лінійний	+39,72	-147,12	-123,04	+56,92	-346,41	-341,55	+32,47
	Нелінійний	+11,02	-20,23	-17,81	+13,58	-28,41	-28,52	+8,76

Примітка: знак деформацій свідчить про їх напрямку з врахуванням заданого напрямку осі z в SCAD: «+» – гофр деформується вверх; «-» – гофр деформується вниз


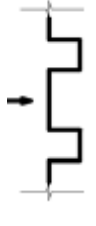
Проаналізувавши отримані значення були одразу відкинуті схеми навантажень 2, 3, 5, 6, 7, оскільки знак, який свідчить про напрямку деформацій не відповідає дійсній схемі роботи гофра, яка спостерігалася під час виконання обох експериментів.

Для вибору методу розрахунку та остаточної схеми навантаження результати залишених схем 1 та 4 потребували порівняння з кількісними показниками, отриманими внаслідок виконання повторного експерименту. Проте, якщо під час проведення першого експерименту всі типи профілів витримали повне навантаження, то для повторного – останні відліки, які вдалося зняти до руйнування гофрованих панелей, були при рівнях навантаження смостей 25 та 20 см для квадратного профілю з орієнтованими меншою та більшою пластинами до сипучого матеріалу відповідно. Такий хід перебігу експерименту пояснюється тим, що розміри довжини та висоти хвилі в останньому випадку були на 30 % збільшені, а, отже, площа матеріалу гофрованої панелі, що сприймає тиск сипучого ма-

теріалу зменшилась. Тому для порівняння кількісних показників деформацій було додатково змодельовано ситуацію завантаження на відповідний експериментальному рівень та ще раз виконані розрахунки, результати яких зведені до табл. 2.

Таблиця 2

Значення вертикальних сумарних переміщень гофрованих панелей при неповному рівні завантаження

Тип профілю	Спосіб отримання результатів	Значення вертикальних сумарних деформацій при відповідній схемі навантаження, мм	
		1	4
 $h = 25$	Лінійний розрахунок	-12,62	-26,16
	Нелінійний розрахунок	-4,78	-7,09
	Експеримент	-5,25	
 $h = 20$	Лінійний розрахунок	+8,11	+10,44
	Нелінійний розрахунок	+2,25	+2,49
	Експеримент	+2,45	

Примітка: h – рівень завантаження експериментальної ємності, см.

Слід зауважити, що майже всі руйнування панелей з квадратним профілем відбувалися внаслідок втрати місцевої стійкості окремих полиць гофра в нижній найбільш навантаженій частині панелі (друга чи третя хвиля), що зображено на рис. 6, в той час, як трикутний (зигзагоподібний) профіль втрачав стійкість хвиль практично одночасно по всій висоті (рис. 7). Виключеннями з вищенаведеної інформації були випадки, коли внаслідок початкових деформацій гофра (похибки при виготовленні, порушений кут між пластинами під власною вагою чи інші), хвилю гофра заклинювало в пазах.



Рис. 6. Руйнування панелі внаслідок втрати місцевої стійкості нижніх пластин другого та третього гофрів знизу



Рис. 7. Руйнування панелі внаслідок втрати місцевої стійкості пластин гофрів по всій висоті

Наукова новизна та практична значимість

Оскільки в наявній рекомендаційній літературі та нормативній базі в сфері проектування ємнісних споруд відсутня інформація щодо особливостей моделювання тиску сипучого матеріалу на гофровані сталеві елементи, то виконані дослідження та експериментальні випробовування пояснюють та уточнюють способи можливого перерозподілу тиску сипучого матеріалу на кожні окремі пластини гофра, що є корисним для коректного моделювання ємностей з такими стінками при подальших розрахунках та пошуку нових напрямків подальшого дослідження.

Висновки

Враховуючи все вищевикладене, можна зробити такі висновки:

1. В результаті експериментального дослідження було якісно визначено характер деформації гофрованих стінок при дії навантаження від сипучих матеріалів та отримано кількісні показники вертикальних сумарних переміщень для трьох типів перерізу гофра зі змінними вихідними параметрами.

2. Експериментальні дані підтвердили правильність аналізу раніше виконаних математичних моделей, крім того, кількісно отримані результати математичного моделювання та лабораторного експерименту мають досить близькі значення.

3. Також можна стверджувати, що у випадку, коли діаметр сипучого матеріалу більше ніж у десять разів менший за розмір найменшої пластини гофра, тоді схема навантаження є максимально близькою до гідростатичної.

4. Для подальшого математичного моделювання ємнісних споруд рекомендується застосовувати нелінійний метод розрахунку та користуватись запропонованими 1 та 4 схемами навантажень, обираючи для реального розрахунку гірший варіант.

5. Отримані в експерименті результати свідчать про перспективність подальшого розвитку науково-дослідних робіт для відкриття нових напрямків досліджень.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- Банніков, Д. О. Експериментальні дослідження статичної поведінки сипучого середовища в ємнісній конструкції // Д. О. Банніков // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізнич. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2009. – Вип. 26. – С. 103–111.
- Бібік, М. В. Визначення горизонтального навантаження на вертикальні стіни ємнісних конструкцій за різними нормами / М. В. Бібік, П. С. Мороз // Зб. наук. пр. Серія: Галузеве машинобуд., буд-во / Полтав. нац. техн. ун-т. – Полтава, 2014. – Вип. 1 (40). – С. 166–174.
- Грицак, І. В «моді» металеві силоси [Електронний ресурс] / І. Грицак // Аграрний тиждень. Україна. – 2014. – № 42 (254). – Режим доступу: <http://a7d.com.ua/9655-v-mod-metalev-silos.html>. – Назва з екрана. – Перевірено : 05.07.2016.
- Грищук, Ю. С. Основы научных исследований : учеб. пособие / Ю. С. Грищук. – Харьков : НТУ «ХПИ», 2011. – 196 с.
- ДБН В.2.2-8-98. Підприємства, будівлі і споруди по зберіганню та переробці зерна. – На заміну СНиП 2.10.05-85. – Введ. 1998-01-07. – Київ : Держбуд України, 1998. – 39 с.
- ДСТУ-Н Б EN 1991-4:2012. Єврокод 1. Дії на конструкції. Частина 4. Бункери і резервуари. – Введ. 2014-01-07. – Київ : Мінрегіонбуд України, 2012. – 150 с.
- Качуренко, В. В. Конструктивные решения стальных емкостей для сыпучих материалов : монография / В. В. Качуренко, Д. О. Банников. – Днепропетровск : Новая идеология, 2016. – 168 с.
- Качуренко, В. В. Планування та проведення досліджень з експериментального вивчення дії сипучих матеріалів на гофровані стінки ємнісних конструкцій / В. В. Качуренко, Д. О. Банніков // Вісн. Одес. держ. акад. буд-ва та архіт. – Одеса, 2016. – Вип. 61. – С. 154–162.
- Класифікація аварій та пошкоджень сталевих силосів / М. В. Бібік, В. М. Бібік, Р. М. Ульченко, І. О. Бібік // Зб. наук. пр. Серія: Галузеве машинобуд., буд-во / Полтав. нац. техн. ун-т. – Полтава, 2014. – Вип. 1 (40). – С. 175–183.
- Корінь, Л. Все, що ви не знали про силос [Електронний ресурс] / Л. Корінь // Агробізнес України. – 2011. – № 4 (203). – Режим доступу: <http://www.agro-business.com.ua/mekhanizatsiia-apk/273-vse-scho-vy-ne-znaly-pro-sylos.html>. – Назва з екрана. – Перевірено : 05.07.2016.
- SCAD Office. Вычислительный комплекс SCAD / В. С. Карпиловский, Э. З. Криксунов [и др.]. – Москва : СКАД СОФТ, 2011. – 656 с.
- Ягофаров, А. Х. Совершенствование конструкции, уточнение расчета и оптимальные параметры стального круглого бункера : дис. ... канд. техн. наук : 05.23.01 / Ягофаров Анвар Хабидович ; Урал. гос. ун-т путей сообщ. – Екатеринбург, 2005. – 146 с.

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

13. Ящук, Н. О. Сучасні сховища для зерна, або як зекономити на елеваторних затратах [Електронний ресурс] / Н. О. Ящук // Пропозиція. – 2016. – № 6. – Режим доступу: <http://propozitsiya.com/?page=146&itemid=3407>. – Назва з екрана. – Переверено : 05.07.2016.
14. Carson, J. Silo design codes: Their limits and inconsistencies / J. Carson, D. Craig // *Process Engineering*. – 2015. – Vol. 102. – P. 647–656. doi:10.1016/j.proeng.2015.01.157.
15. Nemeth, C. Silo with a Corrugated Sheet Wall / C. Nemeth, J. Brodniansky // *Slovak J. of Civil Engineering*. – 2013. – Vol. 21. – Iss. 3. – P. 19–30. doi: 10.2478/sjce-2013-0013.
16. Viljoen, J. Select grain stores carefully to control costs / J. Viljoen // *Farming Ahead*. – 2001. – Iss. 119. – P. 44–45.

В. В. КАЧУРЕНКО^{1*}, Д. О. БАННИКОВ^{2*}

^{1*}Каф. «Строительные конструкции», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепро, Украина, 49010, тел. +38 (097) 532 54 46, эл. почта valentina.kachurenko@gmail.com, ORCID 0000-0001-7383-205X

^{2*}Каф. «Строительные конструкции», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепро, Украина, 49010, тел. +38 (063) 400 43 07, эл. почта bdo2013@yandex.ua, ORCID 0000-0002-9019-9679

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ГОРИЗОНТАЛЬНОГО ДАВЛЕНИЯ НА ГОФРИРОВАННЫЕ СТАЛЬНЫЕ СТЕНКИ СИЛОСА

Цель. В исследовании необходимо сделать: 1) качественную оценку характера деформаций гофрированной стенки емкости при воздействии нагрузки от сыпучих материалов; 2) определить схемы перераспределения горизонтального давления на каждую отдельную пластину гофра и методы расчета, что ближе к действительной ситуации; 3) получить количественные показатели деформаций для сопоставления их с расчетными, полученными при моделировании математической модели. **Методика.** Для достижения поставленной цели были исследованы различные типы профилей емкостных конструкций и получены значения вертикальных суммарных перемещений при воздействии нагрузки. Для вычислительного эксперимента был использован проектно-вычислительный комплекс Structure CAD для Windows. Кроме того, проведено лабораторный эксперимент, анализ результатов которого важен для подтверждения верности предварительно выполненных компьютерных моделей. **Результаты.** В работе, в результате проведенного эксперимента, было найдено подтверждение полученных при расчете методом конечных элементов (МКЭ) данных, а именно – направление и характер деформаций полностью (качественно и количественно) повторял расчетную ситуацию в SCAD. Был выполнен анализ работы гофрированного профиля при различных теоретически возможных схемах нагрузки и различных методах расчета. Также изложены рекомендации для реального расчета с помощью компьютерного моделирования. В процессе совместного исследования авторов были получены данные, позволяющие более точно и корректно оценить работу гофрированных профилей при воздействии давления от сыпучих материалов. **Научная новизна.** Проведенные исследования и экспериментальные испытания объясняют и уточняют способы возможного перераспределения давления сыпучего материала на каждые отдельные пластины гофра, про что отсутствует информация в имеющейся рекомендованной литературе и нормативной базе в области проектирования емкостных сооружений. **Практическая значимость.** Применение предложенных решений является полезным для корректного моделирования емкостей с гофрированными стенками при последующих расчетах и поиска новых направлений дальнейшего исследования.

Ключевые слова: силос; емкостное сооружение; стенка силоса; гофрированный профиль; экспериментальное исследование; деформации; компьютерное моделирование

V. V. KACHURENKO^{1*}, D. O. BANNIKOV^{2*}

^{1*}Dep. «Building Structures», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St. 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (097) 532 54 46, e-mail valentina.kachurenko@gmail.com, ORCID 0000-0001-7383-205X

^{2*}Dep. «Building Structures», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St. 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (063) 400 43 07 e-mail bdo2013@yandex.ua, ORCID 0000-0002-9019-9679

EXPERIMENTAL STUDY OF HORIZONTAL PRESSURE DISTRIBUTION ON CORRUGATED STEEL SILO WALLS

Purpose. The paper aims: 1) qualitative assessment of the nature of the container corrugated wall deformation caused by the load from bulk materials. 2) determination of the horizontal pressure redistribution scheme for each individual corrugation plate and the calculation method that is closer to the real situation. 3) obtaining the quantitative deformation indicators to compare them with the calculated ones produced by means of mathematical model simulation. **Methodology.** To achieve this purpose the different types of capacitive structure profiles were investigated and the values of total vertical displacement under load were obtained. The computational experiment used the design computer system Structure CAD for Windows. In addition, the laboratory experiment was conducted, the analysis of which is important to confirm the correctness of pre-made computer models. **Findings.** The conducted experiment allowed receiving the confirmation of the FEM calculated data, namely qualitatively and quantitatively the deformation direction and nature completely repeated the design situation in SCAD. The work of corrugated profile was analysed for different theoretically possible load schemes and different calculation methods. Also the work contains the recommendations for the real calculation using computer simulation. During a joint study the authors obtained the data that allow for more accurate assessment of the corrugated profile performance under the pressure from bulk materials. **Originality.** The conducted research and experimental tests explain and clarify the ways for possible redistribution of bulk material pressure on each corrugation plate, while there is no such information in the existing recommendation literature and regulatory framework concerning the capacitive structure design. **Practical value.** The use of the proposed solutions is useful for correct design of containers with corrugated walls during further calculations and search of new directions for future research.

Keywords: silo; capacitive structure; silo wall; corrugated profile; experimental studies; deformations; computer simulation

REFERENCES

1. Bannikov D.O. Eksperymentalni doslidzhennia statychnoi povedinky sypuchoho seredovyscha v yemnisnii konstruktsii [Experimental studies of static behavior of granular media in the capacitive structures]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan], 2009, issue 26, pp. 103-111.
2. Bibik M.V., Moroz P.S. Vyznachennia horizontalnoho navantazhennia na vertykalni stiny yemnisnykh konstruktsii za riznymi normamy [Determination of the horizontal load on vertical walls of capacitive structures upon different standards]. *Zbirnyk naukovykh prats. Seriya: haluzeve mashynobuduvannia, budivnytstvo* [Proc. Series: Industrial Engineering, Construction], 2014, issue 1 (40), pp. 166-174.
3. Hrytsak I. V «modi» metalevi sylosy (Metal silos are «In fashion»). *Ahrarnyi tyzhden. Ukraina – Agricultural week. Ukraine*, 2014, no. 42 (254). Available at: <http://a7d.com.ua/9655-v-mod-metalev-silos.html> (Accessed 05 July 2016).
4. Grishchuk Yu.S. *Osnovy nauchnykh issledovaniy* [Research writing and style]. Kharkov, NTU «KhPI» Publ., 2011. 196 p.
5. *DBN V.2.2-8-98. Pidpriemstva, budivli i sporudy po zberihanniu ta pererobtsi zerna* [Enterprises, buildings and structures for storage and processing of grain]. Kyiv, Derzhbud Ukrainy Publ., 1998. 39 p.
6. *DSTU-N B EN 1991-4:2012. Yevrokod 1. Dii na konstruktsii. Chastyna 4. Bunkery i rezervuary* [ISO-H B EN 1991-4: 2012. Eurocode 1. Actions on structures. Part 4: Silos and tanks]. Kyiv, Minrehionbud Ukrainy Publ., 2012. 150 p.

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

7. Kachurenko V.V., Bannikov D.O. *Konstruktivnyye resheniya stalnykh emkostey dlya sypuchykh materialov* [Constructive solutions steel tanks for bulk materials]. Dnepropetrovsk, Novaya ideologiya Publ., 2016. 168 p.
8. Kachurenko V.V., Bannikov D.O. Planuvannya ta provedennia doslidzhen z eksperymentalnoho vyvchenia dii sypuchykh materialiv na hofrovani stinky yemnisnykh konstrukttsii [Planning and conducting research on the experimental study of bulk materials action on the corrugated walls in capacitive structures]. *Visnyk Odeskoi derzhavnoi akademii budivnytstva ta arkhitektury* [Bulletin of Odesa State Academy of Construction and Architecture], 2016, issue 61, pp. 154-162.
9. Bibik M.V., Bibik V.M., Ulchenko R.M., Bibik I.O. Klasyfikatsiia avarii ta poshkodzhen stalevykh sylosiv [Classification of accidents and damages of steel silo]. *Zbirnyk naukovyz prats. Seriia: haluzeve mashynobuduvannya, budivnytstvo* [Proc. Series: Industrial Engineering, Construction], 2014, issue 1 (40), pp. 175-183.
10. Korin L. *Vse, shcho vy ne znaly pro sylos* (Everything you have not known about silo). *Ahrobiznes Ukrainy – Agribusiness in Ukraine*, 2011, no. 4 (203). Available at: <http://www.agro-business.com.ua/mekhanizatsiia-apk/273-vse-scho-vy-ne-znaly-pro-sylos.html> (Accessed 05 July 2016).
11. Karpilovskiy V.S., Kriksunov E. Z., Malyarenko A.A., Perelmutter A.V., Perelmutter M.A. *SCAD Office. Vychislitelnyy kompleks SCAD* [The computing complex SCAD]. Moscow, SKAD SOFT Publ., 2011. 656 p.
12. Yagofarov A.Kh. *Sovershenstvovaniye konstrukttsii, utochneniye rascheta i optimalnyye parametry stalnogo kruglogo bunkera*. Kand. Diss. [Improving the design, specification and calculation of optimal parameters of steel round hopper. Cand. Diss.]. Yekaterinburg, 2005. 146 p.
13. Yashchuk N.O. Suchasni skhovyshcha dlia zerna, abo yak zekonomyty na elevatorynykh zatratakh (Modern storage for grain, or how to save on elevator expenses). *Propozytsiia – The Offer*, 2016, no. 6. Available at: <http://propozitsiya.com/?page=146&itemid=3407> (Accessed: 05 July 2016).
14. Carson J., Craiga D. Silo design codes: Their limits and inconsistencies. *Procedia Engineering*, 2015, vol. 102, pp. 647-656. doi:10.1016/j.proeng.2015.01.157.
15. Nemeth C., Brodniansky J. Silo with a Corrugated Sheet Wall. *Slovak Journal of Civil Engineering*, 2013, Vol. 21, issue 3, pp. 19-30. doi: 10.2478/sjce-2013-0013.
16. Viljoen J. Select grain stores carefully to control costs. *Farming Ahead*, 2001, issue 119, pp. 44-45

Стаття рекомендована до публікації д.т.н., проф. В. В. Кулябком (Україна); к.т.н., ст. наук. співроб. С. А. Кострицею (Україна)

Надійшла до редколегії: 23.03.2016

Прийнята до друку: 17.06.2016