

УДК 624.042

## **Розрахунок покрівель силосних ємностей великих діаметрів**

**Лапенко О. І.**, д-р техн. наук, **Махінько Н. О.**, канд. техн. наук

Національний авіаційний університет, Україна

**Анотація.** В статті наведено методику розрахунку напружено-деформованого стану конусних покрівель вертикальних циліндричних силосів збільшених діаметрів на дію основних груп навантажень. У дослідженні прийнято ряд припущень. Зокрема, спирання головних радіальних ребер покрівлі шарнірне та співвісне з вертикальними ребрами жорсткості корпусу. Вплив другорядних елементів покрівлі, які забезпечують додаткову просторову жорсткість, не враховується. Такі вихідні положення дозволяють виконувати розрахунок усіх елементів покрівлі за плоскими розрахунковими схемами. Розрахунок головних радіальних ребер проводиться методом сил і враховує присутність декількох кілець жорсткості та другорядних балок, а також допускає можливі переміщення для нижніх точок ребер у місці спряження покрівлі та стінки ємності. Дія нерівномірно розподіленого навантаження різної інтенсивності на всіх ділянках замінюється еквівалентним завантаженням. Це дозволяє запропонувати зручні для практичного використання процедури визначення внутрішніх зусиль та переміщень для головних, другорядних і кільцевих ребер. Другорядні радіальні ребра покрівлі розраховуються як елементи, що працюють лише на згин, а кільцеві – на згин зі стиском. Остаточну перевірку напружено-деформованого стану покрівлі як просторової системи проведено методом скінченно-елементного аналізу.

**Ключові слова:** силос, конічна покрівля, головні ребра, кільця жорсткості, еквівалентне навантаження, внутрішні зусилля та переміщення.

**Вступ. Постановка проблеми.** Перевірка напружено-деформованого стану покрівлі силосної ємності як просторової системи, в загальному випадку, проводиться методами скінченно-елементного аналізу. Певно, що точність даного розрахунку, при правильному введенні граничних умов та раціонально обраній розрахунковій схемі, не підлягає сумніву. Проте формулювання альтернативної аналітичної інженерної методики розрахунку дозволяє значно скоротити трудомісткість ітераційних обчислень та є важливою процедурою для розуміння загальних закономірностей розподілу внутрішніх зусиль в елементах покрівлі.

**Аналіз останніх досягнень і публікацій.** Дослідження конічних дахів силосних ємностей та аналогічних будівельних об'єктів під дією найбільш характерних навантажень зустрічаються в теоретичних та експериментальних роботах [1–7].

Розрахунок покрівель різної конфігурації, які складаються лише з головних ребер, а також з проміжним кільцем жорсткості чи з другорядними балками для ємностей малого діаметру досить детально було проаналізовано в [8]. Дане дослідження є логічним продовженням зазначеної праці та сфокусоване на покрівлях силосних ємностей збільшеного розміру.

**Мета роботи.** Метою даного дослідження є вивчення напружено-деформованого стану конструкцій покрівлі вертикальної циліндричної силосної ємності, що налічує декілька кілець жорсткості та другорядні балки, а також формування методологічно обґрунтованих та математично простих залежностей для визначення внутрішніх зусиль та переміщень в усіх елементах конструкції.

**Основна частина.** Конусна покрівля циліндричної силосної ємності являє собою сумісну просторову систему, яка складається з радіальних прямолінійних ребер, що з'єднані між собою декількома кільцями жорсткості (рис. 1).

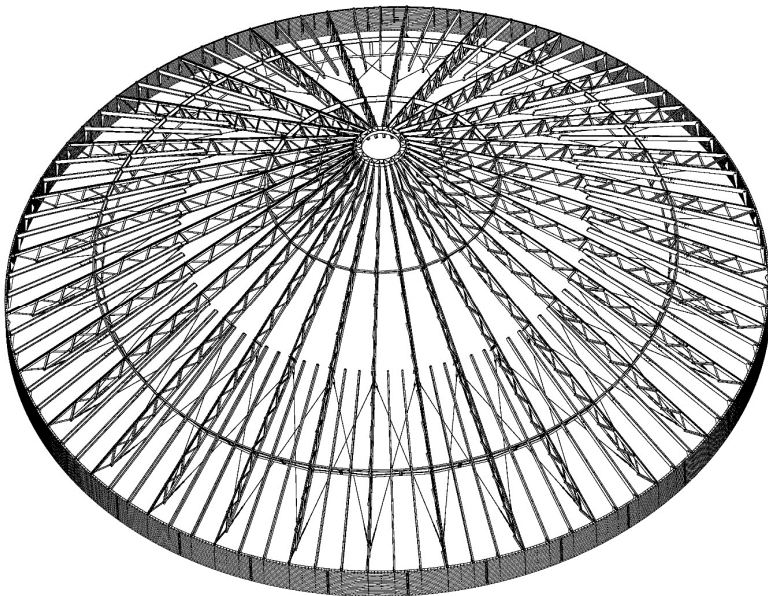


Рис. 1. Загальний вигляд фермової покрівлі циліндричної ємності

Для ємностей великого діаметру радіальні ребра виконуються у вигляді ферм. За принципом роботи вони поділяються на головні та другорядні, розміщені між ними. Головні ребра спираються на стінку ємності та центральне жорстке кільце, а другорядні – на кільцеві ребра, які шарнірно прикріплені до головних.

Аналіз робочої документації силосів дозволяє зробити висновок, що кількість кілець жорсткості для ємностей великого діаметра при  $D_w > 14000$  мм не перебільшує трьох (для силосних ємностей діаметром 30000 мм), тому в подальшому розглядаються розрахункові схеми з таким обмеженням.

Основними навантаженнями для конусних покрівель силосів є власна вага конструкцій –  $g_m = \gamma_{f,g} g_0$  та технологічного обладнання (вага термпідвісок та надсилосної галереї) –  $F_m = \gamma_{f,F} F_0$ , швидкісний напір вітру –  $W_m = \gamma_{f,W} C_{aer}(\varphi) W_0$  (з окремим розглядом аеродинамічного коефіцієнта  $C_{aer}$ ) та снігове навантаження –  $S_m = \gamma_{f,S} \mu(\varphi) S_0$  (з окремим розглядом коефіцієнта розподілу снігового покриву  $\mu(\varphi)$ ).

Принципова розрахункова схема для головного радіального ребра покрівлі з двома кільцями жорсткості наведена на рис. 2. Вона відрізняється від схем для ємностей малого діаметру [8] введенням у точці А шарнірно-рухомої опори та умовної затяжки кінцевої жорсткості на рівні даної опори. Цими діями допускаються зміщення для нижньої точки ребра, оскільки для покрівель великого діаметру, які мають великий розпір на рівні основи, жорсткість опорної обичайки може виявитися недостатньою, що вплине на величину та характер розподілу зусиль у головному ребрі.

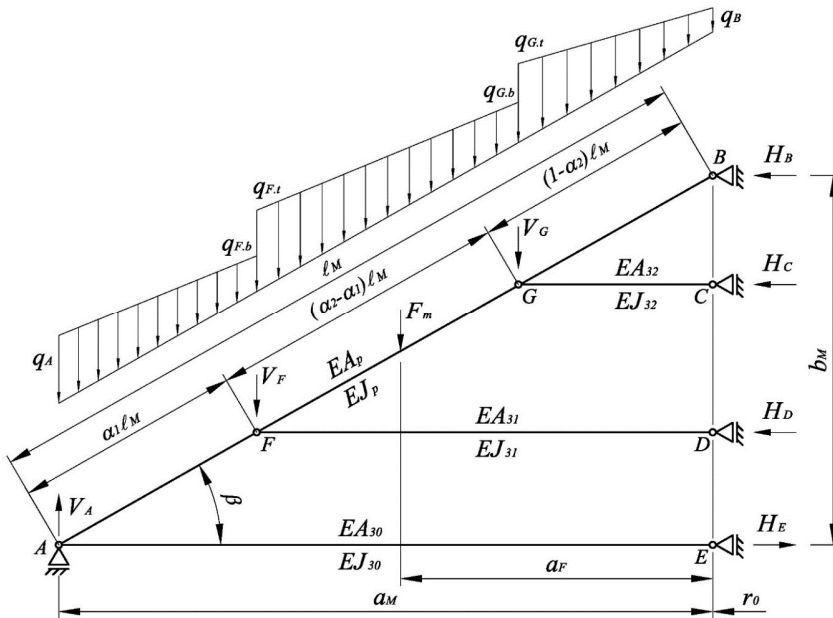


Рис. 2. Розрахункова схема головного радіального ребра жорсткості для покрівель із двома проміжними кільцями жорсткості та другорядними балками

Умовні позначення на рисунку:  $l_M = R_w(1 - \Delta_D) / \cos \beta$  – довжина головної балки;  $\beta$  – кут нахилу покрівлі до горизонту;  $\Delta_D$  – відношення діаметра центрального кільця жорсткості  $d_0$  до діаметра ємності  $D_w$  (або співвідношення відповідних

радіусів  $r_0 / R_w$ );  $\alpha_j$  – часткові коефіцієнти, що вказують, яка частина довжини головної радіальної балки  $\ell_M$  припадає на другорядну відповідного кільця жорсткості;  $EA, EJ$  – відповідно, приведена поздовжня та згинальна жорсткості.

До числа факторів, які ускладнюють розрахункову схему ребра, відноситься необхідність розгляду на трьох ділянках елемента нерівномірно розподіленого навантаження різної інтенсивності та двох зосереджених сил  $V_F$  і  $V_G$ , покликаних схематизувати опорний тиск кільцевих ребер першого та другого ярусів. Значення цих навантажень залежать від сумарного розрахункового навантаження на  $1 \text{ м}^2$  покриття  $g_\Sigma$  та геометрії покрівлі

$$q_A = q_0 / 3, \quad q_\Lambda = q_0 [1 - \alpha_j (1 - \Delta_D)] / s, \quad q_B = q_0 \Delta_D, \quad q_0 = \pi D_w g_\Sigma / n_M, \\ V_F = 2V_{F.b} + V_{F.t}, \quad V_G = V_{G.b}, \quad (1)$$

де  $n_M$  – кількість головних балок;  $\Lambda \equiv F.b \vee F.t \vee G.b \vee G.t$  – ідентифікатор навантаження;  $j=1 \vee 2$ ;  $s=3 \vee 2 \vee 1$  (для  $F.b$ :  $j=1, s=3$ , для  $F.t$ :  $j=1, s=2$ , для  $G.b$ :  $j=2, s=2$ , для  $G.t$ :  $j=2, s=1$ ).

Сили  $V_{F.b}$ ,  $V_{F.t}$  та  $V_{G.b}$  відповідають опорним реакціям другорядних радіальних балок та можуть бути оцінені за [8].

Самі другорядні радіальні ребра обох ярусів можуть бути розраховані як конструкції, що працюють лише на згин, функція моменту котрих описується залежністю [8]:

$$M_{S,q}(y) = q_A \ell_S^2 \cos(\beta) y \frac{1 + 2A_S - 3yA_S - y^2(1 - A_S)}{6} \quad (2)$$

Розрахунок головного радіального ребра проводиться методом сил, приймаючи в якості основної системи схему з відкинутими опорними реакціями  $H_D$ ,  $H_C$  умовних зтяжок першого та другого кілець жорсткості. Для опорних реакцій основної системи, завантаженої лише нерівномірним розподіленим навантаженням (без урахування сил  $V_F$  і  $V_G$ ), маємо:

$$V_{q,A} = \frac{q_0 \ell_M}{12} \left[ (1 - \Delta_D) (\alpha_1^2 + 3\alpha_2^2) - 2(\alpha_1 + 3\alpha_2) + 6(1 + \Delta_D) \right]; \quad (3)$$

$$H_{q,B} = -H_{q,E} = \frac{q_0 \ell_M}{36 \text{tg} \beta} \left[ 2(1 - \Delta_D) (\alpha_1^3 + 3\alpha_2^3) - 3(\alpha_1^2 + 3\alpha_2^2) + 6(1 + 2\Delta_D) \right]. \quad (4)$$

Подальший точний розрахунок із визначення внутрішніх зусиль призводить до отримання доволі громіздких виразів, що не можуть бути практично застосовані.

У зв'язку з цим, пропонується замінити три ділянки дії нерівномірно розподіленого навантаження (рис. 2) одним, еквівалентної дії (рис. 3). Критерієм еквівалентності будемо вважати тотожність опорних реакцій основної системи при обох варіантах завантаження.

Склавши рівняння рівноваги для основної системи та прирівнявши опорні реакції  $V_{q,A}$  і  $H_{q,B}$ , для інтенсивності еквівалентного навантаження  $q_{A,eqv}$  та її параметра  $\Delta_{eqv} = q_{B,eqv} / q_{A,eqv}$  отримаємо:

$$q_{A,eqv} = \frac{4V_{q,A} - 6H_{q,B} \operatorname{tg} \beta}{\ell_M}, \quad \Delta_{eqv} = -\frac{3H_{q,B} \operatorname{tg} \beta - V_{q,A}}{3H_{q,B} \operatorname{tg} \beta - 2V_{q,A}}. \quad (5)$$

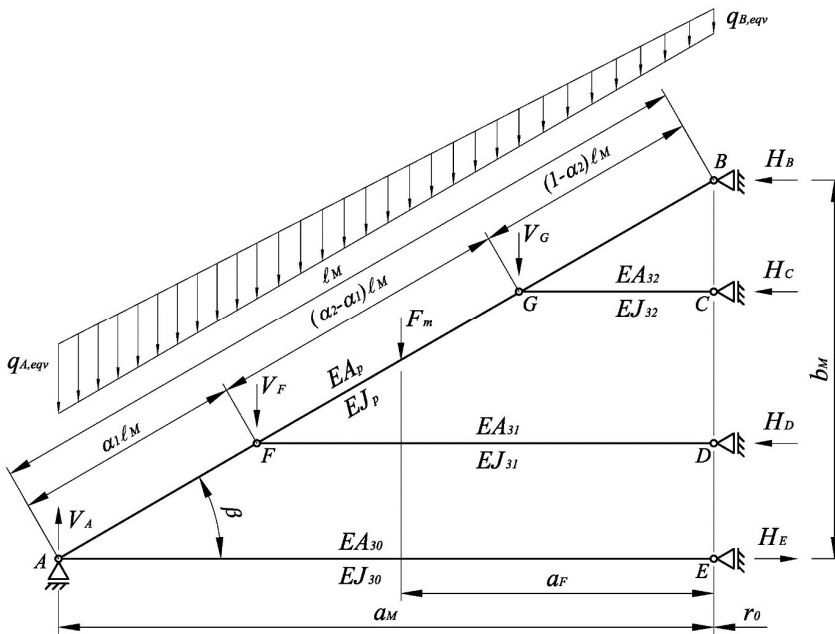


Рис. 3. Розрахункова схема головного радіального ребра жорсткості покрівлі силосної ємності з еквівалентним навантаженням

Відмінності в оцінці внутрішніх зусиль як основної системи, так і фактичної, за обох варіантів рис. 2. та рис. 3, є досить незначними, але перехід до еквівалентного навантаження дозволяє для обчислення зусиль в основній системі від одиничних сил за напрямком відкинутих в'язей і зовнішнього навантаження використовувати формули для покрівель з одним кільцем жорсткості (табл.1, 2) [8].

Таблиця 1

**Одиничні сили для головних радіальних ребер покрівель  
 (за відсутності другорядних ребер)**

Зусилля	Вираз для зусилля
Одинична сила у напрямку відкинутої в'язі	
$N_X(y)$	$0 \leq y \leq 1 - \alpha_1, \quad -\alpha_1 \cos \beta;$ $1 - \alpha_1 \leq y \leq 1, \quad (1 - \alpha_1) \cos \beta$
$Q_X(y)$	$0 \leq y \leq 1 - \alpha_1, \quad \alpha_1 \sin \beta;$ $1 - \alpha_1 \leq y \leq 1, \quad -(1 - \alpha_1) \sin \beta$
$M_X(y)$	$0 \leq y \leq 1 - \alpha_1, \quad \alpha_1 y \ell_M \sin \beta;$ $1 - \alpha_1 \leq y \leq 1, \quad (1 - \alpha_1)(1 - y) \ell_M \sin \beta$
$\delta_{11}$	$\frac{[\alpha_1(1 - \alpha_1) \ell_M \sin \beta]^2 \ell_M}{3EJ_M} + \frac{\ell_3}{EA_3}$

Прийняті табличні позначення:  $y$  – координата, яка відраховується від центрального кільця жорсткості (точки В), уздовж головної радіальної балки;

$$y_F = \frac{a_F}{\ell_M \cos \beta}, \quad \alpha_1 = \ell_1 / \ell_M.$$

При цьому для оцінки зусиль від одиничної сили у напрямку  $G-C$  потрібно замінити  $\alpha_1$  на  $\alpha_2$ . Зусилля від опорного тиску кільцевих ребер  $V_F$  і  $V_G$  знаходять як частковий випадок дії сили  $F_m$ .

Таблиця 2

**Зосереджені сили та нерівномірно розподілене навантаження для головних радіальних ребер покрівель (за відсутності другорядних ребер)**

Зусилля	Вираз для зусилля
Нерівномірно розподілене навантаження	
$N_{p,q}(y)$	$-q_{A,eqv} \ell_M \sin \beta \left( \frac{1+2A_{eqv}}{6 \operatorname{tg}^2 \beta} + y A_{eqv} + y^2 \frac{1-A_{eqv}}{2} \right)$
$Q_{p,q}(y)$	$-q_{A,eqv} \ell_M \cos \beta \left( -\frac{1+2A_{eqv}}{6} + y A_{eqv} + y^2 \frac{1-A_{eqv}}{2} \right)$
$M_{p,q}(y)$	$\frac{q_{A,eqv} \ell_M^2 \cos \beta}{6} y \left[ 1 + 2A_{eqv} - y(3A_{eqv} + y - y A_{eqv}) \right]$
$A_q$	$\frac{q_{A,eqv} \ell_M^4}{720 E J_M} \sin 2\beta \alpha_1 (1 - \alpha_1) \left[ 8(1 + \alpha_1) + 3\alpha_1^2 (\alpha_1 - 4) + \Delta q (1 + \alpha_1) (7 - 3\alpha_1^2) \right]$
Зосереджена сила	
$N_{p,F}(y)$	$\begin{aligned} 0 \leq y \leq y_F, & \quad -F_m \cos^2 \beta (1 - y_F) / \sin \beta; \\ y_F \leq y \leq 1, & \quad -F_m (1 - y_F \cos^2 \beta) / \sin \beta \end{aligned}$
$Q_{p,F}(y)$	$\begin{aligned} 0 \leq y \leq y_F, & \quad F_m (1 - y_F) \cos \beta; \\ y_F \leq y \leq 1, & \quad -F_m y_F \cos \beta \end{aligned}$
$M_{p,F}(y)$	$\begin{aligned} 0 \leq y \leq y_F, & \quad F_m \ell_M y (1 - y_F) \cos \beta; \\ y_F \leq y \leq 1, & \quad F_m \ell_M y_F (1 - y) \cos \beta \end{aligned}$
$A_{1F}$	$\frac{F_m \ell_M^3}{12 E J_M} y_F \alpha_1 \sin 2\beta (1 - \alpha_1^2 - y_F^2), \text{ якщо } y_F \leq \alpha_1$
$A_{1F}$	$\frac{F_m \ell_M^3}{12 E J_M} (y_F - 1) (1 - \alpha_1) \sin 2\beta [1 - \alpha_1 (2 - \alpha_1) - y_F (2 - y_F)], \text{ якщо } y_F > \alpha_p$

Горизонтальні переміщення точок  $D$  і  $C$  від одиничних сил та фактичного навантаження визначаємо за формулою Мора та зводимо до таблиць 3, 4.

Таблиця 3

**Переміщення точок опорних реакцій від одиничних сил та нерівномірного навантаження для головних ребер покрівель із кільцями жорсткості**

Переміщення	Вирази для переміщення, $j = 1, 2$
Переміщення від одиничних сил	
$\delta_{jj}$	$\frac{\sin^2 \beta}{3I_M} \alpha_j^2 (\alpha_j - 1)^2 + \frac{\psi_\alpha(\alpha_j, \alpha_j)}{I_{30}} + \frac{1}{I_{3j}}$
$\delta_{12} = \delta_{21}$	$\frac{\sin^2 \beta}{6I_M} \alpha_1 (\alpha_2 - 1) (\alpha_1^2 + \alpha_2^2 - 2\alpha_2) + \frac{\psi_\alpha(\alpha_1, \alpha_2)}{I_{30}}$
Переміщення від нерівномірно розподіленого навантаження	
$\Delta_{jq}$	$\frac{\alpha_j}{4I_M} \left[ V_{q,A} \sin(2\beta) \left( \frac{1 - \alpha_j^4}{10} + \frac{\alpha_j^3 - \alpha_j^2}{3} \right) - H_{q,B} \sin^2 \beta \left( \frac{1 - 6\alpha_j^4}{15} + \frac{3\alpha_j^3 - 2\alpha_j^2}{3} \right) \right] + H_{q,B} \frac{\psi_\alpha(\alpha_j, 2)}{I_{30}}$

Таблиця 4

**Переміщення точок опорних реакцій від тиску кільцевих ребер та зосередженої сили для головних ребер покрівель із кільцями жорсткості**

Переміщення	Вирази для переміщення, $j = 1, 2$
Переміщення від тиску кільцевих ребер	
$\Delta_{1V}$	$\sin(2\beta) / 12I_M [V_F \Lambda_V(\alpha_1, \alpha_1) + V_G \Lambda_V(\alpha_1, \alpha_2)] + V_\Sigma \psi_\alpha(\alpha_1, 2) / I_{30}$
$\Delta_{2V}$	$\frac{\sin(2\beta)}{12I_M} [V_F \Lambda_V(\alpha_1, \alpha_2) + V_G \Lambda_V(\alpha_2, \alpha_2)] + \frac{V_\Sigma \psi_\alpha(\alpha_2, 2)}{I_{30}}$
$\Lambda_V(\alpha_x, \alpha_y) = \alpha_x (1 - \alpha_y) [1 - \alpha_x^2 - (1 - \alpha_y)^2]$ , $V_\Sigma = \text{ctg } \beta (\alpha_1 V_F + \alpha_2 V_G)$	
Переміщення від зосередженої сили	
$\Delta_{jF}$	$F_m \left[ \frac{\sin(2\beta)}{12I_M} \Lambda_j(\alpha_j, \delta_j) - \frac{\psi_\alpha(\alpha_j, y_F)}{I_{30}} \text{ctg } \beta \right]$
$\Lambda_j(\alpha_j, \delta_j) = (\delta_j - \alpha_j)(\delta_j - y_F) [1 - (\delta_j - \alpha_j)^2 - (\delta_j - y_F)^2]$ ,	
$\delta \left  \begin{array}{l} 0 \leq y_F \leq 1 - \alpha_2 \\ 1 - \alpha_2 < y_F \leq 1 - \alpha_1 \\ 1 - \alpha_1 < y_F \leq 1 \end{array} \right.$	
$\delta_1$	$\begin{array}{ccc} 0 & 0 & 1 \end{array}$
$\delta_2$	$\begin{array}{ccc} 0 & 1 & 1 \end{array}$



Для скорочення запису введемо глобальні позначення для погонних жорсткостей:

$$I_M = \frac{EJ_M}{\ell_M^3}, \quad I_{30} = \frac{2EA_{30}}{D_w}, \quad I_{31} = \frac{EA_{31}}{\ell_{31}}, \quad I_{32} = \frac{EA_{32}}{\ell_{32}} \quad (6)$$

та безрозмірної функції конфігурації покрівлі:

$$\psi_\alpha(\alpha_x, \alpha_y) = (1 - A_D)(1 - \alpha_x)(1 - \alpha_y). \quad (7)$$

З таблиць можна бачити, що погонні жорсткості опорної обичайки  $I_{30}$  ємності та обох кілець покрівлі  $I_{31}$ ,  $I_{32}$  враховуються при обчисленні як одиничних, так і фактичних переміщень основної системи. За рахунок досить великої довжини умовних зтяжок ці жорсткості будуть мати величину значно меншу, ніж у ємностей меншого діаметру, тому нехтувати ними не можна. Виняток складають проектні розрахунки, коли перерізи ребер невідомі. В перевірочних розрахунках, коли перерізи ребер перевіряються або корегуються, їх враховувати варто завжди (навіть у тих випадках, коли просто необхідно впевнитися, що додаткова складова виразів для  $\delta_{jj}$ ,  $\Delta_{jq}$ ,  $\Delta_{jV}$ ,  $\Delta_{jF}$  набагато менше решти).

Невідомі опорні реакції  $H_D$  і  $H_C$  знаходять шляхом рішення класичного канонічного рівняння методу сил. Позначивши через  $\Delta_{\Sigma 1}$  і  $\Delta_{\Sigma 2}$  переміщення від одної або декількох навантажень (таблиці 3, 4), отримаємо:

$$H_D = \frac{\Delta_{1\Sigma}\delta_{22} - \Delta_{2\Sigma}\delta_{12}}{\delta_{12}^2 - \delta_{11}\delta_{22}}, \quad H_C = \frac{\Delta_{2\Sigma}\delta_{11} - \Delta_{1\Sigma}\delta_{12}}{\delta_{12}^2 - \delta_{11}\delta_{22}}. \quad (8)$$

Знаходження функції заданого внутрішнього зусилля  $R_\Sigma(y)$  виконується за формулою:

$$R_\Sigma(y) = R_{\Sigma,p}(y) + R_{XD}(y)H_D + R_{XC}(y)H_C, \quad (9)$$

де  $R_{\Sigma,p}(y)$  – епюри зусиль в основній системі сил від діючих навантажень;  $R_{XD}(y)$  і  $R_{XC}(y)$  – епюри в основній системі сил від одиничних навантажень.

Як небезпечні слід розглядати перерізи в місцях примикання кільцевих ребер та між ними. Якщо на ребро передбачено влаштування термopідвіски, то небезпечним, у більшості випадків, буде переріз під нею.

Після підбору перерізу головного радіального ребра може бути виконано розрахунок кільцевих ребер, що працюють на стиск зі згином. Зусилля стиску в ребрах визначаються за формулою [8]:

$$N_p = n_M / 2\pi (N_b - N_t), \quad (10)$$

де  $N_b$  і  $N_t$  – поздовжні зусилля в головному радіальному ребрі нижче і вище кільцевого ребра жорсткості.

Розрахунковий згинальний момент для ребер першого і другого кільця визначається за відповідними виразами:

$$M_{R,1} = \frac{V_{F.b} \ell_{R,1}}{3} + V_{F.t} \ell_{R,1} / 4, \quad M_{R,2} = V_{G.b} \ell_{R,2} / 4. \quad (11)$$

## **Висновки**

В ході проведеного аналізу було отримано такі результати:

1. Зазначено принципову розрахункову схему для головного радіального ребра покрівлі великого діаметру з двома та більше кільцями жорсткості, що відрізняється присутністю шарнірно-рухомої опори та умовної затяжки кінцевої жорсткості на рівні даної опори.
2. Введення еквівалентного навантаження на ділянках дії нерівномірно розподіленого навантаження різної інтенсивності дозволило для обчислення зусиль в основній системі від одиничних сил за напрямком відкинутих в'язей і зовнішнього навантаження використовувати формули для покрівель з одним кільцем жорсткості.
3. На базі сформульованих пропозицій отримано зручні формули для визначення горизонтальних переміщень точок від одиничних сил та фактичного навантаження.

## **Література**

- [1] Ayuga F. Some unresolved problems in the design of steel cylindrical silos / F. Ayuga // Structures and Granular Solids. – Edinburgh, 2008. – P. 123–133.
- [2] Briassoulis D. Behavior of empty steel grain silos under wind loading: Part 2: the stiffened conical roof shell / D. Briassoulis, D.A. Pecknold // Engineering Structures. – Elsevier, 1987. – Vol. 10, № 1. – P. 57–64.
- [3] Kebeli V. Wind Pressure Coefficients of Conical Roofs on Grain Bins / V. Kebeli, A. Bucklin, K. Gurley // Americas Conference on Wind Engineering (2001, June 3–6). – AAWE, 2001. – P. 1–5.
- [4] Portela G. Wind pressures and buckling of cylindrical steel tanks with a conical roof / G. Portela, L. A. Godoy // Journal of Constructional Steel Research. – Elsevier, 2005. – Vol. 61, № 6. – P. 786–807.
- [5] Ramírez-Gomez A. Full-scale tests to measure stresses and vertical displacements in an 18.34 m-diameter agricultural steel silo roof / A. Ramírez-Gomez, E. Gallego, J. M. Fuentes // Computers and Electronics in Agriculture. – Elsevier, 2014. – Vol. 106. – P. 56–65.

- [6] Meloysund V. Effects of wind exposure on roof snow loads / V. Meloysund, K. R. Liso, H. O. Hygen // Building and Environment. – Elsevier, 2007. – Vol. 42, № 10. – P. 3726–3736.
- [7] E. Gallego. Effects of different snow load arrangements on steel silo roof structures / E. Gallego, J. María Fuentes, A. Ramírez-Gómez // Advances in Structural Engineering. – SAGE, 2017.
- [8] Махінько Н. О Розрахунок напружено-деформованого стану конусних покрівель при симетричному навантаженні / Н. О. Махінько // Вісник ПДАБА. – Дніпро, 2018. – Вип. 1. – С. 74–83.

## **Расчет кровель силосных емкостей больших диаметров**

**Лапенко А. И.,** , д-р техн. наук, **Махінько Н. А.,** канд. техн. наук

Национальный авиационный университет, Украина

**Аннотация.** В статье представлена методика расчета напряженно-деформированного состояния конусных кровель вертикальных цилиндрических силосов больших диаметров на действие основных групп нагрузок. В исследовании принят ряд допущений: в частности, опирание главных радиальных ребер кровли шарнирное и соосно с вертикальными ребрами жесткости корпуса. Влияние второстепенных элементов кровли, которые обеспечивают дополнительную пространственную жесткость, не учитывается. Такие исходные положения позволяют производить расчет всех элементов кровли по плоским расчетным схемам. Расчет главных радиальных ребер производится методом сил и учитывает присутствие нескольких колец жесткости и второстепенных балок, а также допускает возможные перемещения для нижних точек ребер в местах сопряжения кровли и стенки емкости. Действие неравномерно распределенной нагрузки разной интенсивности на всех участках ребра заменяется эквивалентным нагружением, что позволяет предложить удобные для практического использования процедуры определения внутренних усилий и перемещений для главных, второстепенных и кольцевых ребер. Второстепенные радиальные ребра кровли рассчитываются как элементы, работающие только на изгиб, а кольцевые – на изгиб и сжатие. Окончательная проверка напряженно-деформированного состояния кровли как пространственной системы произведена методом конечно-элементного анализа.

**Ключевые слова:** силос, конусная кровля, главные ребра, кольца жесткости, эквивалентная нагрузка, внутренние усилия и перемещения.

## **Calculation of Silos Roof of Large Diameters**

**O. Lapenko, Dr. Sc. (Eng.), N. Makhinko, Cand. Sc. (Eng.)**

National Aviation University, Ukraine

**Abstract.** The paper deals with the calculation technique of the deflected mode of conical roofs of large diameters vertical cylindrical silos at the influence of the main groups of loads. Research has a number of assumptions. Particularly, the lean of the roof main radial ribs is articulated and coaxial with vertical stiffeners of the body. Influence of secondary roof elements which provide additional spatial rigidity is not considered. Such initial positions let us calculate all roof elements accordingly to the flat design diagrams. Calculation of the main radial ribs is made by the force method and considers existence of some ring stiffeners and secondary beams, and also admits possible displacements for low points of the ribs in the

joint of the roof and vessel's wall. Effect of unequally distributed load of different intensity at all areas is changed to equivalent load. It allows proposing procedures convenient for practical use to determine internal efforts and displacements for main, secondary and circular ribs. Secondary radial ribs of the roof are calculated as elements which work only in bending and circular as working ones in bending and in compression. The last check of the roof's deflected mode as a spatial system was made using the method of finite-element analysis.

**Key words:** silo, conical roof, main ribs, ring stiffeners, equivalent load, internal efforts and displacements.

*Надійшла до редколегії 3.12.2018 р.*