

Банніков Д.О., д.т.н., доц. (Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна)

РАЦІОНАЛЬНА ФОРМА ВИПУСКНОЇ ЧАСТИНИ ЄМНІСНОЇ КОНСТРУКЦІЇ ДЛЯ СИПУЧИХ МАТЕРІАЛІВ

Публікація присвячена визначенню раціональної форми випускної частини ємнісних будівельних конструкцій для сипучих матеріалів. Отримано аналітичну залежність на основі авторської дискретно-континуальної моделі поведінки сипучої речовини в замкненому сосуді. Наведено практичний приклад вибору раціональної форми.

The paper is devoted to determining of rational shape of outfit part of capacity building structures for granular materials. The analytical solution is obtained on the base of author's discrete-continual model of granular medium behavior in a closed vessel. The practical example for choosing of rational shape is presented.

Вступні зауваження. Ємнісні будівельні конструкції для зберігання сипучих матеріалів здебільшого складаються з двох частин – верхньої вертикальної, призначеної для накопичення необхідного об'єму матеріалу та нижньої випускної частини, стінки якої нахилені під певним кутом до горизонталі (рис. 1). Така структура склалася традиційно, а форма кожної з частин споруди приймається за досвідом проектування.

Між тим, як показують дослідження автора, така форма не завжди виявляється раціональною, а в окремих випадках ще й сприяє виникненню небажаних динамічних ефектів при взаємодії із сипучою речовиною. Так, за даними низки робіт [1 - 6], саме невдало обрані геометричні розміри конструкцій призводять до їх відмов під час експлуатації, зменшуючи надійність та довговічність таких споруд. Тому пошук більш раціональної зовнішньої форми ємнісних конструкцій виявляється доволі важливою та актуальною задачею.

Дискретно-континуальна модель сипучої речовини. Дослідження взаємодії сипучого матеріалу з елементами ємнісної будівельної конструкції призвело до розробки автором дискретно-континуальної аналітичної моделі поведінки сипучої середи в замкненому сосуді. Її основні передумови, сутність та отримані залежності наведені в ряді робіт автора [7 - 11]. Там же приведено результати співставлення розробленої моделі з деякими існуючими, в тому числі й офіційно прийнятою моделлю Г. Ясена, яка використовується в діючому нормативному документі [12].

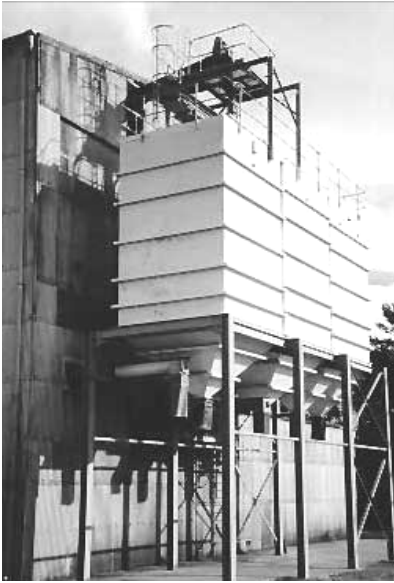


Рис. 1. Загальний вигляд двоступінчастої ємнісної конструкції для зберігання сипучих матеріалів

Дискретно-континуальна модель дозволяє не тільки описати статичні закономірності розподілу тиску сипучого матеріалу в ємнісній конструкції, а й пояснити виникнення певних динамічних ефектів під час руху матеріалу, зокрема ефекту підвищення тиску в момент початку розвантаження. Також ця модель відкриває можливості для пошуку та визначення більш раціональних конструктивних та геометричних форм таких споруд за різноманітними критеріями.

Матеріал даної публікації відображає визначення раціональної форми нижньої випускної частини двоступінчастої вертикальної ємнісної конструкції для сипучих матеріалів, що і є метою дослідження.

Раціональна форма випускної частини. Для відшукування раціональної форми випускної частини в стані спокою сипучого матеріалу (режим зберігання) використаємо загальний вираз (1) розподілу тиску в замкненому сосуді відповідно до дискретно-континуальної моделі:

$$P_n(y) = k_n \cdot e^{-\int f(y) \cdot dy} \cdot (\gamma \cdot g \cdot \int e^{\int f(y) \cdot dy} \cdot dy + C), \quad (1)$$

де $P_n(y)$ – нормальний тиск сипучого матеріалу на стінки сосууду на глибині y від поверхні випускної частини,

γ – щільність сипучого матеріалу,

g – прискорення вільного падіння,

$f(y)$ – допоміжна функція, яка визначається за виразом (2),

k_n – коефіцієнт бокового тиску сипучого матеріалу для стану статичного спокою (режим зберігання), який визначається за виразом (3):

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

$$k_n = \frac{2 \cdot \operatorname{tg}\beta \cdot \operatorname{tg}(\beta - \psi)}{(a_1 + R) \cdot (2 \cdot \operatorname{tg}(\alpha - \varphi) + \operatorname{tg}(\beta - \psi))} \cdot \frac{\cos\varphi}{\cos(\alpha - \varphi)}, \quad (3)$$

де α – кут нахилу бокової стінки сосуду до горизонту на глибині y ,
 β – кут укладки зерен сипучого матеріалу,
 φ – кут зовнішнього тертя сипучого матеріалу о матеріал стінки сосуду,
 ψ – кут внутрішнього тертя сипучого матеріалу,
 a_1 – ширина випускного отвору сосуду (рис. 2),
 $R(y)$ – функція форми бічної поверхні сосуду.

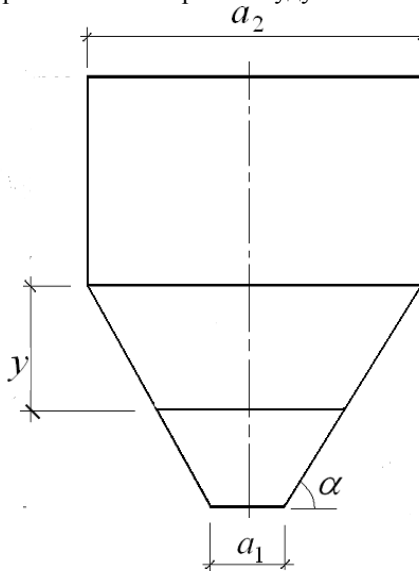


Рис. 2. Основні геометричні розміри ємнісної конструкції

Пошук раціональної форми випускної частини будемо виконувати за критерієм постійності розподілу нормального тиску по висоті випускної частини. Математично він буде мати вигляд виразу (4), що відображує рівність першої похідної нулю:

$$\frac{dP_n(y)}{dy} = 0. \quad (4)$$

Опускаючи проміжні математичні перетворення, отримаємо остаточно вираз для відшукування оптимальної форми нижньої випускної частини двоступінчастої ємнісної будівельної конструкції у вигляді функції форми бокової поверхні $R(y)$ (5):

$$R(y) = \frac{a_2}{\sqrt[4]{1 + 2 \cdot \pi^2 \cdot \frac{\cos \varphi}{a_2 \cdot \operatorname{tg}(\beta - \psi)} \cdot y}}}, \quad (5)$$

де a_2 – ширина впускного отвору сосуду (рис. 2).

Графічно ця залежність для випадку наступних параметрів ємності і фізико-механічних властивостей сипучого матеріалу (вугілля) – $a_2 = 3$ м, $\beta = 65^\circ$, $\psi = 20^\circ$, $\varphi = 21^\circ$ – буде мати вигляд, представлений на рис. 3. По вертикалі відкладено висоту нижньої частини ємності, по горизонталі – її поперечний розмір.

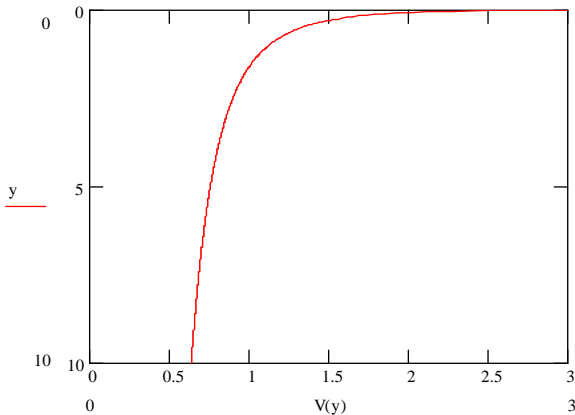


Рис. 3. Форма нижньої частини двоступінчастої ємнісної конструкції за умови постійності нормального тиску

Таким чином, форма нижньої частини має вид кривої, яка різко звужується майже відразу після зони стикування нижньої і верхньої частин конструкції. На практиці, дана зовнішня форма може бути апроксимована, наприклад, 1 – 2 прямими, які утворять ломаний контур нижньої частини ємності.

Для визначення кута нахилу до горизонту дотичної в точках отриманої за виразом (5) кривої слід знайти похідну. Опускаючи математичні перетворення, остаточно вираз буде мати вигляд (6):

$$\alpha(y) = 90^\circ - \operatorname{arctg} \left(\frac{2 \cdot \pi^2 \cdot \frac{\cos \varphi}{\operatorname{tg}(\beta - \psi)}}{4 \cdot \sqrt[4]{\left(1 + 2 \cdot \pi^2 \cdot \frac{\cos \varphi}{a_2 \cdot \operatorname{tg}(\beta - \psi)} \cdot y\right)^5}} \right). \quad (6)$$

Отримана залежність, також, має вигляд функціональної залежності.

Практичне використання отриманих результатів. Проілюструємо використання отриманих залежностей для випадку двоступінчастої ємнісної конструкцій (див. рис. 2). Для практичного використання рекомендується вирази (5) і (6) представити у більш зручному вигляді виразів (7) і (8) за допомогою допоміжного параметру B :

$$R(y) = \frac{a_2}{\sqrt[4]{1 + B \cdot y}}, \quad (7)$$

$$\alpha(y) = 90^\circ - \operatorname{arctg} \left(\frac{a_2 \cdot B}{4 \cdot \sqrt[4]{(1 + B \cdot y)^5}} \right), \quad (8)$$

$$B = 2 \cdot \pi^2 \cdot \frac{\cos \varphi}{a_2 \cdot \operatorname{tg}(\beta - \psi)}. \quad (9)$$

В якості прикладу прийемо ширину впускного отвору ємності по конструктивних осях $a_2 = 6,92$ м, а в якості сипучого матеріалу прийемо вугілля із зазначеними вище фізико-механічними характеристиками.

Тоді, відповідно до виразу (9) параметр B буде дорівнювати:

$$B = 2 \cdot \pi^2 \cdot \frac{\cos \varphi}{a_2 \cdot \operatorname{tg}(\xi - \psi)} = 2 \cdot \pi^2 \cdot \frac{\cos 21}{6,92 \cdot \operatorname{tg}(65 - 20)} = 2,66 \text{ м}^{-1}.$$

Форма бічної поверхні випускної частини буде визначатись функціональною залежністю, графік якої наведено на рис. 4:

$$R(y) = \frac{6,92}{\sqrt[4]{1 + 2,66 y}}.$$

Кут нахилу стінок сосуду до горизонталі відповідно до виразу (8) буде визначатись функціональною залежністю:

$$\alpha(y) = 90^\circ - \operatorname{arctg} \left(\frac{6,92 \cdot 2,66}{4 \cdot \sqrt[4]{(1 + 2,66 \cdot y)^5}} \right).$$

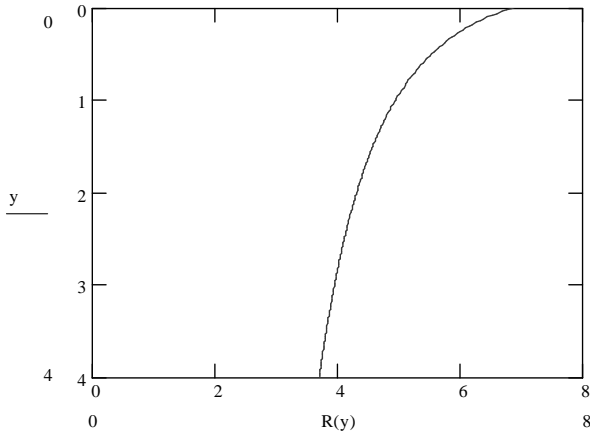


Рис. 3. Форма нижньої частини двоступінчастої ємнісної конструкції для розглядуваного прикладу

Оскільки кут нахилу стінок виявляється змінним по висоту, то рекомендується з метою спрощення конструкції визначити його значення для половини висоти випускної частини. Якщо прийняти її рівною 3,46 м, то для глибини 1,73 м значення кута α буде дорівнювати $\alpha(1,73) = 61,9^\circ \approx 62^\circ$.

1. Лашенко М.Н. Аварии металлических конструкций зданий и сооружений/М.Н.Лашенко. – Л.: Изд-во лит-ры по строит-ву, 1969.–184с. 2. Аугустин Я. Аварии стальных конструкций/Я.Аугустин, Е.Шледзевский.; пер. с польского. – М.: Стройиздат, 1978. – 183 с. 3. Беляев Б.И. Причины аварий стальных конструкций и способы их устранения / Б.И. Беляев, В.С. Корниенко. – М.: Изд-во лит-ры по строит-ву, 1968. – 208 с. 4. Шкинев А.Н. Аварии в строительстве / А. Н. Шкинев. – М.: Стройиздат, 1984. – 320 с. 5. 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. 6. Банников Д.О. Основные проблемы проектирования стальных бункеров транспортной эстакады /Д.О. Банников, М.И. Казакевич // Тематич. вип. зб.: Автомобільні дороги та транспортне будівництво. – К.: Нац. трансп. ун-т.–2002.–№ 64.–С. 86–89. 7. Банников Д.О. Сипучий матеріал в ємнісній конструкції/Д.О. Банников. – Дніпропетровськ: Моноліт, 2009.–172с. 8. Банников Д.О. Континуальна модель тиску сипучого матеріалу в замкненій ємнісній конструкції / Д.О. Банников//Зб. наук. праць: Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди.– Рівне. – 2008. – Вип. 17.–С. 333–340. 9. Банников Д.О. Особливості розподілу тиску сипучого матеріалу в одноступінчастих ємнісних конструкціях/Д.О. Банников //Зб. наук. праць ПолтНТУ: серія “Галузеве машинобудування, Будівництво”. – Полтава: ПолтНТУ. – 2008. – Вип. 21. – С. 79 – 87. 10. Банников Д.О. Тиск сипучого матеріалу на стінки двоступінчастих ємнісних конструкціях / Д.О. Банников // Вісник ДНУЗТ. – Дніпропетровськ: ДНУЗТ. – 2008. – Вип. 23. – С. 143 – 149. 11. Банников Д. О. Визначення коефіцієнта бокового тиску сипучого матеріалу в замкненій посудині / Д. О. Банников // Металеві конструкції. – 2008. – Том 14, № 2. – С. 113 –123. 12. 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.