

ТИСК СИПУЧОГО МАТЕРІАЛУ НА СТІНКИ ДВОСТУПІНЧАСТИХ ЄМНІСНИХ КОНСТРУКЦІЙ

В статті наведено часткове рішення розподілу тиску від сипучого матеріалу на стінки ємнісної конструкції для одного з найбільш розповсюджених у проектній практиці типів – двоступінчастої споруди. Рішення отримано на основі розробленої автором дискретно-континуальної теоретичної моделі взаємодії сипучого середовища з елементами ємності. Представлені залежності проілюстровано відповідними графіками.

В статье приведено частное решение распределения давления от сыпучего материала на стенки емкостной конструкции для одного из наиболее распространенных в проектной практике типов – двухступенчатого сооружения. Решение получено на основе разработанной автором дискретно-континуальной теоретической модели взаимодействия сыпучей среды с элементами емкости. Представленные зависимости проиллюстрированы соответствующими графиками.

In the paper the special solution for distribution of granular material pressure on capacity structure walls is presented. The type of capacities the most wide-spread in the design practice, called two-staged one, is considered. The solution was obtained on the base of the discrete-continual theoretical model on interaction of granular matter with elements of the capacity worked out by the author. The given relationships are illustrated by means of corresponding plots.

1. Визначення тиску сипучого матеріалу – одна з ключових проблем

Ємнісні конструкції, які використовуються для зберігання різних типів сипучих матеріалів, є одним з достатньо поширених видів сучасних промислових споруд. Широке використання таких конструкцій обумовлено достатньо великою номенклатурою та кількістю різновидів сипучих речовин, що підлягають переробці або ж є її продуктом. Проте самі ємнісні споруди не відрізняються досить великою різноманітністю, особливо за своїм конструктивним рішенням.

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 самотпливом. На рис. 1 наведені приклади двоступінчастих сталевих ємнісних споруд.

Основні теоретичні засади та практична методика проектування ємнісних конструкцій остаточно сформувались приблизно в другій половині минулого сторіччя і були закріплені у спеціальній нормативній та довідковій літературі [1–3]. Також приблизно в цей період була створена значна кількість подібних споруд, багато з яких експлуатуються ще й досі.



Рис. 1. Двоступінчасті ємнісні споруди

Між тим, як свідчить накопичений за цей час досвід їх обслуговування та використання, ємнісні конструкції для сипучих матеріалів відрізняються рядом певних недоліків. Частина з

них, як, наприклад, помилкове визначення форми та розмірів випускного отвору, веде до необхідності постійного залучення додаткових людських і матеріальних ресурсів під час експлуатації ємнісних споруд. Інші ж помилки, як, наприклад, спрощене визначення зусиль в елементах, призводять до часткової або, навіть, повної втрати несучої спроможності конструкції [4, 5].

Однією з ключових проблем, що обумовлює виникнення значної кількості відмов та аварійних ситуацій в ємнісних конструкціях є проблема визначення тиску сипучого матеріалу на стінки ємності [6].

Вирішенням цієї задачі в різні періоди часу займалась значна кількість фахівців. Дотепер сформувались різні теоретичні погляди на сутність та концепцію розробки вказаної проблеми. Найбільш новою та сучасною вважається дискретно-континуальна концепція сипучого матеріалу, розробку якої було започатковано в роботах Г. С. Зелінського та Т. Б. Денисової [7].

В подальшому суттєвий внесок було зроблено проф. В. А. Богомягких, який, фактично, розробив термінологічний апарат для опису поведінки сипучої речовини в замкненому посуді та запропонував нескладну теоретичну модель. Вдосконаленню цих розробок присвячені роботи Л. В. Гячева. Зокрема, в роботі [8] викладено досить детальну та ґрунтовну теоретичну концепцію, яка, на думку автора, дозволяє розглядати з єдиних позицій статичний стан спокою сипучого матеріалу та його самопливний рух.

Проте, як справедливо зазначено в роботі [9], наявні експериментальні дані повністю не підтверджують ні одну із зазначених теоретичних моделей. При цьому розбіжності носять як кількісний, так і якісний характер.

Сучасні закордонні розробки з проблематики визначення тиску сипучого матеріалу в ємнісних конструкціях не відрізняються особливою новизною. Спеціальна фахова література [10] рекомендує декілька різноманітних підходів, відомих ще з початку минулого сторіччя та заснованих, до речі, на більш простих континуальних уявленнях про роботу сипучого середовища під навантаженням.

Таким чином, проблема побудови адекватної та сучасної теоретичної моделі сипучого середовища, яке знаходиться в замкненій ємнісній конструкції, залишається невирішеною. Її розробка та експериментальне підтвердження потребують проведення подальших досліджень.

2. Авторська теоретична модель

Багаторічні дослідження, пов'язані із вивченням та аналізом особливостей проектування та експлуатації ємнісних конструкцій, підштовхнули автора до розробки власної теоретичної моделі, яка б описувала поведінку сипучого середовища в замкненому посуді, яким є вертикальна ємнісна конструкція.

Модель являє собою комплексну теоретичну розробку, побудовану на дискретно-континуальних уявленнях про сипуче середовище та зорієнтовану на опис статичного стану спокою під час її зберігання.

Рівновага сипучого середовища описується за допомогою диференційного рівняння:

$$\frac{dP_b}{dy} + P_b \left(k_n \frac{\cos(\alpha - \varphi)}{\cos \varphi} + \frac{2 \cdot \frac{dR(y)}{dy}}{a_0 + R(y)} \right) - \gamma g = 0, \quad (1)$$

де P_b – вертикальний тиск в сипучому масиві на глибині y від верхньої горизонтальної поверхні;

$R(y)$ – функція форми бічної поверхні ємнісної конструкції, яка також в загальному випадку є змінною із глибиною y ;

α – кут нахилу бічної стінки ємнісної конструкції до горизонталі на глибині y ;

a_0 – ширина випускного отвору нижньої частини ємнісної конструкції;

γ – власна вага сипучого середовища;

φ – кут зовнішнього тертя сипучого середовища о стінки ємнісної конструкції;

g – прискорення вільного падіння;

k_n – коефіцієнт нормального тиску сипучого середовища на стінку ємнісної конструкції на глибині y , який визначається за виразами (2) або (3):

$$k_n = \frac{2 \cdot \operatorname{tg} \beta \cdot \operatorname{tg}(\beta - \psi)}{(a_0 + R) \cdot (2 \cdot \operatorname{tg}(\alpha - \varphi) + \operatorname{tg}(\beta - \psi))} \cdot \frac{\cos \varphi}{\cos(\alpha - \varphi)}, \quad (2)$$

$$k_{ne} = \frac{2 \cdot \operatorname{tg} \beta \cdot \operatorname{tg}(\beta + \psi)}{(a_0 + R) \cdot (2 \cdot \operatorname{tg}(\alpha - \varphi) + \operatorname{tg}(\beta + \psi))} \cdot \frac{\cos \varphi}{\cos(\alpha - \varphi)}, \quad (3)$$

де β – кут укладки зерен сипучого середовища;

ψ – кут внутрішнього тертя між зернами сипучого середовища.

В цілому, рівняння (1) складено для елементарного горизонтального шару сипучого середовища завтовшки dy , розташованому на глибині y від поверхні. Фактично, воно є узагальненням відомого виразу Х. Янсена [3, 10] для

випадку ємності із невертикальними стінками та було отримано автором раніше. Рівняння відображує континуальні властивості сипучого середовища як суцільного масиву.

Проте сипуча речовина, як відомо, за своєю природою є дуальною. Їй притаманні також властивості дискретного середовища, особливо коли йде мова про незначні розміри області, що розглядається. Ця особливість була відображена у рівнянні (1) за допомогою спеціального коефіцієнту нормального тиску. Вирази (2) і (3) для його розрахунку були отримані саме на основі розгляду зернистої структури сипучого середовища.

Під час побудови відповідної теоретичної моделі для їх отримання була виявлена необхідність розрізняти два випадки. Перший стосується статичного стану спокою сипучого середовища. Коефіцієнт нормального тиску при цьому визначається за виразом (2). Однак під час початку розвантаження починається зміна структури укладки зерен сипучого матеріалу. В моделі це знайшло відображення у зміні напрямків діючих між зернами матеріалу сил тертя. В результаті був отриманий дещо інший вираз для знаходження коефіцієнту нормального тиску (3). Для підкреслення того факту, що цей коефіцієнт пов'язаний із миттю початку вивантаження сипучого матеріалу із ємнісної конструкції в його позначення доданий індекс *e* від англійського слова *emptying* (спорожнення, спустошення).

Завважимо, що фізичний зміст коефіцієнту нормального тиску сипучого середовища полягає у відображенні співвідношення між вертикальним тиском в певній точці масиву та тиском у напрямку по нормалі до уявної жорсткої стінки, поміщеної в цю точку. Для більшості рідин цей коефіцієнт добре відомий та дорівнює 1. У випадку сипучого середовища значення цього коефіцієнту суттєво залежить від її фізико-механічних властивостей (β , ψ , φ), а також від параметрів замкненого сосуди-ємності (α , a_0 , $R(y)$). Значення коефіцієнту може бути як менше одиниці, так і більше за неї (переважно у мить початку вивантаження).

Повертаючись до диференційного рівняння (1), треба відмітити, що воно може бути записано у більш компактній та зручній для подальшої роботи формі (4). Для цього треба ввести додаткову функцію $f(y)$, яка визначиться виразом (5):

$$\frac{dP_b}{dy} + P_b \cdot f(y) - \gamma g = 0, \quad (4)$$

$$f(y) = k_n \frac{\cos(\alpha - \varphi)}{\cos \varphi} + \frac{2 \cdot \frac{dR(y)}{dy}}{a_0 + R(y)}. \quad (5)$$

Отримане диференційне рівняння являє собою лінійне неоднорідне рівняння першого порядку. Відомо його загальне рішення, яке для даного випадку може бути записане у вигляді:

$$P_b(y) = e^{-\int f(y) \cdot dy} \cdot (\gamma \cdot g \cdot \int e^{\int f(y) \cdot dy} \cdot dy + C), \quad (6)$$

де підінтегральний вираз має вигляд:

$$f(y) \cdot dy = k_n \frac{\cos(\alpha - \varphi)}{\cos \varphi} \cdot dy + \frac{2 \cdot \frac{dR(y)}{dy}}{a_0 + R(y)} \cdot dy. \quad (7)$$

Методика користування отриманими виразами досить нескладна. Для визначення залежності тиску сипучого матеріалу із глибиною ємності певної геометричної форми необхідно спочатку визначитись із фізико-механічними характеристиками сипучого матеріалу. Деякі з них можуть бути отримані за довідковими даними, деякі мають бути уточнені шляхом лабораторних вимірювань.

Далі за виразами (2) і (3) може бути знайдений коефіцієнт нормального тиску. Його треба знаходити для двох випадків окремо і всі подальші обчислення також проводити для двох випадків окремо. Це дасть змогу, порівнявши остаточні отримані вирази (6), визначитись, який із випадків є найгіршим з точки зору роботи ємнісної конструкції та прийняти цей випадок в якості основного розрахункового.

Невідомий коефіцієнт інтегрування C може бути легко знайдений із будь-яких початкових умов. Наприклад, в якості таких умов може бути врахована відсутність тиску на верхній поверхні сипучого матеріалу.

Для ємностей, які складаються із декількох частин (ступенів), розрахунковий вираз може бути отриманий шляхом комбінації виразів для кожної із частин із урахуванням умови рівності вертикальних тисків на межах цих частин.

3. Тиск сипучого матеріалу у випадку двоступінчастої ємності

Проілюструємо використання наведених результатів та виразів для розглянутого на початку статті випадку ємності, що складається із двох частин.

Розглянемо спрощену ємність, яка не має випускного отвору, тобто параметр $a_0 = 0$. Це несуттєво вплине на остаточний результат, але

дозволить більш наочно продемонструвати загальні особливості, притаманні даному випадку. Схематично ємність зображено на рис. 2. Вона сформована двома відносно незалежними за формою частинами: нижньою пірамідоподібною з кутом нахилу α грані до горизонтальної поверхні і верхньою призмоподібною із вертикальними гранями висотою h_2 .

Хочемо зазначити, що при створенні авторської математичної моделі тиску сипучого матеріалу в замкненій ємності було введено гіпотетичне припущення стосовно рівномірності розподілу тиску по горизонтальному перерізу ємності. Наслідком цього є незалежність отриманого рішення від форми горизонтального перерізу ємності. Головною умовою є лише вимога, щоб горизонтальний переріз являв собою правильний багатокутник, а в граничному випадку – коло.

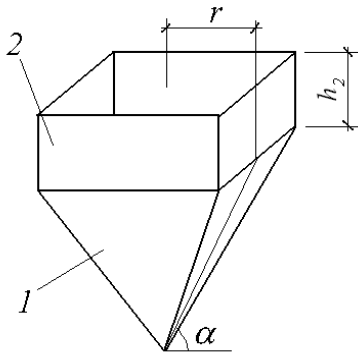


Рис. 2. Двоступінчаста ємність:
1 – нижня похила частина,
2 – верхня вертикальна частина

Розташуємо систему координат таким чином, щоб її центр знаходився у площині верхньої уявної основи призматичної частини, а вісь ОУ була спрямована вертикально вниз. Оскільки розглядається повністю симетрична конструкція, то розташування двох інших осей для нас не буде мати принципового значення, але для визначеності нехай вони будуть спрямовані вздовж двох довільних взаємно перпендикулярних граней верхньої частини.

В термінах запропонованої вище математичної моделі геометрична форма обох частин може бути записана за допомогою відповідних функцій форми. Для нижньої частини вона буде мати вигляд виразу (8), а для верхньої – (9):

$$R_1(y) = r - \frac{y}{\operatorname{tg} \alpha}, \quad (8)$$

$$R_2(y) = 0. \quad (9)$$

Вирази для коефіцієнта нормального тиску для нижньої та верхньої частин ємності будуть мати вигляд (10) і (11), відповідно:

$$k_{n1} = \frac{2 \cdot \operatorname{tg} \beta \cdot \operatorname{tg}(\beta \mp \psi)}{\left(r - \frac{y}{\operatorname{tg} \alpha}\right) \cdot (2 \cdot \operatorname{tg}(\alpha - \varphi) + \operatorname{tg}(\beta \mp \psi))} \times \frac{\cos \varphi}{\cos(\alpha - \varphi)}, \quad (10)$$

$$k_{n2} = \frac{2 \cdot \operatorname{tg} \beta \cdot \operatorname{tg}(\beta \mp \psi)}{r \cdot (2 \cdot \operatorname{tg}(\alpha - \varphi) + \operatorname{tg}(\beta \mp \psi))} \times \frac{\cos \varphi}{\cos(\alpha - \varphi)}. \quad (11)$$

В кожному з цих виразів для аргументу другого тангенсу введено подвійний знак. В чисельнику він відповідає знакові із виразу (2), тобто випадку статичного спокою сипучого середовища, а в знаменнику – знакові виразу (3), тобто випадку початку вивантаження сипучого середовища. Така форма запису може бути використана для підвищення компактності викладок.

Також з цією метою введемо ще два допоміжних коефіцієнта, які не мають самостійного фізичного змісту, але полегшать виконання тождесних перетворень. Коефіцієнти запишуться виразами (12) і (13):

$$k_1 = \frac{2 \cdot \operatorname{tg} \beta \cdot \operatorname{tg}(\beta \mp \psi)}{2 \cdot \operatorname{tg}(\alpha - \varphi) + \operatorname{tg}(\beta \mp \psi)}, \quad (12)$$

$$k_2 = k_{n2} \cdot \operatorname{tg} \varphi. \quad (13)$$

З урахуванням цього вираз для вертикального тиску сипучого матеріалу на бокові стінки ємності для верхньої частини буде мати такий вигляд:

$$P_{b2}(y) = \frac{\gamma \cdot g}{k_2} \cdot (1 - e^{-k_2 \cdot y}). \quad (14)$$

При його виводі було використано граничну умову: при $y = 0$, $P_b = 0$, а стала інтегрування мала вигляд виразу:

$$C = -\frac{\gamma \cdot g}{k}. \quad (15)$$

Для нижньої частини вираз для вертикального тиску сипучого матеріалу буде мати більш складний вигляд та попередньо може бути записаний у формі:

$$P_{B1}(y) = \gamma \cdot g \cdot \left(r - \frac{y}{\operatorname{tg}\alpha} \right) \cdot \frac{1}{k_1 - \frac{3}{\operatorname{tg}\alpha}} + C \cdot \left(r - \frac{y}{\operatorname{tg}\alpha} \right)^{k_1-2}. \quad (16)$$

До нього входить невідома інтегрування C . Однак, вона може бути легко знайдена, якщо використати той факт, що вертикальний тиск в нижній точці верхньої вертикальної частини і верхній точці нижньої похилої частини рівні між собою або, говорячи математичною мовою, функція розподілу тиску сипучого матеріалу з глибиною є неперервною.

Ця умова може бути записана таким чином: при $y = h_2$, $P_{B1} = P_{B2}$. Тоді стала інтегрування для нижньої частини ємності буде мати вигляд:

$$C = \frac{\gamma \cdot g \cdot \frac{(1 - e^{-k_2 \cdot h_2})}{k_2} - \frac{\gamma \cdot g \cdot r}{k_1 - \frac{3}{\operatorname{tg}\alpha}}}{r^{k_1-2}}. \quad (17)$$

Остаточно вираз для вертикального тиску сипучого матеріалу для нижньої частини ємності може бути записаний у вигляді (18). Вираз є дещо громіздким, але його використання при сучасному рівні розвитку комп'ютерної техніки та відповідних пакетів математичних програм не представляє серйозних утруднень.

Таким чином, вертикальний тиск сипучого матеріалу на стінки двоступінчастої ємності може бути обчислено для верхньої частини за виразом (14), а для нижньої – (18).

$$P_{B1}(y) = \gamma \cdot g \cdot \frac{r - \frac{y}{\operatorname{tg}\alpha}}{k_1 - \frac{3}{\operatorname{tg}\alpha}} + \frac{\gamma \cdot g \cdot \frac{(1 - e^{-k_2 \cdot h_2})}{k_2} - \frac{\gamma \cdot g \cdot r}{k_1 - \frac{3}{\operatorname{tg}\alpha}}}{r^{k_1-2}} \cdot \left(r - \frac{y}{\operatorname{tg}\alpha} \right)^{k_1-2}. \quad (18)$$

Проте, в практиці проектування ємнісних споруд для вибору конструкції та розмірів перерізу бокових стінок потрібно знати не вертикальний, а нормальний до поверхні стінки тиск. Адже його розподіл виявляється дещо іншим за розподіл вертикального тиску.

Відповідно до розробленої авторської моделі, нормальний тиск може бути знайдений мно-

женням виразу для вертикального тиску на коефіцієнт нормального тиску. Для розглядуваного випадку такі вирази будуть мати вигляд для верхньої частини (19), а для нижньої – (20).

$$P_{n1}(y) = k_{n1} \cdot P_{B1}(y), \quad (19)$$

$$P_{n2}(y) = k_{n2} \cdot P_{B2}(y), \quad (20)$$

де P_{n1} і P_{n2} – нормальний тиск в верхній та нижній частинах ємнісної споруди, відповідно.

Графічне представлення наведених залежностей може бути легко отримано за допомогою, наприклад, одного з сучасних математичних пакетів – MathCAD.

В якості прикладу розглянемо ємність із наступними геометричними параметрами: $r = 3$ м, $h_2 = 4$ м, $\alpha = 60^\circ$. Прийемо, що вона заповнена деяким сипучим матеріалом із наступними фізико-механічними характеристиками: $\gamma = 1000$ кг/м³, $\beta = 65^\circ$, $\psi = 20^\circ$, $\varphi = 21^\circ$. Такі параметри приблизно відповідають вугіллю, якщо стінки ємності сталеві [8].

Якщо сипучий матеріал знаходиться у стані статичного спокою, тобто під час тимчасового або довготривалого збереження, то графіки будуть мати вигляд, представлений на рис. 3. Для випадку початку розвантаження ємності графіки будуть мати вигляд, представлений на рис. 4. На кожному з графіків по горизонтальній осі відкладено тиск в кПа, а по вертикальній осі – глибину в м. Для верхньої та нижньої частин ємності прийнято свої нульові точки.

Аналізуючи наведені залежності слід вказати на ряд наступних важливих їх особливостей.

По-перше, для верхньої частини графік має нелінійний вигляд, який із глибиною ємності асимптотично прямує до сталої величини.

По друге, для нижньої частини ємності графік має вигляд, який дуже наближається до лінійного. Це означає, що в практичних розрахунках з невеликою погрішністю можна його вважати таким. При цьому в залежності від стану сипучого середовища кут нахилу цієї прямої до горизонталі буде дещо іншим.

З цього випливає ще одна цікава особливість – на практиці можливим виявляється підібрати певний кут нахилу стінок нижньої частини таким чином, щоб нормальний тиск на стінки виявився або якомога меншим, або максимально наближався до сталого. Це дасть змогу суттєво спростити виконання розрахунково-конструкторських робіт.

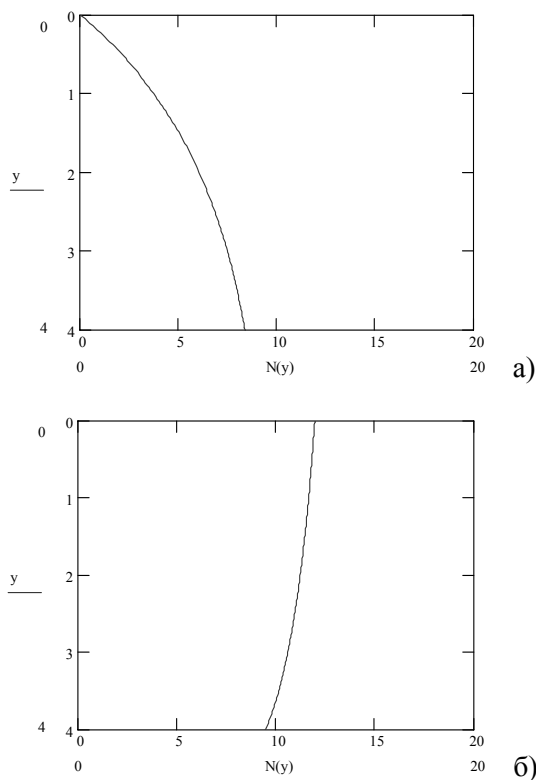


Рис. 3. Нормальний тиск сипучого матеріалу у випадку його статичного стану:
а – верхня частина, б – нижня частина

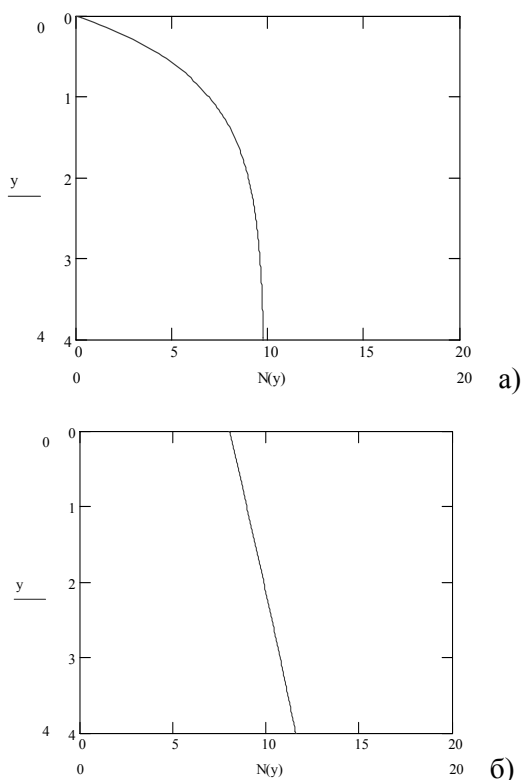


Рис. 4. Нормальний тиск сипучого матеріалу у випадку початку його вивантаження:
а – верхня частина, б – нижня частина

По-третє, в місці з'єднання верхньої та нижньої частин ємності в обох наведених випадках спостерігається кількісний скачок нормального тиску. На практиці це означає, що ця зона є досить небезпечною, оскільки саме в ній можуть відбуватися певні ускладнення напружено-деформованого стану.

По-четверте, порівнюючи тиск в статичному стані та в момент початку вивантаження сипучого матеріалу з ємності, можна констатувати, що в останньому випадку він виявляється вищим. Це означає, що саме цей режим є найбільш небезпечним з точки зору роботи ємнісної конструкції. Проте діюча методика проектування не приділяє йому ніякої уваги. Наслідком цього, як вказано в роботі [9], є наступне: «Промзернопроект, ГидроНИИсельстрой и другие организации [40, 25]¹ проводили обширные исследования деформаций и аварий железобетонных силосов в стране. Одна из основных причин преждевременного разрушения силосов – наличие давлений, значительно превосходящих расчетные формулы Янсена. Было отмечено: 1. Разрушение обычно имело место в момент выпуска сыпучего материала... До сих пор нет ясного представления причин появления избыточных давлений...».

Завважимо, що наведені закономірності притаманні далеко не тільки розглянутому чисельному прикладу. Авторський досвід роботи свідчить, що вони справедливі для досить широкого кола геометричних параметрів ємностей та значної кількості типів сипучих матеріалів.

6. Основні висновки по роботі

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

1. Розроблена авторська дискретно-континуальна модель сипучого середовища в замкненій ємнісній споруді може бути використана для достатньо складних конструкцій, які мають декілька, принаймні дві, ступені довільної форми.

2. У випадку досить поширеної в практиці двоступінчастої ємнісної конструкції отримані теоретичні залежності для визначення тиску сипучого матеріалу мають вигляд не дуже складних залежностей, які достатньо просто можуть бути представлені у наочному графічному вигляді за допомогою сучасних пакетів математичних програм.

¹ Джерела літератури вказані за роботою [9].

3. У верхній частині ємності розподіл нормального тиску на її стінки має нелінійний вигляд, який із збільшенням глибини асимптотично прямує до певної сталої величини.

4. Для нижньої частини ємності нормальний тиск на стінки виявляється близьким до лінійного. Це дає змогу при проведенні практичних розрахунків виконувати оптимізаційний добір певних геометричних параметрів ємності, зокрема кута нахилу її бічних граней, таким чином, щоб отримувати найсприятливіший характер розподілу тиску.

5. Досить небезпечною слід вважати область переходу верхньої частини у нижню, оскільки саме в ній має місце кількісний скачок тиску.

6. При вивантаженні сипучого матеріалу із ємності нормальний тиск на стінки ємності збільшується порівняно зі статичним станом. На думку автора, це є наслідком ефекту перерозподілу структури матеріалу, який був ним встановлений та досліджений раніше [12]. Тому цей режим є більш небезпечним з точки зору роботи ємнісної споруди та має бути розглянутий при проектуванні як основний розрахунковий.

Наприкінці хочемо зазначити, що в цілому розроблена авторська теоретична модель поведінки сипучого середовища в замкненому просторі є достатньо універсальною та дозволяє враховувати як широкий діапазон зміни геометричних параметрів ємнісних конструкцій, їх зовнішньої форми, так і широкий спектр сипучих матеріалів, які наявні в практиці. Розглянутий автором частковий випадок двоступінчастої ємності зовсім не обмежує можливостей моделі. Теоретично за наведеною в статті схемою можуть бути отримані вирази і для багаступінчастих ємностей, навіть із нелінійним окресленням форми їх стінок. Крім цього, досить цікавим представляється автору отримання певних оптимізаційних залежностей, які б дозволяли проектувати споруди із мінімальним тиском або, навіть, мінімальної конструктивною вагою.

Таким чином, дослідження у цьому напрямку не тільки не є завершеними, а й, навпаки, мають ще велику низку невирішених, але практично важливих задач.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. ДБН В.2.2-8-98. Підприємства, будівлі та споруди по зберігання та переробці зерна [Текст]. – Введ. 01.07.98. – К.: Держбуд України, 1988. – 41 с.
2. Руководство по расчету и проектированию железобетонных, стальных и комбинированных бункеров [Текст] / Ленпромстройпроект. – М.: Стройиздат, 1983. – 200 с.
3. Справочник проектировщика инженерных сооружений [Текст] / под ред. Д. А. Коршунова. – К.: Будівельник, 1988. – 352 с.
4. Банников, Д. О. Основные причины аварий жестких стальных бункеров и низких силосов [Текст] / Д. О. Банников, М. И. Казакевич // Металеві конструкції. – 2002. – Т. 5, № 1. – С. 59-66.
5. Bannikov, D. O. Features of Failures of Steel Bunkers (of Pyramidally-prismatic Type) [Текст] / D. O. Bannikov, M. I. Kazakevitch // Proc. of 10th Polish-Ukrainian seminar «Theoretical Foundations of Civil Engineering». – Vol. II. – Warsaw: Warszawskiej Politechnik, 2002. – P. 650-657.
6. Банников, Д. О. Направления совершенствования современной концепции проектирования жестких стальных бункеров [Текст] / Д. О. Банников, М. И. Казакевич // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту заліз. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – 2003. – Вип. 1. – Д.: Вид-во ДНУЗТ, 2003. – С. 130-136.
7. Денисова, Т. Б. Исследование выпускных устройств с целью совершенствования управления расходом зерна на предприятиях по его хранению и переработке: Автореф. дис. ... канд. наук [Текст]. – М.: МТИПП, 1975. – 22 с.
8. Гячев, Л. В. Основы теории бункеров [Текст] / Л. В. Гячев. – Новосибирск: Изд-во НГУ, 1992. – 312 с.
9. Семенов, В. Ф. Бункеры и хранилища зерна: Учеб. пособие [Текст] / В. Ф. Семенов / Алтайский гос. техн. ун-т им. И. И. Ползунова. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 1999. – 221 с.
10. Structural Engineering Handbook [Текст] / Ed. by E. H. Gaylord, Jr. et al. – 4th ed. – McGraw-Hill, 1997. – 624 p.
11. Клейн, Г. К. Строительная механика сыпучих тел [Текст] / Г. К. Клейн. – М.: Стройиздат, 1977. – 256 с.
12. Банников, Д. О. Исследование угла укладки зерен сыпучего материала на модели емкости [Текст] / Д. О. Банников // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту заліз. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – 2008. – Вип. 22. – Д.: Вид-во ДНУЗТ, 2008. – С. 94-100.

Надійшла до редколегії 13.08.2008.