

УДК 624.954

## АНАЛІЗ ДИНАМІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ СТАЛЕВИХ ЄМНІСНИХ КОНСТРУКЦІЙ ДЛЯ СИПУЧИХ ВАНТАЖІВ

Ловейкін В.С., д.т.н.,

Ковбаса В.П., д.т.н.,

Човнюк Ю.В., к.т.н.,

Ярошенко В.В., інженер,

Костина О.Ю., інженер

*Національний університет біоресурсів і природокористування України*

*Тел. (044) 527-82-99*

**Анотація** - проведений чисельний та аналітичний аналізи динамічних властивостей сталевих ємнісних конструкцій для сипучих вантажів.

**Ключові слова** – конструкція, вантаж, сипучий, властивості.

*Постановка проблеми.* Сталеві ємнісні конструкції експлуатуються досить широко у різних галузях промисловості та сучасного сільського господарства. Вони використовуються для тимчасового та довготривалого зберігання великої кількості різних видів сипучих вантажів (зерно, горох, кукурудза, тощо). Найбільш типовими формами таких споруд є сталеві ємнісні споруди для сипучих вантажів бункерного та силосного типів.

Незважаючи на відносно статичні умови роботи цих споруд, в деяких випадках необхідно враховувати їх динамічну поведінку.

По-перше, завантаження цих конструкцій виконується за допомогою різноманітних машин та механізмів, таких як, наприклад, скипові підйомники, крани-перевантажувачі або конвеєрні стрічки. При цьому сипучий вантаж може падати з деякої висоти у порожню або вже частково завантажену конструкцію.

По-друге, у процесі вивантаження ємності може виникнути ситуація, коли за своїми фізико-механічними характеристиками (кут внутрішнього тертя та кут природного відкосу) сипучий вантаж не може повністю звільнити ємність. Тому необхідно використовувати спеціальні прилади, які призначені для збудження вібраційних коливань, що значно полегшують процес вивантаження/розвантаження.

По-третє, ємнісні конструкції досить часто являють собою не поодинокі споруди, а є елементами значних комплексних конструкцій,

де до несучих елементів прикріплена ще ціла низка інших сталевих конструкцій, машин та механізмів. Тому можливим є розповсюдження динамічних збуджень як від емнісних конструкцій на інші об'єкти технологічного процесу, так і навпаки.

У четвертих, останнім часом набув розповсюдження метод динамічної інтегральної діагностики конструкцій, який дозволяє знаючи початкові динамічні характеристики споруди і порівнюючи їх з вимірними в деякий час експлуатації характеристиками, давати оцінку технічного стану конструкції в цілому. Деякі експериментально-теоретичні засади щодо цього підходу можливо знайти у роботах [1,2].

Отже, у практиці експлуатації інформація щодо динамічної поведінки сталевих емнісних конструкцій для сипучих вантажів у ряді випадків може виявитись дуже корисною. На думку авторів даної роботи, динамічні властивості сталевих/металевих емнісних конструкцій для сипучих вантажів, які знаходяться під впливом вібраційних полів, вивчені ще недостатньо.

*Аналіз публікацій по темі дослідження.* Відомо [2], що незважаючи на досить довгу історію використання (сталевих) емнісних конструкцій, задача оцінки їх власних динамічних характеристик, на жаль, поки не знайшла свого повного теоретичного вирішення. Спеціалізована нормативна та фахово-довідкова література майже не приділяє даному питанню уваги. Так, досить впевнено можна констатувати, що окремих цілеспрямованих спеціалізованих досліджень щодо теоретичної оцінки динамічних властивостей (сталевих) порожніх емностей не проводилось. Це питання розглядається у деяких поодиноких дослідженнях, причому скоріше як супутнє питання [3] або достатньо відокремлено висвітлюється у фаховій літературі [4], маючи при цьому характер лише рекомендацій загального типу. Про систематичний підхід до вказаної задачі говорити поки що зарано.

У роботах [5-9] вищевказана задача була розглянута всебічно у формі чисельного експерименту, котрий не має практичного підтвердження. При цьому використовувався метод скінчених елементів, на основі якого будувались відповідні моделі та визначались власні динамічні характеристики саме сталевих емностей різних типів. Досліджувався також вплив на динамічні параметри конструкції зміни деяких її конструктивних параметрів, зокрема, висоти вертикальної частини споруди, розмірів конструкції та постановки підкріплюючих ребер жорсткості.

Чисельний експеримент проводиться на базі проектно-обчислювального комплексу SCAD for Windows, теоретичний опис якого даний у роботі [10].

Дискретизація скінчено-елементних моделей була виконана згідно правил і особливостей, визначених у [9]. Тип, форма і розміри

скінчених елементів приймалися такими, щоб забезпечити точність отриманих результатів у межах 1 %.

За допомогою розроблених моделей у [5-9] був отриманий спектр власних частот коливань та відповідні форми власних коливань, тобто, по суті, виконана процедура модального аналізу. Визначення власних частот та форм коливань велося стандартними методами найскорішого спуску та ітерації підпросторів [10]. Отримані результати для десяти нижчих частот, наведені у [2], не були порівняні з існуючими у літературі аналогічними показниками спектру власних коливань (отриманими теж чисельними методами [11,12]).

*Метою даної роботи є встановлення спектру частот власних коливань циліндричних оболонок за їх малих прогинів методами, розвиненими у [11] й в уточненій постановці у [12], а також проведення чисельних оцінок власних частот подібних структур при врахуванні впливів різноманітних факторів.*

*Виклад основного змісту дослідження.* Особливості власних коливань замкненої циліндричної оболонки за малих прогинів були встановлені і роботі [11]. Зокрема, квадрат власної частоти коливань визначається таким співвідношенням:

$$\omega_0^2 = \frac{\pi^4 \cdot m^4}{\theta^2 \cdot \eta} \cdot \frac{T_1 \cdot R}{E \cdot h} \cdot \left( \frac{h}{L^2} \right)^2 \cdot c^2, \quad (1)$$

де  $\omega_0$  – частота власних коливань оболонки за малих прогинів;  $R$  – радіус кривизни серединної поверхні;  $m$  – число півхвиль по довжині оболонки;  $L$  – довжина оболонки;  $n$  – число повних хвиль по колу;

$\theta = \frac{m\pi R}{nL}$ ;  $\eta = \frac{n^2 \cdot h}{R}$ ;  $h$  – товщина оболонки;  $E$  – модуль пружності ма-

теріалу;  $c = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$ ;  $\rho$  – щільність матеріалу оболонки;  $c$  – швидкість

розповсюдження поздовжніх хвиль у матеріалі оболонки;  $T_1$  – значення критичного зусилля для оболонки, яке впливає з розв'язку лінійної задачі про стійкість оболонки за її вісьового стискування;

$T_1 = \hat{p}_{\text{сб}} \cdot \frac{Eh}{R}$ ;  $\hat{p}_{\text{сб}} = \frac{1}{12 \cdot (1-\mu)^2} \cdot \frac{(1+\theta^2)^2}{\theta^2} \cdot \eta + \frac{\theta^2}{(1+\theta^2)^2 \cdot \eta}$ ,  $\mu$  – коефіці-

єнт Пуассона. Мінімальне значення  $\hat{p}_{\text{сб}} = \delta_a = \frac{1}{\sqrt{3 \cdot (1-\mu^2)}} \approx 0,605$ . Це

можливо при  $\eta \cdot \left( \theta + \frac{1}{\theta} \right)^2 = \sqrt{12 \cdot (1-\mu)^2} \approx 3,3$ .

Для розрахунку значень  $\omega_0$  використаємо графік, поданий на рис. 2.18 [11]. При цьому параметри, які характеризують геометричні

розміри і форму оболонки, обираємо такими:  
 $L = 14,5\text{ м}; R = 3,75\text{ м}; L/R = 3,87; h = 2 \cdot 10^{-3}\text{ м};$

$$R/h = 1875; n = 7 \dots 10; \omega_{0,\min}^* = \frac{1}{\pi^2} \cdot \frac{\omega_0 \cdot L^2}{c \cdot h}$$

З вказаного вище графіка й обраних геометричних параметрів оболонки маємо  $\omega_{0,\min}^* = 40$  Тоді:

$$\omega_0 = \frac{\pi^2 \cdot \tilde{n} \cdot h \cdot \omega_{0,\min}^*}{L^2}, \quad (2)$$

де  $c = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \approx 5189 \text{ м/с}$  /  $\tilde{n}$  (для матеріалу - сталі).

Отже, згідно (2)  $\omega_0 \approx 19,5 \text{ с}^{-1}$ , а лінійна частота  $f_0 \approx 3,1 \text{ Гц}$ . Ця величина  $f_0(\omega_0)$  відповідає малим прогинам оболонки за наявності позовжньої стискуючої сили.

Визначимо  $\omega_0$ , використовуючи графік рис. 2.18 [11], для таких параметрів  
 $L, R, h: L = 14,5\text{ м}; R = 3,75\text{ м}; L/R = 3,87;$   
 $h = 4 \cdot 10^{-3}\text{ м}; R/h = 937,5; n = 7 \dots 8; \omega_{0,\min}^* \approx 30.$

Тоді, згідно (2) знаходимо  $\omega_0 \approx 29,2 \tilde{n}^{-1}$ , а  $f_0 \approx 4,65 \text{ Гц}$ .

Отже, збільшення товщини оболонки  $h$  вдвічі призводить до збільшення власної (лінійної) частоти коливань на 1,55 Гц.

Розглянемо задачу визначення власних частот коливань циліндричної замкненої оболонки в уточненій постановці, використовуючи результати роботи [12]. При цьому координатна система має вигляд, поданий на рис. 1.

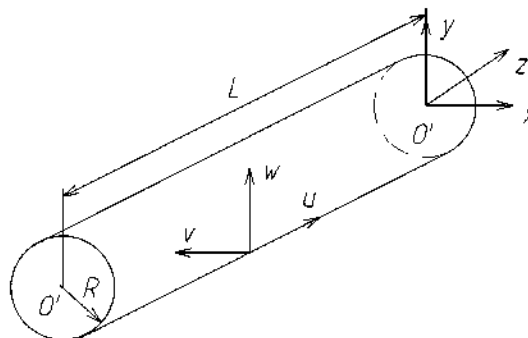


Рис. 1. Координатна система для визначення власних частот коливань замкненої циліндричної оболонки.

Для фіксованих значень  $m$  та  $n$  існують три власні частоти з різним співвідношенням амплітуд  $U, V, W$ . Асимптотичними значеннями цих частот будуть відповідно  $\omega_{0,1}; \omega_{0,2}; \omega_{0,3}$ .

Частота  $\omega_{0,1}$  відповідає згинним рухам кільця:

$$W_{\max} = n \cdot V_{\max}, \quad u = 0. \quad (3)$$

$$\left(\frac{\omega_{0,1}}{\omega_{0,k}}\right)^2 = \frac{h^2}{12R^2} \cdot n^2 \cdot (n^2 - 1)^2 / (n^2 + 1). \quad (4)$$

Частота  $\omega_{0,2}$  відповідає поздовжнім коливанням оболонки:

$$W = v = 0; \quad u = u_{\max}.$$

$$\left(\frac{\omega_{0,2}}{\omega_{0,k}}\right)^2 = (1 - \mu) \cdot \frac{n^2}{2}. \quad (5)$$

Частота  $\omega_{0,3}$  відповідає коливанням розтягу-стискування кільця

$$v_{\max} = n \cdot W_{\max}, \quad u = 0.$$

$$\left(\frac{\omega_{0,3}}{\omega_{0,k}}\right)^2 = n^2 + 1. \quad (6)$$

Величина  $\omega_{0,k}^2 = \frac{E}{\rho \cdot R^2 \cdot (1 - \mu^2)}$  у (4) – (6) є квадратом нижчої

власної частоти у випадку розтягу-стискування кільця при наявності плоскої деформації.

Чисельні розрахунки  $\omega_{0,1}$ ;  $\omega_{0,2}$ ;  $\omega_{0,3}$ ;  $\omega_{0,k}$  були проведені за наступних значень параметрів оболонки:  $\mu = 0,26$ ;  $R = 3,75 \text{ м}$ ;  $\rho = 7,8 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ ;  $E = 2,1 \cdot 10^{11} \text{ Па}$ . Значення вказаних частот набули таких:

$$\begin{cases} \omega_{0,k} \approx 1433 \text{ с}^{-1}; \quad \omega_{0,3} = \sqrt{n^2 + 1} \cdot 1433 \text{ с}^{-1} \approx 1433 \cdot n, \text{ с}^{-1}; \quad f_{0,3} \approx n \cdot 228,1 \text{ Гц}; \\ \omega_{0,2} = \sqrt{(1 - \mu) \cdot \frac{n^2}{2}} \cdot 1433 \text{ с}^{-1} \approx 871,7 \cdot n, \text{ с}^{-1}; \quad f_{0,2} \approx n \cdot 138,7 \text{ Гц}; \\ \omega_{0,1} = \frac{h}{R} \cdot \frac{n \cdot (n^2 - 1)}{\sqrt{n^2 + 1} \cdot \sqrt{12}} \cdot 1433 \text{ с}^{-1} \approx (0,22 \dots 0,44) \cdot n^2, \text{ с}^{-1}; \quad f_{0,1} \approx n^2 \cdot (0,035 \dots 0,07) \text{ Гц}. \end{cases} \quad (7)$$

*Висновки.*

1. Отже, щоб «попасти у резонанс» з  $f_{\text{рез}} = 25 \text{ Гц}$  (частота віброзбуджень оболонки з конгломератом), слід збуджувати у даній оболонці (із заданим  $h$ ,  $R$ ,  $L$ ) при  $n=20$  згини кільця:  $W_{\max} = n \cdot V_{\max}$ ,  $u = 0$ , при  $h = 4 \cdot 10^{-3} \text{ і}$  з частотою (лінійною)  $f_{0,1} \approx (14 \dots 28) \text{ Гц}$ . Однак, подібні форми не збуджуються у такій оболонці, оскільки для останньої є не типовими.

2. При товщині  $h = 2 \cdot 10^{-3} \text{ і}$  оболонки той самий тип (форму) коливань (при  $n=26-27$ ) й частоті  $f_{\text{двф}} = 25 \text{ Гц}$ , виникає для:

$$f_{0,1} = 26^2 \cdot (0,035 \dots 0,07) \approx (23,7 \dots 47,3) \text{ Гц};$$

$$f_{0,1} = 27^2 \cdot (0,035 \dots 0,07) \approx (25,5 \dots 51,0) \text{ Гц}.$$

Такий результат теж є нетиповим для подібних оболонок.

3. Частоти  $f_{0,2}$  й  $f_{0,3}$  навіть при  $n=1$  набагато більше 25 Гц.

4. Отже, віброзбудження з частотою  $f_{рез.} = 25 Гц$  є безпечними для сталевих замкнених циліндричних оболонок з геометричними параметрами ( $h = (2...4) \cdot 10^{-3} м$ ;  $R = 3,75 м$ ;  $L = 14,5 м$ ). Слід зазначити, що вказані геометричні параметри силосів/бункерів є типовими і такі конструкції використовуються для зберігання сипучих (зокрема, сільськогосподарських) матеріалів.

5. Отримані результати можуть бути у подальшому використані для уточнення й вдосконалення існуючих інженерних методів розрахунку подібних систем.

#### Література.

1. Аэродинамика электросетевых конструкций/ [Горохов Е.В., Казакевич М.И., Шаповалов С.Н., Назим Я.В.]. – Донецк, 2000. – 336 с.
2. Банников Д.О. Експериментальні дослідження динамічних властивостей сталевих ємнісних конструкцій для сипучих вантажів/ Д.О. Банников // Підйомно-транспортна техніка. – 2008. -№4. – С. 79 – 88.
3. Динамические испытания и диагностика бункерной этажерки / А.М. Югов, С.В. Колісниченко, Д.В. Шевченко [та ін.]// Вісник Дон ДАБА: Будівельні конструкції. Будівлі та споруди. – Макіївка: Дон ДАБА. – 2001. – Вип. 4(29). – С. 47 – 53.
4. Руководство по расчёту и проектированию железобетонных, стальных и комбинированных бункеров/ Ленпромстройпроект. – М.: Стройиздат, 1983. – 200с.
5. Банников Д.О. Прочность и динамические свойства пирамидально-призматических бункеров для сыпучих материалов/ Д.О. Банников // Вісник Дон ДАБА: Композиційні матеріали для будівництва. – Макіївка: Дон ДАБА. – 2001. – Вип. 2001. – 1(26). – С. 116 – 121.
6. Банников Д.О. Динамическая диагностика конструкции стального бункера/ Д.О. Банников, М.И. Казакевич // Збірник наукових праць: Фізичні методи та засоби контролю середовищ, матеріалів та виробів. – Київ – Львів: Фіз.-мех. ін.-т ім. Г.В. Карпенка. – 2001. – Вип. 6. – С. 214 – 218.
7. Банников Д.О. Мониторинг стальных бункеров/ Д.О. Банников // Збірник наукових робіт ДНУЗТ: Будівництво. – Дніпропетровськ: Вид-во ДНУЗТ. – 2002. – Вип. 11. – С. 38 – 41.
8. Банников Д.О. Исследование прочности пирамидально-призматических бункеров: дис. ... кандидата техн. наук: 05.23.01/ Банников Дмитрий Олегович. – Днепропетровск, 2000. – 140с.
9. Банников Д.О. Расчет пирамидально-призматических бункеров методом конечных элементов/ Д.О. Банников, М.И. Казакевич. – Днепропетровск, 2003. – 150с.
10. SCAD для пользователя/ В.С. Карпиловский, Э.З. Криксунов, А.В. Перельмутер и др. – К.: ВВП Компас, 2000. – 332с.

11. Вольмир А.С. Нелинейная динамика пластинок и оболочек/ Вольмир А.С. – М.: Наука, 1972. – 432с.
12. Forsberg K. // AIAA Journal. – 1964. – V.2, No. 12.

## **АНАЛИЗ ДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ЕМКостей КОНСТРУКЦИЙ ДЛЯ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ**

Ловейкин В.С., Ковбаса В.П., Човнюк Ю.В.,  
Ярошенко В.В., Костина О.Ю.

### *Аннотация*

**Проведен численный и аналитический анализ динамических свойств стальных ёмкостных конструкций для сыпучих грузов.**

## **ANALYSIS OF DYNAMIC PROPERTIES OF METALLIC CAPACITIES OF CONSTRUCTIONS FOR FRIABLE MATERIALS**

V. Lovejkin, V. Kovbasa, Y. Chovnuk,  
V. Yaroshenko, O. Kostina

### *Summary*

**It is carried out numerical and analytical analyses of dynamic properties of steel capacitor designs for loose cargoes.**