

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ СТАТИЧНОЇ ПОВЕДІНКИ СИПУЧОГО СЕРЕДОВИЩА В ЄМНІСНІЙ КОНСТРУКЦІЇ

В статті наведено основні результати виконаних автором експериментальних досліджень розподілу статичного тиску сипучого матеріалу в замкненій ємнісній споруді. Дослідження проводились на малорозмірних сталевих конструкціях і передбачали варіацію як ряду конструктивних параметрів експериментальної установки, так і типів сипучого матеріалу.

В статье приведены основные результаты выполненных автором экспериментальных исследований распределения статического давления сыпучего материала в замкнутом емкостном сооружении. Исследования проводились на малоразмерных стальных конструкциях и предусматривали вариацию как ряда конструктивных параметров экспериментальной установки, так и типов сыпучего материала.

In the paper the main results of experimental investigations made by the author on distribution of static pressure from granular material in a covered capacity structure are presented. The investigations were conducted on the small-sized steel constructions and provided for the variation both a row of constructive parameters of the experimental installation and the types of granular material.

1. Тиск сипучого матеріалу – основне навантаження для ємнісної споруди

Одним з досить поширених видів будівельних конструкцій для зберігання різноманітних видів сипучих матеріалів є ємнісні споруди. В теперішній час вони використовуються в багатьох галузях промисловості, сільського господарства, в транспортній сфері. Нерідко такі конструкції визначають весь хід технологічної послідовності переробки сипучої речовини, оскільки саме від їх справної та якісної роботи залежить швидкість передачі сипучого матеріалу від однієї ланки виробництва на наступну.

Між тим, як свідчить наявна статистика відмов та аварій ємнісних споруд для сипучих матеріалів, такі конструкції нерідко виявляються недостатньо надійними та довговічними в експлуатації, а іноді – просто небезпечними [1, 2].

В якості однієї з основних причин такої ситуації більшість дослідників відзначають невірно визначений рівень навантажень від сипучої речовини, що зберігається [3 – 5]. Саме тиск сипучого матеріалу на стінки споруди виявляється здебільшого тим основним навантаженням, за яким розраховують несучу спроможність та жорсткість конструкції в цілому. Інші види навантажень, як наприклад снігове або вітрове навантаження, або не є визначальними, або зовсім відсутні у випадках розміщення ємностей у закритих будівлях.

Згідно з прийнятою методологією проектування [6 – 8], тиск сипучого матеріалу прийнято визначати для силосних ємностей – за теорі-

єю Г. А. Янсена, а для бункерних ємностей – за гідростатичними залежностями, які використовують при визначенні тиску від рідини. Оскільки і в першому, і в другому випадку наявні експериментальні дослідження констатують розходження між теоретичними й практичними результатами, то до цих залежностей додають емпіричні поправочні коефіцієнти, які сягають значення 2,0.

Приблизно аналогічна ситуація спостерігається і в закордонній проектній практиці [9 – 11], де поправочний коефіцієнт доходить до значення 2,5. В проекті нових Європейських норм [12], навіть, наведена спеціальна методика експериментального визначення коефіцієнту бокового тиску сипучого матеріалу, який є одним з ключових параметрів, що впливають на адекватність теоретичних залежностей.

До теперішнього часу запропоновані більш досконалі моделі поведінки сипучого середовища в замкненій ємнісній конструкції. Найбільш відомими серед них є моделі, що використовують для характеристики властивостей сипучої речовини спеціальний додатковий параметр – кут укладки зерен. Цей напрям на сьогоднішній день вважається серед фахівців найбільш перспективним, адже він дозволяє врахувати дуальну природу сипучого середовища. Розроблені моделі представлені в роботах [13, 14].

Проте, як відзначається в роботах [15, 16], вони не є досконалими і містять у своєму складі низку спрощень та припущень, які призво-

дять до змістових погрешностей в трактуванні отриманих результатів.

2. Мета та сутність експериментальних досліджень

Автором даної публікації була розроблена власна теоретична модель, яка описує поведінку сипучого середовища в замкненому просторі, яким є ємність для сипучих матеріалів. Основні її концептуальні засади представлені в публікаціях [17 – 20]. Проте модель потребує експериментальної перевірки для визначення ступеня її адекватності.

Попередньо виконані експериментальні спостереження на моделі ємності [21] переконали автора у відповідності закладених в модель припущень отриманим практичним результатам. Однак проблема експериментальної перевірки запропонованої теоретичної моделі залишилась.

Складність її вирішення полягає в тому, що всі наявні експериментальні дослідження, наведені та проаналізовані, наприклад, в роботах [22 – 25], не містять в переліку фізико-механічних характеристик сипучих матеріалів використаного нового параметру – кута укладки зерен. Проте за результатами теоретичних досліджень він досить суттєво впливає на характер розподілу тиску сипучого матеріалу. В роботах [13 – 16] подібні експериментальні дані відсутні.

Таким чином, перед автором постала необхідність проведення власних експериментальних досліджень поведінки сипучої середовища в замкненій ємнісній конструкції.

Їх підготовка та планування виявилися доволі складним завданням, оскільки треба було досить точно ув'язати між собою геометричні параметри експериментальної конструкції з параметрами сипучих матеріалів. В протилежному випадку могли виникнути небажані ефекти, такі як, наприклад, сводоутворення при розвантаженні, що не дозволили б провести якісні дослідження [26]. Крім цього, обсяг досліджень суттєво лімітувався габаритами використовуваного приміщення (на відкритому повітрі була висока вірогідність впливу факторів, які важко спрогнозувати), обсягом фізичної роботи (завантаження ємностей виконувалось у ручному режимі), наявною вимірювальною апаратурою. Не останню роль при цьому мала й кошторисна вартість спланованих досліджень.

В остаточному варіанті експериментальні дослідження містили три блоки вимірювань. Перший був присвячений дослідженню статич-

ної поведінки сипучого середовища в процесі її статичного зберігання в ємності. Другий блок передбачав дослідження процесу самостійного вивантаження сипучого матеріалу зі споруди. Третій блок був присвячений вимірюванням власних динамічних характеристик порожньої конструкції та завантаженої на різному рівні.

Основні отримані результати досліджень та їх аналіз за другим та третім блоками наведені в публікаціях [27] і [28], відповідно. Дана публікація присвячена першому блоку – статичним дослідженням.

Експериментальна установка являла собою малорозмірну сталеву ємність, розташовану на спеціальній опорній конструкції (рис. 1). Остання забезпечувала необхідну жорсткість опор, потрібну висоту випускного отвору над підлогою та можливість кріплення вимірювальних приладів.

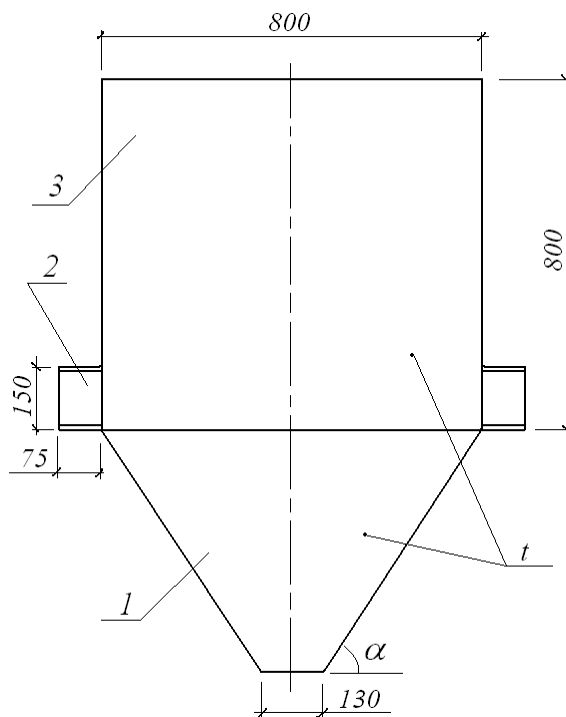


Рис. 1. Конструкція експериментальної ємності:

- 1 – нижня пірамідальна частина,
- 2 – верхня призматична частина,
- 3 – двотавровий опорний виступ

В якості змінних конструктивних параметрів були прийняті товщина стінки ємності (t) та кут нахилу нижньої воронкоподібної частини ємності до горизонталі (α). Саме вони є визначальними з точки зору особливостей поведінки сипучого матеріалу в ємнісній конструкції згідно із авторською теоретичною моделлю. Оскільки виготовити і випробувати 4 різних конструкцій виявилось економічно і технологічно складним, то було виготовлено 2 ємності. Для

першої були прийняті наступні параметри: $t = 4$ мм і $\alpha = 55^\circ$ (після обмірів – $54,4^\circ$); для другої: $t = 2$ мм і $\alpha = 45^\circ$ (після обмірів – $44,2^\circ$). Товщина стінки ємності призначалася з міркувань роботи її елементів в геометрично лінійній області, а кут нахилу воронки – з міркувань повного самостійного спорожнення ємностей.

Матеріалом для виготовлення ємностей була прийнята сталь, з якої у багатьох випадках виготовляються на практиці такі споруди. Необхідні їй властивості визначались у ході окремих спеціальних досліджень.

В якості сипучих матеріалів були обрані три матеріали – пісок із розміром зерен $0,25 \dots 2$ мм, мармурова крихта з розміром зерен $5 \dots 10$ мм і щебінь із розміром зерен $10 \dots 20$ мм. Всі матеріали були заздалегідь висушені і очищені від сміття й грязі. Пісок додатково просівався.

Основні фізико-механічні характеристики матеріалів визначались при проведенні спеціальних додаткових досліджень.

Для визначення точок розташування вимірювальних приладів на експериментальних ємнісних конструкціях було виконано попереднє комп'ютерне моделювання за допомогою одного з сучасних досить розповсюджених чисельних методів будівельної механіки – методу скінчених елементів (МСЕ). Його практична реалізація здійснювалась на основі одного з сучасних проектно-обчислювальних комплексів SCAD for Windows [29, 30]

Розроблені для цього скінчено-елементні моделі (СЕ-моделі) для двох експериментальних ємностей представлені на рис. 2. Вони являли собою пластинчасті системи, побудовані із оболонкових ізотропних 4-вузлових елементів. Дискретизація СЕ-моделей виконувалась відповідно до рекомендацій, визначених автором в його попередніх дослідженнях [31]. Форма і розміри скінчених елементів приймалися такими, щоб забезпечити точність отриманих результатів в межах 1 %. Навантаження задавалось у вигляді тиску від сипучого матеріалу на стінки конструкції відповідно до авторської теоретичної моделі з урахуванням визначених фізико-механічних властивостей матеріалів.

Напружено-деформований стан (НДС) обох ємностей під дією цього тиску виявився доволі однотипним і представлений для ємності № 1 на рис. 3 і 4. Значення напружень наведені в МПа. Більш темним ділянкам відповідають зони із більшим значенням напружень. Рисочками показано напрям першого головного напруження.

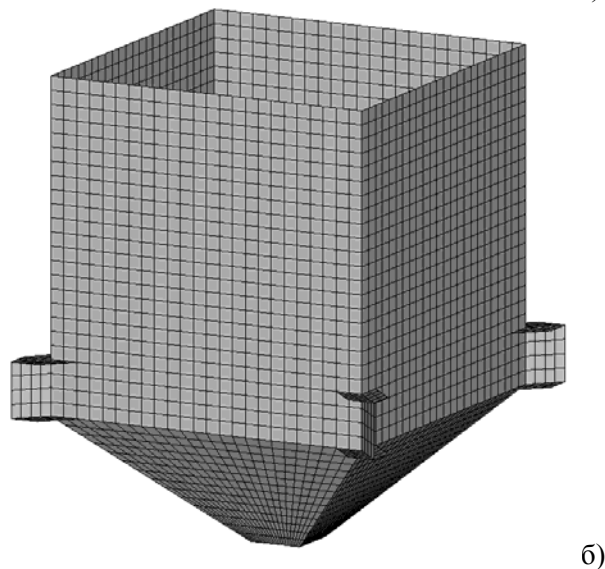
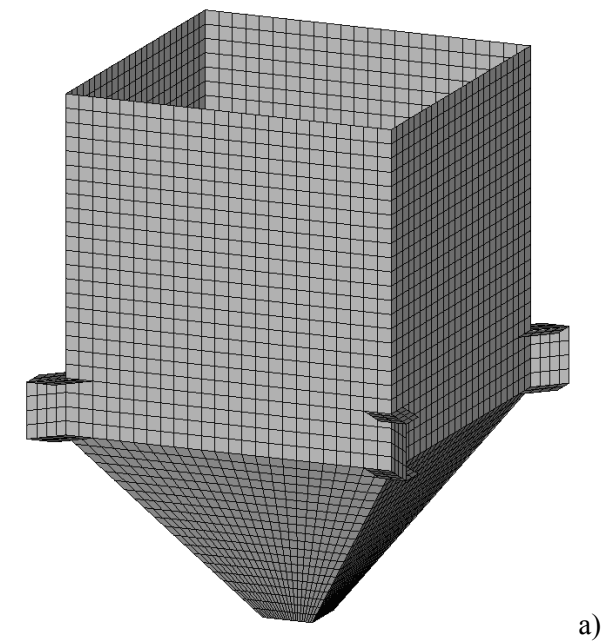


Рис. 2. Розроблені СЕ-моделі експериментальних ємностей № 1 (а) і № 2 (б)

СЕ-моделювання дозволило визначити зони з найбільшим рівнем НДС в експериментальних конструкціях, а також вказати на додаткові зони, які потребували уваги при дослідженнях. Такими зонами виявились геометричні середини бокових сторін верхньої і нижньої частин, ділянки в зоні стиковки сусідніх стінок між собою, а також зона стиковки верхньої та нижньої частин. Напруження в цих зонах, як видно з рис. 3, мали екстремальні значення та до того ж були протилежні за знаком.

Найбільші прогини, як видно з рис. 4, спостерігались в центральній зоні верхньої та нижньої частин ємності. Кутові ребра, утворені сусідніми стінками конструкції, були практично незмінюваними.

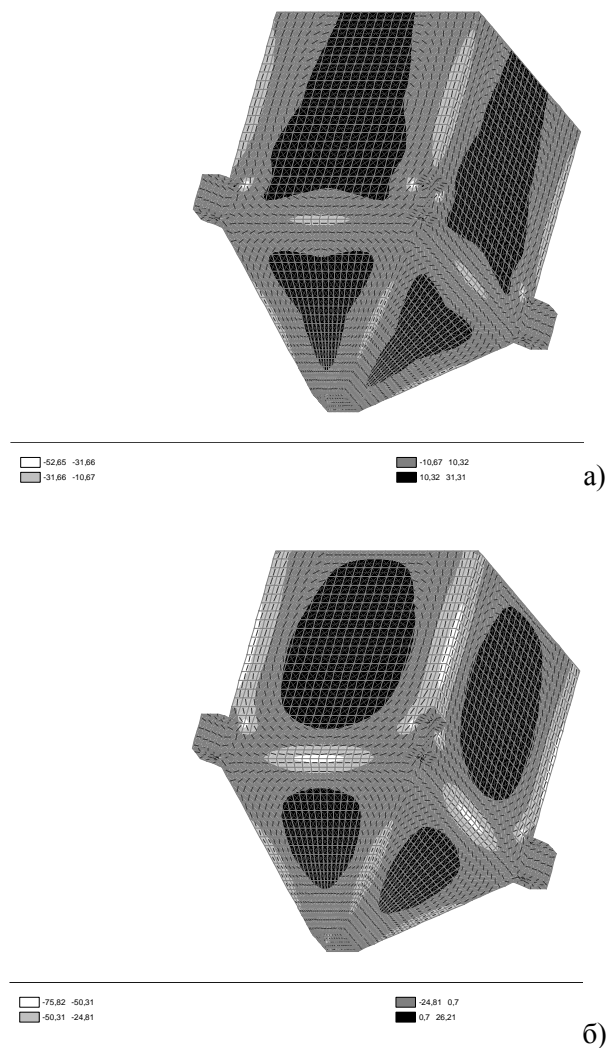


Рис. 3. Розподіл першого (а) і третього (б) головних напружень на зовнішній стороні експериментальної ємності № 1

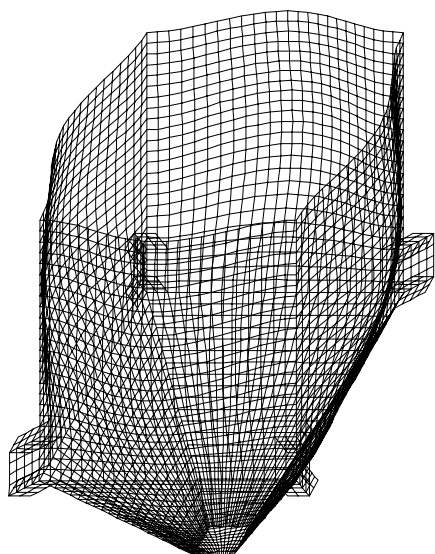


Рис. 4. Загальний вигляд деформацій експериментальної ємності № 1

У відповідності до отриманих результатів комп'ютерного моделювання були визначені кількість і місця розташування вимірювальних приладів – тензодатчиків (рис. 5) і прогиномірів (рис. 6).

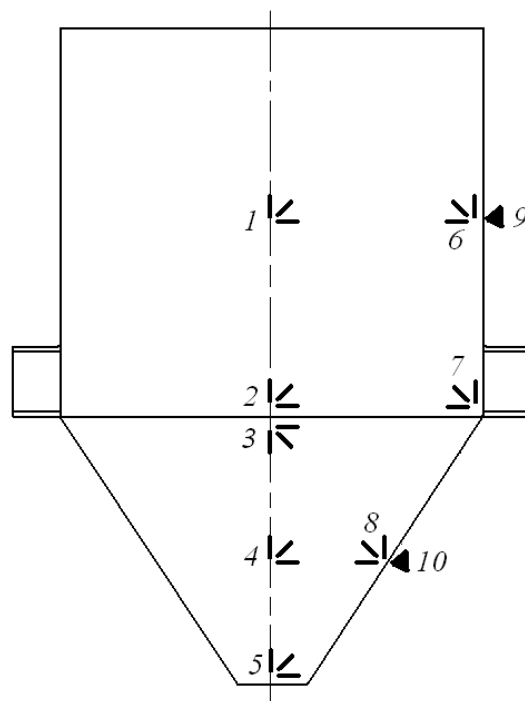


Рис. 5. Схема розміщення тензодатчиків на експериментальній ємності

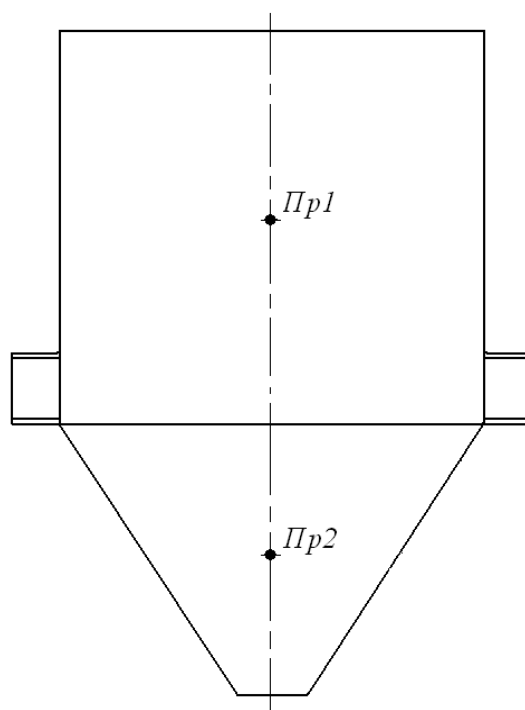


Рис. 6. Схема розміщення прогиномірів на експериментальній ємності

Тензорезистори наклеювалися за схемою стандартної розетки, оскільки напружений стан елементів стінки конструкції є плоским. Всього на конструкції було розташовано 10 тензорозеток (8 розеток на одній стороні ємності та 2 дублюючих розетки на сусідній стороні). Прогиноміри встановлювалися в двох точках на одній стінці ємностей по одному в середині верхньої та нижньої частин в місцях найбільшого очікуваного її прогину.

Тензодатчики через кабельні роз'єми приєднувалися до вимірювального комплексу ТМК-1, який у свою чергу підключався безпосередньо до комп'ютера, дозволяючи достатньо швидко і оперативно проводити експрес-обробку, а згодом і повну обробку отриманих даних. Зовнішній вигляд вимірювального комплексу представлений на фото (рис. 7).

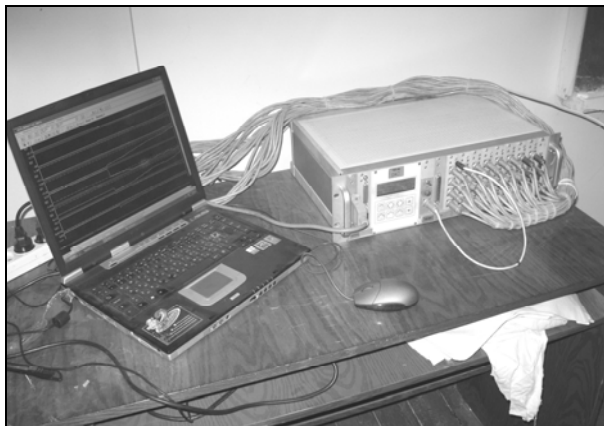


Рис. 7. Вимірювальний комплекс ТМК-1

На рис. 8 і 9 наведені фотографії обох виготовлених експериментальних ємностей зі встановленими приладами вимірювань. Позначення сторін було прийняте латинськими проти годинникової стрілки при погляді зверху: сторона А призначалася для установки прогиномірів, сторона В була основною для наклеювання тензорозеток, сторона С була дублюючою для наклеювання тензорозеток, сторона D для вимірювань не використовувалася.

Відмітимо також, що виконані конструкції ємностей розглядалися автором не як масштабні моделі реальних ємностей, а як невеликого розміру реальні ємності. Відповідно, і їх параметри, а також параметри сипучих матеріалів вибиралися не з умов масштабування. Тому в ході експериментальних досліджень, що проводилися, питання про подобу і залучення математичного апарату теорії подоби не ставилося. На думку автора, такий підхід є цілком правомірним і сприяє підвищенню достовірності отримуваних результатів.

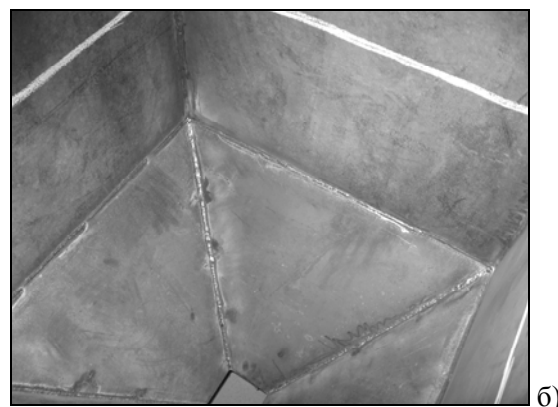
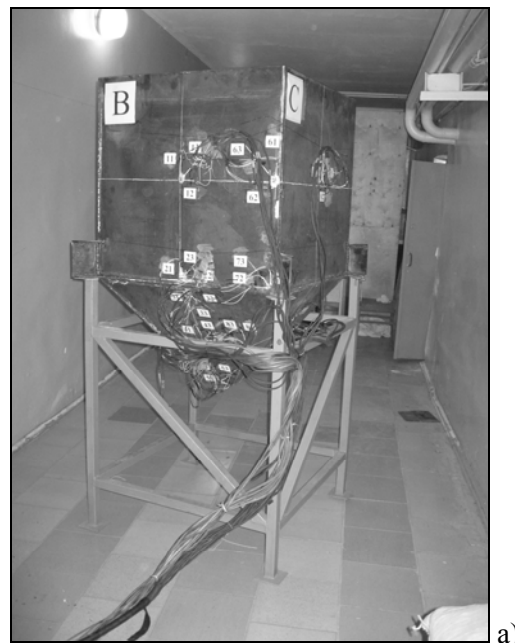


Рис. 8. Зовнішній (а) і внутрішній (б) вигляд експериментальної ємності № 1



Рис. 8. Зовнішній (а) і внутрішній (б) вигляд експериментальної ємності № 2

3. Результати досліджень та їх аналіз

Отримані за експериментальними даними результати статичних випробувань для кожного із сипучих матеріалів оброблялись за відомим алгоритмом для отримання значень головних напружень. Потім виконувалась їх статична обробка та відсіювання грубих помилок.

Остаточні отримані результати статичних експериментальних досліджень після обробки разом із їх співставленням із результатами комп'ютерного моделювання для найгіршого випадку повного завантаження ємностей і найбільш напружених зон конструкції наведені в табл. 1 – 6 (напруження) і табл. 7 і 8 (прогини).

Як видно з цих даних, в цілому представлені значення напружень і прогинів досить точно збігаються із теоретичними результатами, отриманими за допомогою чисельного моделювання. Особливо це справедливо по відношенню до найбільш навантажених зон конструкції (розетки 1, 4, 6, 8 – 10). В інших розетках, де рівень напружень значно нижчий, розходження виявляється більш суттєвим. Особливо воно помітно для розетки 5, яка була розташована майже біля випускного отвору. Безумовно, також, на рівень заміряних напружень в розетках 2, 3 і 7 вплинуло їх розташування біля зварних швів.

Таблиця 1

Повне завантаження піском ємності № 1

Розетка	Головне напруження	Напруження за результатами, МПа	
		комп'ютерного моделювання	експерименту
1.	перше	29,4	28,2
	третє	20,2	16,0
2.	перше	-9,8	-6,7
	третє	-24,8	-18,5
3.	перше	-7,6	-3,3
	третє	-13,9	-13,4
4.	перше	30,3	36,0
	третє	22,6	21,2
5.	перше	14,3	7,9
	третє	4,4	-2,3
6.	перше	-10,6	-6,9
	третє	-21,8	-17,7
7.	перше	-10,4	-5,2
	третє	-14,2	-7,1
8.	перше	-13,6	-19,3
	третє	-42,9	-41,8
9.	перше	29,4	26,7
	третє	20,2	19,4
10.	перше	30,3	33,8
	третє	22,6	25,5

Таблиця 2

Повне завантаження крихтою смності № 1

Розетка	Головне напруження	Напруження за результатами, МПа	
		комп'ютерного моделювання	експерименту
1.	перше	24,2	24,4
	третє	18,2	15,7
2.	перше	-5,8	-4,0
	третє	-14,8	-15,0
3.	перше	-3,6	-0,5
	третє	-10,9	-8,7
4.	перше	25,1	24,1
	третє	19,2	21,3
5.	перше	9,1	0,2
	третє	0,7	-2,2
6.	перше	-5,8	-4,7
	третє	-14,2	-12,8
7.	перше	-7,7	-3,9
	третє	-1,2	-5,4
8.	перше	-16,2	-20,8
	третє	-44,5	-42,1
9.	перше	24,2	20,3
	третє	18,2	18,8
10.	перше	25,1	24,0
	третє	19,2	22,7

Таблиця 4

Повне завантаження піском смності № 2

Розетка	Головне напруження	Напруження за результатами, МПа	
		комп'ютерного моделювання	експерименту
1.	перше	45,4	43,9
	третє	36,7	36,1
2.	перше	-14,4	-6,2
	третє	-35,1	-25,4
3.	перше	-12,9	-14,5
	третє	-28,8	-21,7
4.	перше	39,6	30,0
	третє	31,2	26,8
5.	перше	18,9	13,7
	третє	2,3	-6,7
6.	перше	-22,2	-25,8
	третє	-33,3	-38,5
7.	перше	-4,2	-5,0
	третє	-10,6	-6,2
8.	перше	-17,4	-22,0
	третє	-37,9	-43,4
9.	перше	45,4	42,0
	третє	36,7	31,4
10.	перше	39,6	40,7
	третє	31,2	33,8

Таблиця 3

Повне завантаження щебенем смності № 1

Розетка	Головне напруження	Напруження за результатами, МПа	
		комп'ютерного моделювання	експерименту
1.	перше	20,9	22,3
	третє	14,1	13,5
2.	перше	-3,8	-3,7
	третє	-12,4	-13,3
3.	перше	-1,3	0,0
	третє	-9,7	-10,4
4.	перше	22,1	21,7
	третє	15,8	15,0
5.	перше	6,2	3,9
	третє	-5,2	-2,3
6.	перше	-2,9	-3,7
	третє	-12,5	-12,5
7.	перше	-3,7	-1,7
	третє	-2,5	-5,5
8.	перше	-13,6	-13,8
	третє	-40,2	-43,8
9.	перше	20,9	17,5
	третє	14,1	16,5
10.	перше	22,1	20,4
	третє	15,8	15,2

Таблиця 5

Повне завантаження крихтою смності № 2

Розетка	Головне напруження	Напруження за результатами, МПа	
		комп'ютерного моделювання	експерименту
1.	перше	39,8	34,4
	третє	31,2	33,7
2.	перше	-10,2	-4,0
	третє	-29,7	-15,0
3.	перше	-6,5	-3,5
	третє	-21,4	-28,7
4.	перше	32,2	34,1
	третє	25,6	22,2
5.	перше	12,4	7,2
	третє	3,4	-2,2
6.	перше	-17,1	-14,7
	третє	-25,2	-22,8
7.	перше	-1,2	-3,9
	третє	-6,3	-5,4
8.	перше	-14,3	-20,8
	третє	-32,5	-32,1
9.	перше	39,8	32,3
	третє	31,2	30,8
10.	перше	32,2	34,0
	третє	25,6	27,7

Таблиця 6

Повне завантаження щепенем ємності № 2

Розетка	Головне напруження	Напруження за результатами, МПа	
		комп'ютерного моделювання	експерименту
1.	перше	33,2	35,0
	третє	25,5	23,2
2.	перше	-8,4	-3,5
	третє	-21,4	-12,9
3.	перше	-5,6	-2,1
	третє	-17,3	-11,4
4.	перше	27,7	24,2
	третє	22,7	22,6
5.	перше	8,5	2,5
	третє	1,1	-5,7
6.	перше	-11,7	-15,7
	третє	-20,5	-15,4
7.	перше	-3,3	-3,6
	третє	-2,8	-5,8
8.	перше	-10,2	-14,7
	третє	-25,7	-29,5
9.	перше	33,2	30,9
	третє	25,5	30,3
10.	перше	27,7	30,0
	третє	22,7	23,9

Таблиця 7

Значення прогинів для ємності № 1

Сипучий матеріал	Прогинімір ПР1, мм	
	комп'ютерне моделювання	експеримент
пісок	0,53	0,50
крихта	0,80	0,86
щєбінь	0,40	0,41
	Прогинімір ПР2, мм	
пісок	0,70	0,67
крихта	0,92	0,99
щєбінь	0,50	0,48

Таблиця 8

Значення прогинів для ємності № 2

Сипучий матеріал	Прогинімір ПР1, мм	
	комп'ютерне моделювання	експеримент
пісок	2,24	2,11
крихта	1,47	1,50
щєбінь	0,81	0,71
	Прогинімір ПР2, мм	
пісок	1,58	1,52
крихта	1,15	1,12
щєбінь	0,55	0,47

Для експериментальної ємності № 2 розброс значень напружень виявився більшим, ніж для

ємності № 1. Це може бути пояснено більшою гнучкістю стінки у першому випадку. В цілому для найбільш напружених зон конструкції він не перевищує 30 %.

Відхилення у величині заміряних прогинів не перевищує 20 %. У випадку ємності № 1 відмічено краще співпадання результатів, ніж у випадку другої ємності.

4. Основні висновки по роботі

Підсумовуючи матеріал, наведений у представлений статті, автор вважає можливим констатувати наступне:

1. Експериментальні дослідження проводились в широкому діапазоні зміни гранулометричного складу сипучих матеріалів (0,25...20 мм), а також в прийнятному діапазоні зміни конструктивних властивостей конструкції ємності (прийняті значення товщини стінки 2 і 4 мм, прийняті значення кута нахилу пірамідальної частини до горизонту – 45 і 55°), що охоплюють багато реальних проектних ситуацій.

2. В цілому отримані значення напружень при статичному завантаженні досить точно збігаються із теоретичними даними, отриманими за допомогою методу скінчених елементів. Максимальне відхилення для найбільш напружених ділянок конструкції не перевищувало 30 %. В інших зонах воно сягає 100 %, що може бути пояснено наближеністю зварних швів.

3. Відхилення у величині заміряних прогинів в цілому не перевищує 20 %, хоча спостерігається нерівномірність в їх розподілі по деяких матеріалах.

4. Зважаючи на отримані результати співставлення натурного експерименту на малих ємностях та результатів, прогнозованих за СЕ-розрахунками із використанням авторської моделі взаємодії сипучого матеріалу із елементами ємнісної конструкції, можна констатувати, що запропонована авторська теоретична модель взаємодії сипучої речовини із елементами ємнісної конструкції є достатньо адекватною та може бути рекомендована для безпосереднього практичного застосування.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Банников, Д. О. Основные причины аварий жестких стальных бункеров и низких силосов / Д. О. Банников, М. И. Казакевич // Металеві конструкції. – 2002. – Т. 5, № 1. – С. 59-66.
2. Bannikov, D. O. Features of Failures of Steel Bunkers (of Pyramidally-Prismatic Type) / D. O. Bannikov, M. I. Kazakevitch // Proc. of 10th Polish-Ukrainian sem. «Theoretical Foundations of Civil

- Engineering». – Warsaw: Warszawskiej Politechnik. – 2002. – Vol. II. – P. 650-657.
3. Лашенко, М. Н. Аварии металлических конструкций зданий и сооружений / М. Н. Лашенко. – Л.: Изд-во лит-ры по строит-ву, 1969. – 184 с.
 4. Аугустин, Я. Аварии стальных конструкций / Я. Аугустин, Е. Шледзевский.; пер. с польск. – М.: Стройиздат, 1978. – 183 с.
 5. Шкинев, А. Н. Аварии в строительстве / А. Н. Шкинев. – М.: Стройиздат, 1984. – 320 с.
 6. Підприємства, будівлі та споруди по зберіганню та переробці зерна: ДБН В.2.2-8-98. – [Чинний від 1998-01-07] – К.: Держбуд України, 1988. – 41 с.
 7. Руководство по расчету и проектированию железобетонных, стальных и комбинированных бункеров / Ленпромстройпроект. – М.: Стройиздат, 1983. – 200 с.
 8. Справочник проектировщика. Металлические конструкции: в 3 т. / под ред. В. В. Кузнецова. – М.: Изд-во АСВ, 1998. – Т. 2: Стальные конструкции зданий и сооружений. – 1998. – 526 с.
 9. Structural Engineering Handbook / ed. by E. H. Gaylord, Jr., Ch. N. Gaylord, J. E. Stallmeyer. – [4th ed]. – McGraw-Hill, 1997. – 624 p.
 10. Gaylord, E. H. Design of steel Bins for storage of Bulk Solids / E. H. Gaylord, Jr., Ch. N. Gaylord. – McGraw-Hill, 2000. – 278 p.
 11. Reisner, W. Bins and bunkers for handling bulk materials. Practical design ant techniques / W. Reisner. – McGraw-Hill, 2000. – 324 p.
 12. Basis of design and actions on structures. Part 4: Actions in silos and tanks: prEN 1991-4. Eurocode 1. – CEN, 2002.
 13. Богомягих, В. А. Теория и расчет бункеров для сыпучих материалов / В. А. Богомягих. – Ростов-на-Дону: Изд-во РГУ, 1974. – 149 с.
 14. Гячев, Л. В. Основы теории бункеров / Л. В. Гячев. – Новосибирск: Изд-во НГУ, 1992. – 312 с.
 15. Семенов, В. Ф. Бункеры и хранилища зерна : [учеб. пособие для студ. вузов] / В. Ф. Семенов. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 1999. – 221 с.
 16. Капитонов, Е. Н. Бункеры и затворы : [учеб. пособие для студ. вузов] / Е. И. Капитонов. – Тамбов: Изд-во ТГТУ, 1994. – 113 с.
 17. Банніков, Д. О. Континуальна модель тиску сипучого матеріалу в замкненій ємнісній конструкції / Д. О. Банніков // Зб. наук. пр. «Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди». – 2008. – Вип. 17. – Рівне. – С. 333-340.
 18. Банніков, Д. О. Особливості розподілу тиску сипучого матеріалу в одноступінчастих ємнісних конструкціях / Д. О. Банніков // Зб. наук. пр. ПолтНТУ: серія «Галузеве машинобудування, Будівництво». – Полтава: Вид-во ПолтНТУ. – 2008. – Вип. 21. – С. 79-87.
 19. Банніков, Д. О. Тиск сипучого матеріалу на стінки двоступінчастих ємнісних конструкцій / Д. О. Банніков // Вісник ДНУЗТ. – 2008. – Вип. 23. – Д.: Вид-во ДНУЗТ, 2008. – С. 143-149.
 20. Банніков, Д. О. Визначення коефіцієнта бокового тиску сипучого матеріалу в замкненій посудині / Д. О. Банніков // Металеві конструкції. – 2008. – Том 14, № 2. – С. 113-123.
 21. Банников, Д. О. Исследование угла укладки зерен сыпучего материала на модели емкости // Вісник ДНУЗТ. – 2008. – Вип. 22. – Д.: Вид-во ДНУЗТ, 2008. – С. 130-136.
 22. Чеботарёв, Г. П. Механика грунтов. Основания и земляные сооружения / Г. П. Чеботарев. – М.: Стройиздат, 1968. – 616 с.
 23. Клейн, Г. К. Строительная механика сыпучих тел / Г. К. Клейн. – М.: Стройиздат, 1977. – 256 с.
 24. Прокофьев, И. П. Давление сыпучего тела и расчет подпорных стенок / И. П. Прокофьев. – М.: Изд-во строит. лит-ры, 1947. – 144 с.
 25. Соколовский, В. В. Статика сыпучей среды / В. В. Соколовский. – М.: Физматгиз, 1960. – 243 с.
 26. Банников, Д. О. Планирование и проведение исследований по экспериментальному изучению сыпучих материалов в емкостных конструкциях / Д. О. Банников // Сб. науч. тр. «Строительство, материаловедение, машиностроение», серия: Инновационные технологии жизненного цикла объектов жилищно-гражданского, промышленного и транспортного назначения. – Д.: Изд-во ПГАСА. – 2008. – Вип. 47. – С. 40-52.
 27. Банников, Д. О. Особенности процесса разгрузки бункерных емкостей / Д. О. Банников // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2008. – № 5. – С. 131-135.
 28. Банніков, Д. О. Експериментальні дослідження динамічних властивостей сталевих ємнісних конструкцій для сипучих вантажів / Д. О. Банніков // Підйомно-транспортна техніка. – 2008. – № 4. – С. 79-88.
 29. SCAD для пользователя / В. С. Карпиловский и др. – К.: ВВП Компас, 2000. – 332 с.
 30. Формирование сечений и расчет их геометрических характеристик / В. С. Карпиловский и др. – К.: ВВП Компас, 2000. – 80 с.
 31. Банников, Д. О. Расчет пирамидально-призматических бункеров методом конечных элементов / Д. О. Банников, М. И. Казакевич. – Д.: Наука и образование, 2003. – 150 с.

Надійшла до редколегії 25.03.2009.