

## **ПЛАНУВАННЯ ТА ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ З ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ВИВЧЕННЯ ДІЇ СИПУЧИХ МАТЕРІАЛІВ НА ГОФРОВАНІ СТІНКИ ЄМНІСНИХ КОНСТРУКЦІЙ**

**Качуренко В.В., асист., Банніков Д.О., д.т.н., проф.**  
*Дніпропетровський національний університет залізничного  
транспорту імені академіка В. Лазаряна*

Ємнісні конструкції до нинішнього часу одержали досить широке розповсюдження і використовуються практично у всіх галузях промисловості і сільського господарства. Це обумовлено їх надзвичайно широкою функціональною різноманітністю. Вони призначені для роботи як з твердими матеріалами, сипучими матеріалами, так і різного роду рідкими і газоподібними речовинами.

У технологічному плані всі ємнісні конструкції виконують досить схожу функцію – зберігання протягом певного часу певної кількості одного з наведених вище видів речовин. Як правило, речовина, що зберігається застосовується в якомусь технологічному процесі і при цьому виникає необхідність компенсувати розрив у часі між його надходженням і використанням. Тому ємнісні конструкції є тією ланкою-посередником, в якому речовина, що застосовується в технологічному процесі може накопичуватися і зберігатися певний час, до моменту його потреби [1].

Сипучі матеріали є одним з найбільш часто використовуваних видів матеріалів. Їх сучасна номенклатура нараховує понад 1000 активно і повсякденно застосовуваних видів, починаючи від досить розповсюджених, таких як пісок або щебінь, і закінчуючи специфічними пилоподібними матеріалами, застосовуваними, наприклад, в порошковій металургії.

Відповідно, для сипучих матеріалів використовуються і свої специфічні види будівельних конструкцій, що відрізняються від інших видів ємностей, застосовуваних для рідких або газоподібних матеріалів. У відповідності до чинного в Україні нормативного документу, який регламентує основні особливості, пов'язані з проектуванням подібних споруд [2], всі ємнісні конструкції, призначені для роботи з сипучими матеріалами, діляться на 2 види – бункера і силоси.

У конструктивному відношенні вони практично ідентичні, і в "класичному виконанні" складаються з двох частин – верхньої вертикальної, призначеної для накопичення закладеного матеріалу, і нижньої похилої, призначеної для його вивантаження з ємності. Основним кі-

лькісним критерієм відмінності між бункером і силосом є висота вертикальної частини – силоси проєктують з більш розвинутою вертикальною частиною, а в бункерах вона значно менше. Тому саме силоси є такими популярними для зберігання великої кількості зернових матеріалів у сільському господарстві.

На сьогоднішній день особливе місце в практичній діяльності займають проєкти з будівництва металевих силосів. Розвиток фермерських господарств призвів до виникнення гострої потреби в елеваторах із силосами найрізноманітнішої місткості. Залізобетонні елеватори не можуть задовольнити потреби в зберіганні врожаю та конкурувати зі швидкістю та вартістю зведення сталевих силосів.

З поміж інших конструктивних рішень активно освоюються металеві силосні зерносховища із гофрованими стінками, оскільки вони мають більш високу міцність і жорсткість при поперечному вигині, ніж конструкції з плоскими панелями [3].

Однією з найважливіших проблем на шляху створення надійних і економічних конструкцій такого типу є проблема вивчення взаємодії сипучого матеріалу з гофрованими елементами стінки ємнісної конструкції [4]. В першу чергу, така взаємодія проявляється у вигляді тиску, що чиниться сипучим матеріалом на стінки ємності в процесі його зберігання.

У зв'язку з цим проводилися і продовжують проводитися численні аналітичні дослідження і створюватися різного роду теоретичні моделі [5, 6], що описують якісно або кількісно поведінку сипучого матеріалу в замкнутих об'ємах. Крім того, був проведений ряд експериментальних досліджень [7, 8], однак, всі вони сконцентровані на вивченні роботи ємностей із плоскою, а не з гофрованою стінкою вертикальної частини. У введеному в дію ДСТУ-Н Б EN 1991-4:2012 [9] згадується про відмінності розрахунку навантаження для силосу з плоскою та гофрованою стінкою, але мова там іде лише про коефіцієнт тертя для вертикальної складової тиску, а про те, як правильно задавати горизонтальну складову тиску на профільовану стінку не згадується.

Для вирішення цього питання авторами неодноразово були виконані математичні моделі в програмному комплексі SCAD [10] та досліджена поведінка ємності при різних способах передачі навантаження на гофровані елементи стінки [4, 11]. Проте отримані результати були неоднозначні за напрямком та характером деформацій і потребували уточнення.

Таким чином, виникла необхідність у постановці й проведенні більш досконалих експериментальних досліджень. Вони повинні дозволити якісно визначити характер деформації гофрованої стінки при

дії навантаження від сипучих матеріалів та допомогти зрозуміти як саме горизонтальний тиск перерозподіляється на кожную окрему пластину гофра.

Саме з таких позицій авторами були сплановані та підготовлені власні експериментальні дослідження. Подання особливостей їх організації та проведення є метою цієї публікації.

Оскільки експериментальні дослідження було вирішено проводити в приміщенні для виключення можливого несприятливого впливу погодних факторів (вологість, температура і ін.) на властивості матеріалів, то його габарити визначили весь характер досліджень. Іншим обмежуючим чинником була вартість проведених робіт.

Основне завдання планованих експериментальних досліджень полягає у визначенні характеру та напрямку деформацій гофра у процесі завантаження сипучих матеріалів та отриманні кількісних показників деформацій для співставлення їх із розрахунковими, отриманими при моделюванні математичної моделі.

Для вирішення поставленої задачі довелося виконати ретельний попередній теоретичний аналіз і моделювання передбачуваної в експерименті ситуації. Це було необхідно для вірного і, можливо, більш точного вибору тих параметрів, якими повинні будуть характеризуватися сипучі матеріали, що будуть використовуватись, і створена експериментальна ємнісна конструкція. При цьому використовувалося комп'ютерне моделювання із застосуванням методу скінченних елементів на основі проектно-обчислювального комплексу SCAD for Windows.

Загальна кількість параметрів, що відбиралися таким чином перевищила 15. У їх число увійшли як конструктивні розміри і форма ємності (матеріал, товщина гофрованої стінки, кількість хвиль гофра, розмір і форма кожного гофра, спосіб кріплення гофрованого елемента до основної конструкції моделі), так і фізико-механічні характеристики сипучого матеріалу (розмір і форма зерна, щільність, питома вага і т. д.).

Основна складність при встановленні можливих діапазонів зміни кожного з параметрів полягала в необхідності правильно відтворити ті ефекти, які були необхідні для проведення вимірювань – відповідність розмірів ємності фракційному складу сипучого матеріалу, проведення вимірювань без руйнування конструкції для можливості їх багаторазового повторення, необхідність отримання результатів на якомога більшій комбінації змінних параметрів.

Беручи до уваги технологічну складність виготовлення сталевий гофрованої стінки зі зменшеними товщиною та пропорціями гофра відносно

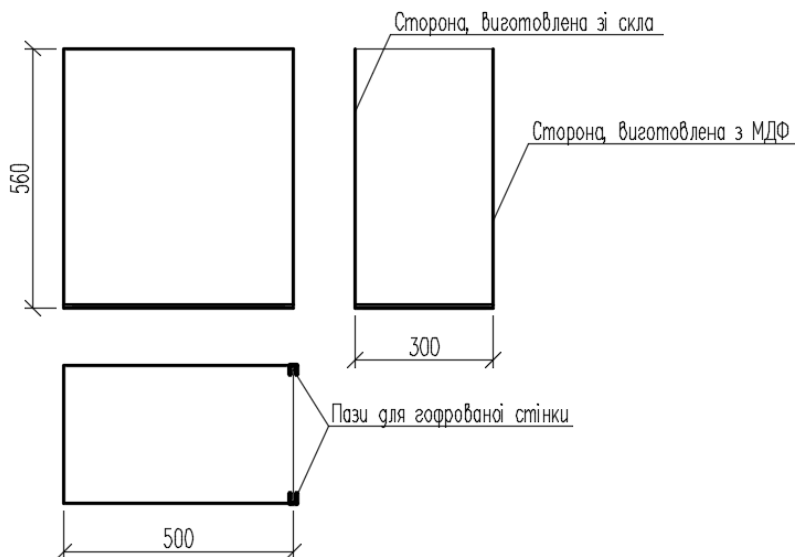
його реальних розмірів (необхідність використання листа сталі товщиною 0,2 - 0,3 мм) було прийняте рішення моделювати гофровану стінку із технічного паперу.

Після цього постало питання щодо загальної форми експериментальної ємності, адже виготовлення вертикальної циліндричної частини зі зменшеними пропорціями гофра із паперу товщиною 0,29 мм та густиною 220 г/м<sup>2</sup> виявилось ускладненим. Тому в результаті багаторазового моделювання в SCAD пробних варіантів остаточно було вирішено моделювати плоску гофровану панель, яка повинна бути встановлена замість однієї із стінок призматичної ємності.

В результаті в якості експериментальної конструкції була прийнята одноступенева симетрична ємність призматичного типу з трьома плоскими і однією змінною гофрованою стінками.

Як обґрунтування такого рішення були покладені наступні міркування. Виготовлення плоскої гофрованої панелі без радіального вигину не є ускладненим. Плоска форма стінки на противагу, наприклад, круглій формі була прийнята з метою підвищення точності виготовлення конструкції. Змінна стінка дозволяє провести експеримент багаторазово із різними вихідними умовами (змінюючи розмір і форму гофра). Розвантаження ємності полегшується, враховуючи можливість розбору однієї сторони.

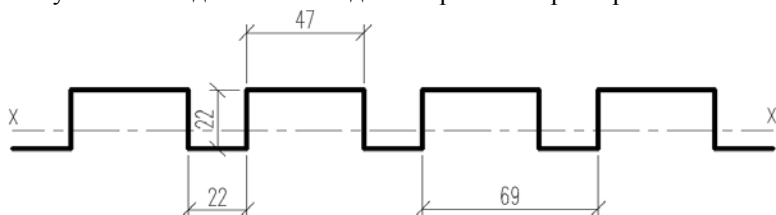
Виходячи з можливостей розташування конструкції у випробувальному приміщенні, забезпечення прийнятного об'єму матеріалу, що в неї завантажуватиметься, а також необхідності відтворити дійсний характер розподілу тиску сипучого матеріалу на гофрований елемент остаточно були прийняті наступні конструктивні розміри ємності, представлені на рис. 1. В якості варійованих конструктивних параметрів були прийняті товщина гофрованої стінки ємності, її густина, а також розмір та форма гофра.



*Рис. 1. Проекційне зображення майбутньої конструкції ємності*

Як матеріал для виготовлення призматичної ємності були обрані для двох сторін та дна – листи МДФ, для третьої сторони – скло. Гофровану стінку виготовлено у двох варіантах: технічний папір із товщиною листа 0,29 мм і 0,24 мм та густиною 220 г/м<sup>2</sup> і 180 г/м<sup>2</sup> відповідно.

Перший пробний варіант розмірів гофра, що зображено на рис. 2 визначався з врахуванням результатів розрахунку на математичній моделі та призначався таким, щоб деформації переміщення були досить суттєвими і однозначно свідчили про свій характер.



*Рис. 2. Розміри окремих пластин гофра для виготовлення гофрованої стінки ємності*

Беручи до уваги істотну кореляцію між властивостями сипучого матеріалу і геометричними параметрами конструкції в якості основної вимоги до підбору сипучих виступів розмір фракції. Він повинен був

моделювати максимально наближені до реальних умови тиску на гофр. З поміж інших, до них пред'являлася вимога дуже близької до нуля вологості сипучого матеріалу.

Всупереч сформованій традиції форму зерен сипучого матеріалу було вирішено прийняти довільною. Її врахування дозволяють виконати сучасні теоретичні моделі [5, 6], правда, в дещо непрямому вигляді. Таке припущення відразу ж розширило коло тих матеріалів, які можливо було використовувати в експерименті. При цьому відпала необхідність в роботі зі штучними матеріалами, як, наприклад, сталевий дріб (улюблений матеріал експериментаторів минулого століття), а з'явилася можливість використовувати реальні сипучі матеріали, що підвищує практичну цінність досліджень.

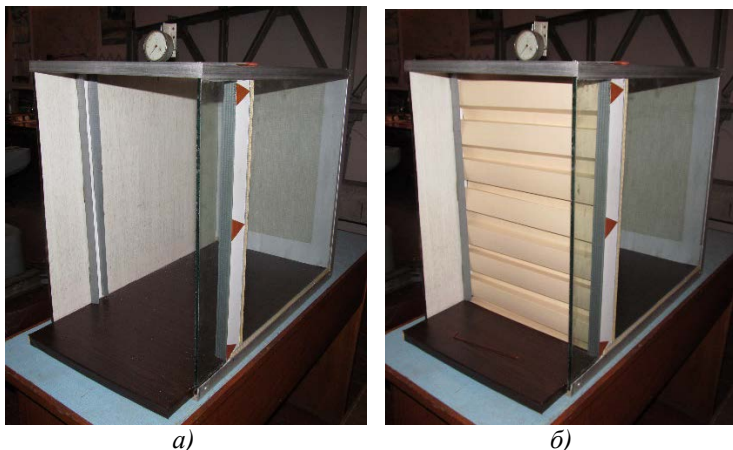
Відносно фракційного складу сипучого матеріалу вимоги також були знижені до можливості варіації розмірів його зерен в певному діапазоні, всупереч прагненню в минулому використовувати матеріали із суворо однаковими зернами. Однак, використовувані діапазони вже не могли бути обрані довільно, а повинні були бути взаємопов'язані з передбачуваними розмірами конструкції.

В результаті довготривалого пошуку вибір був зупинений на двох основних матеріалах: гран-шлаку з крупністю зерен 1-2,5 мм та крупнозернистому піску з значущістю зерен 0,5-1 мм. Матеріали були попередньо висушені і очищені від сміття та бруду. Пісок додатково просівають. Крім того, використання різних видів сипучих матеріалів виявляється кращим для можливості більш широкого аналізу результатів, ніж одного.

Решта фізико-механічних характеристик сипучих матеріалів (кути зовнішнього і внутрішнього фенія, кут укладання і т. п.) не мали визначального впливу на характер побудови експериментальних досліджень. Їх передбачалося визначати на попередньому етапі досліджень з тим, щоб, закладаючи отримані значення в різні теоретичні моделі, мати можливість зіставити їх результати з отриманими експериментальними даними.

Для вирішення поставленої в експерименті задачі вимірювались деформації гофрованої стінки. Для цього конструкція була обладнана індикатором годинникового типу з точністю вимірів 0,01 мм.

На рис. 3 а), б) наведені фотографії виготовленої експериментальної ємності без і з гофрованою стінкою відповідно.



*Рис. 1. Загальний вигляд експериментальної ємності:  
а) без гофрованої стінки; б) з наявною гофрованою стінкою в пазах*

Зауважимо, також, що виконана ємнісна конструкція розглядалася авторами не як масштабна модель реальної ємності, а як невеликого розміру реальна ємність. Відповідно, і її параметри, а також параметри сипучих матеріалів вибиралися не з умов масштабування. Тому в ході проведених експериментальних досліджень питання про подібність та залучення математичного апарату теорії подібності не ставилося. На думку авторів, такий підхід є цілком правомірним і сприяє підвищенню достовірності одержуваних результатів.

Наступним ключовим питанням, пов'язаним з безпосереднім проведенням експериментальних досліджень, було питання про складання плану досліджень. Його розробка велася з урахуванням наявних теоретичних напрацювань з даного питання [12].

Окремим питанням було встановлення необхідної кількості кожного з дослідів, що проводилися. Згідно з роботою [13] для гарантованого досягнення необхідної точності вимірювань їх мінімальна кількість має становити 5 вимірювань, а для виходу на 5% рівня надійності – 7 вимірів. Проте, в цьому, як і в більшості інших подібних експериментальних досліджень щодо будівельних конструкцій, здійснити таку їх кількість технічно складно, економічно невиправдано і вимагає значних тимчасових і трудових витрат. Тому автори користувалися досить поширеним емпіричним прийомом, коли кількість вимірювань підбиралася на основі концепції, так званого, послідовного експерименту. При цьому нові виміри продовжують проводитися тільки до отриман-

ня стійких результатів. Однак, як мінімально необхідна кількість випробувань у всіх випадках було прийнято 3 випробування.

З урахуванням поставлених експериментальних завдань була прийнята наступна поетапна схема проведення досліджень.

#### **Етап I. Підготовчий.**

Виконується сушка, очищення від сміття та просів матеріалів, а також визначаються фактичні фізико-механічні характеристики вибраних сипучих матеріалів.

Виконується збірка експериментальної моделі.

Виготовляється гофрована стінка у двох варіантах.

Виконується тарування приладів.

#### **Етап II. Робота з ємністю.**

Послідовне завантаження двома сипучими матеріалами, для кожного з яких проводяться по три серії випробувань.

Експеримент виконується для обох типів гофрованої стінки.

Показання вимірювальних приладів знімаються при рівнях завантаження 25%, 50%, 75% і 100% обсягу ємності.

#### **Етап III. Аналіз результатів та корегування вихідних параметрів.**

Співставлення отриманих експериментальних досліджень з теоретичними результатами, отриманими при моделюванні у SCAD.

За необхідності зміна деяких початкових параметрів гофра та повторне проведення експерименту.

Обробка та оцінка результатів.

Підсумовуючи все вищевикладене щодо підготовлених експериментальних досліджень по вивченню дії сипучих матеріалів на гофровані стінки ємнісних конструкцій, авторам представляється можливим констатувати, що дане дослідження є комплексним і дозволяє отримати нові результати для відкриття нових напрямків подальшої роботи.

Сподіваємося, що виконані експериментальні дослідження виявляться корисними як з практичної, так і з теоретичної точок зору.

### **SUMMARY**

This publication contains materials in preparation for an experiment on prismatic design with capacitive one corrugated web, which should help in developing a true simulation of horizontal pressure loose material on each slab corrugation.

### **ЛІТЕРАТУРА**

1. Банников, Д.О. Сопоставительный анализ конструктивных схем стальных бункерных емкостей [Текст] / Д. О. Банников, М. И. Казакевич // Металеві конструкції. – 2007. – № 3 (Т. 13). – С. 163 - 172.



2. ДБН В.2.2-8-98 Підприємства, будівлі і споруди по зберіганню та переробці зерна [Текст]. – На заміну СНиП 2.10.05-85. – Введ. 01.07.1998. – К.: Держбуд України, 1998. – 39 с.
3. Резуев, С. Б. Металлические силосы для хранения зерна: мифы и реальность [Текст] / С. Б. Резуев, И. В. Бакаев // Хранение и переработка зерна. – 2011. – №3. – С. 87 - 91.
4. Качуренко, В. В. Особливості моделювання тиску сипучого матеріалу на гофровані сталеві елементи [Текст] / В. В. Качуренко, Д. О. Банніков // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди. – 2014. – Випуск 28. – С. 367 - 376.
5. Гячев, Л. В. Основы теории бункеров [Текст] / Л. В. Гячев. – Новосибирск: изд-во НГУ, 1992. – 312 с.
6. Семенов, В. Ф. Бункеры и хранилища зерна [Текст]: учебн. пособие / В. Ф. Семенов. – Барнаул: изд-во АлтГТУ, 1999. – 221 с.
7. Экспериментальное исследование стенок бункеров на моделях: Отчет о НИР по теме № 9 148-51-81 (заключит.) [Текст] / Госуд. проектн. ин-т строит. металлокон-ий «Днепрпроектстальконструкция». – Днепропетровск, 1982. – 413 с.
8. Ягофаров, Х. Основы теории проектирования листовых металлических конструкций. Пирамидально-призматический бункер [Текст] / Х. Ягофаров, Н. Н. Собакин. – Екатеринбург: УрГУПС, 2006. – 234 с.
9. ДСТУ-Н Б EN 1991-4:2012 «Єврокод 1. Дії на конструкції. Частина 4. Бункери і резервуари [Текст]. – введ. 2014-01-07. – К.: Мінрегіонбуд України, 2012. – 150 с.
10. Карпиловский, В. С. Вычислительный комплекс / В. С. Карпиловский, Э. З. Криксунов, А. А. Маляренко, М. А. Микитаренко, А. В. Перельмутер – М.: Изд-во СКАД СОФТ, 2007. – 590 с.
11. Качуренко, В. В. Ефективний гофрований профіль для сталевих ємностей / В. В. Качуренко, Д. О. Банніков // Будівельне виробництво (міжвідомчий науково-технічний збірник). – 2014. – № 56. – С. 56 - 60.
12. Тьюки, Дж. Анализ результатов наблюдений: Разведочный анализ: Пер. с англ. [Текст] / Под ред. В.Ф. Писаренко. – М.: Мир, 1981. – 693 с.
13. Румшинский, Л.З. Математическая обработка результатов эксперимента [Текст] / Л.З. Румшинский. – М.: Наука, 1971. – 192 с.