

УДК 624.042

doi:10.31650/2707-3068-2019-23-59-67

## ПРАКТИЧНІ ПІДХОДИ ДО РОЗРАХУНКУ КОНІЧНИХ ПОКРІВЕЛЬ СТАЛЕВИХ СИЛОСНИХ ЄМНОСТЕЙ

**Махінько А.В.**, д.т.н., с.н.с.

ТОВ «Етуаль»

pasargada1981@gmail.com, ORCID 0000-0002-9147-7087

**Махінько Н.О.**, к.т.н.

Національний авіаційний університет

pasargada1985@gmail.com, ORCID 0000-0001-8120-6374

**Анотація.** Дана стаття присвячена дослідженню параметрів напружено-деформованого стану елементів конічних покрівель циліндричних силосів виконаних з тонколистових сталевих конструкцій. На практичному прикладі, розглядаються аспекти застосування аналітичного розрахунку внутрішніх зусиль та переміщень для головних радіальних ребр покрівель, виконаних у вигляді ферм з паралельними поясами. Проілюстровані особливості врахування в розрахунковій схемі ребра присутності кільцевих ребер жорсткості, а також запропонована спрощена процедура оцінки діючих навантажень, що полягає у застосуванні еквівалентного навантаження з визначеними параметрами. Числова реалізація дозволяє виконати оцінку точності даного розрахунку та свідчить про простоту його виконання, порівняно з комп'ютерною процедурою на основі методу скінчених елементів.

**Ключові слова.** силос, конічна покрівля, головне радіальне ребро, опорна обичайка, кільця жорсткості, напружено-деформований стан.

**Вступ.** Сучасні проектно-розрахункові комплекси міцнісного аналізу на основі методу скінчених елементів, дозволяють досить легко та з достатньою точністю виконувати розрахунок параметрів напружено-деформованого стану будівельних конструкцій. Проте в деяких випадках виникають задачі, коли використання комп'ютеризованого апарату введення даних, навпаки ускладнює процес рішення. В якості такого прикладу, можна привести оптимізаційні завдання конструкторського пошуку оптимального співвідношення геометричних розмірів несучих конструкцій покрівель ємностей зберігання, які практично завжди утворені тонкостінними профілями різного поперечного перерізу. В процесі встановлення кращих параметрів, інженер стикається з проблемами багатоваріантного геометричного моделювання перерізів з наступним визначенням їх геометричних характеристик, багаторазовими змінами розрахункової схеми та, відповідно, новими процедурами прикладення навантажень та ін. Альтернативним є вирішення такого завдання в простій формі аналітичного розрахунку, результат якого хоча і матиме меншу точність, проте значно зменшить як часову, так і трудову завантаженість конструктора. В подальшому, знайдені рішення, можуть бути верифіковані та уточнені шляхом розрахунку методами скінчено-елементного аналізу.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Методи аналітичного розрахунку будівельних конструкцій історично є базисом наукових досліджень даної галузі науки [1, 2, 3]. Ускладнення інженерних задач з одного боку та загальний технічний прогрес з іншого, призвели до масової популяризації комп'ютерних програм для будівельного проектування, які в реаліях сьогодення за функціональними можливостями можуть бути використані для вирішення практично всіх інженерних задач [4, 5, 6]. Не є винятком і розрахунок тонкостінних конструкцій, дослідженням яких в останні роки приділяється досить багато уваги [7, 8]. Проте в області проектування та розрахунку конструкцій сталевих силосів для потреб аграрного сектору, дана проблематика порушується значно рідше [9, 10, 11].

**Постановка проблеми.** Інженерний розрахунок несучих конструкцій конічних покрівель методами будівельної механіки з урахуванням ряду спрощуючих передумов не

викликає особливих ускладнень [9, 10]. Проте варто розглянути ряд практичних питань, які виникають у випадку конструктивного вирішення головного радіального ребра покрівлі (крокви) у вигляді ферми. Переважно такий тип використовується для силосів з габаритними розмірами діаметрів від 25 м і передбачає в конструкції покрівлі наявність трьох кілець жорсткості.

**Мета та завдання.** Основною метою даного дослідження є ілюстрація особливостей практичного аналітичного розрахунку елементів каркасу конічної покрівлі сталеві силосної ємності, що виконані у вигляді ферм з паралельними поясами. За основу розрахунку використаємо дослідження, виконані авторами в роботах [10, 11] з урахуванням ряду припущень, щодо співосності радіальних ребер покрівлі та вертикальних ребер жорсткості й використанні еквівалентного нерівномірно розподіленого навантаження на всій довжині головного радіального ребра.

**Матеріали і методика досліджень.** Просторова система конструкції конічної покрівлі сталеві силосної ємності утворена прямолінійними кроквяними ребрами, які розміщені в радіальному напрямку та спираються з одного боку на центральне жорстке кільце, а іншим кінцем на кільце жорсткості, що розташоване в місці спряження покрівлі та стіки ємності. Конструктивно ребра виконуються у двох варіантах – у вигляді балки тонкостінного профілю різного поперечного перерізу («Σ»-, «Ω»- або «Z»-профілі та ін.) або ферми з легких сталевих тонкостінних конструкцій (рис. 1).

Розрахункова схема головного радіального ребра утвореного балкою з трьома проміжними кільцями жорсткості ( $n_R = 3$ ) буде мати вигляд похилого стрижня довжиною  $l_M$  з двома шарнірно-рухомими опорами на кінцях, а в рівні спирання ребра на корпус ємності (т. А) буде присутня умовна затяжка кінцевої жорсткості ( $EA_{30}$  та  $EJ_{30}$ ) (див. рис. 2).

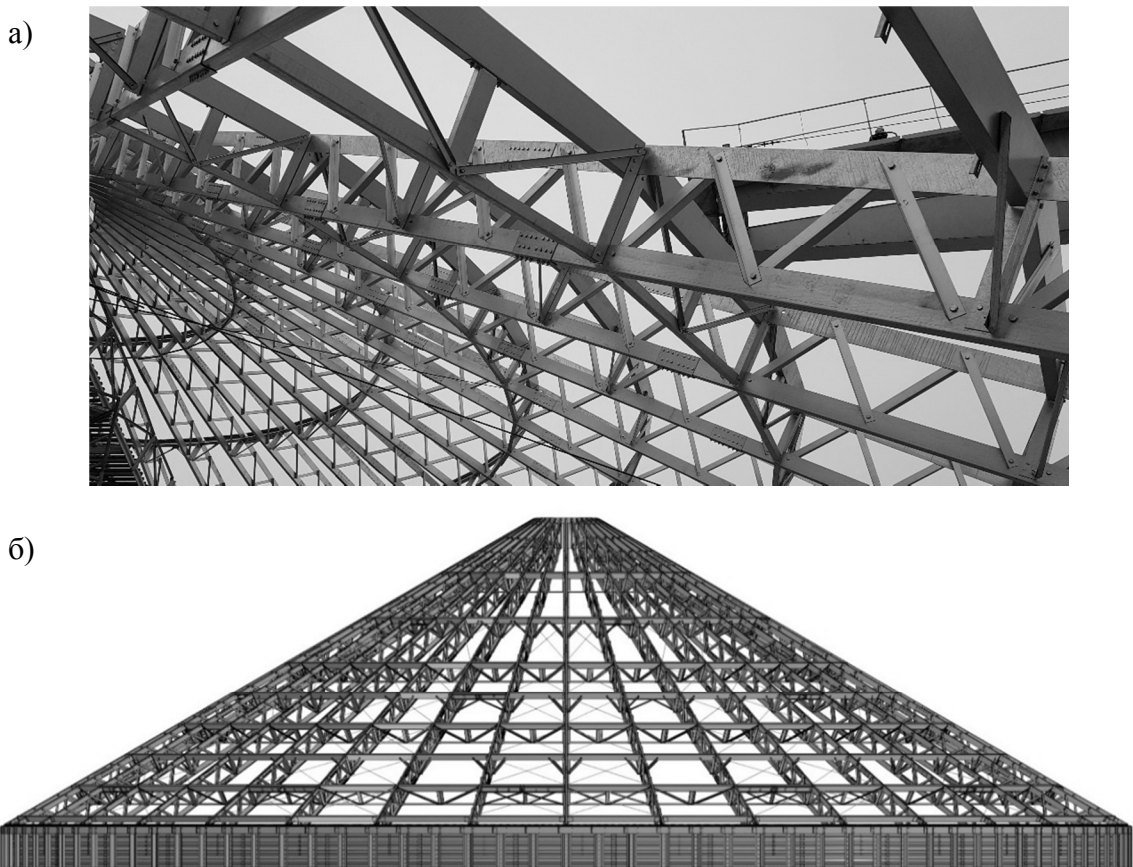


Рис. 1. Просторова система конструкції конічної покрівлі силоса: а – головні ребра у вигляді ферм з паралельними поясами; б – загальна розрахункова схема покрівлі

Довжина головної радіальної балки буде залежати від кута нахилу покрівлі до горизонту  $\beta$  та відношення  $\Delta_D = d_0/D_w$  діаметру центрального кільця жорсткості  $d_0$  до діаметру ємності  $D_w$  (або співвідношення відповідних радіусів  $\Delta_D = r_0/R_w$ ).

$$\ell_M = R_w(1 - \Delta_D) / \cos \beta. \quad (1)$$

Проміжні кільця жорсткості, утворені кільцевими балками, в розрахунковій схемі головної балки замінені затяжками з приведеними поздовжньою та згинальною жорсткістю ( $EA_{3i}$  та  $EJ_{3i}$ ). Положення кожного буде визначатися частковими коефіцієнтами  $\alpha_j$ . Власне довжина кільцевої балки  $j$ -го ярусу знаходитиметься за формулою

$$\ell_{R,j} = \pi D_w [1 - \alpha_j (1 - \Delta_D)] / n_M. \quad (2)$$

За довжиною головне ребро розбивається на чотири ділянки ( $AG$ ,  $GH$ ,  $HK$ ,  $KB$ ), на кожній з яких діє розподілене трапецієвидне навантаження від власної ваги конструкцій та ваги снігового покриву і зосереджені сили  $V_G$ ,  $V_H$  та  $V_K$ , які схематизують опорний тиск кільцевих ребер першого, другого та третього ярусів (рис. 2а). Однією з передумов аналітичного розрахунку за такою схемою є заміна чотирьох ділянок дії нерівномірно розподіленого навантаження одним, еквівалентної дії ( $q_{A,eqv}$  -  $q_{B,eqv}$ ), відповідно рис. 2б.

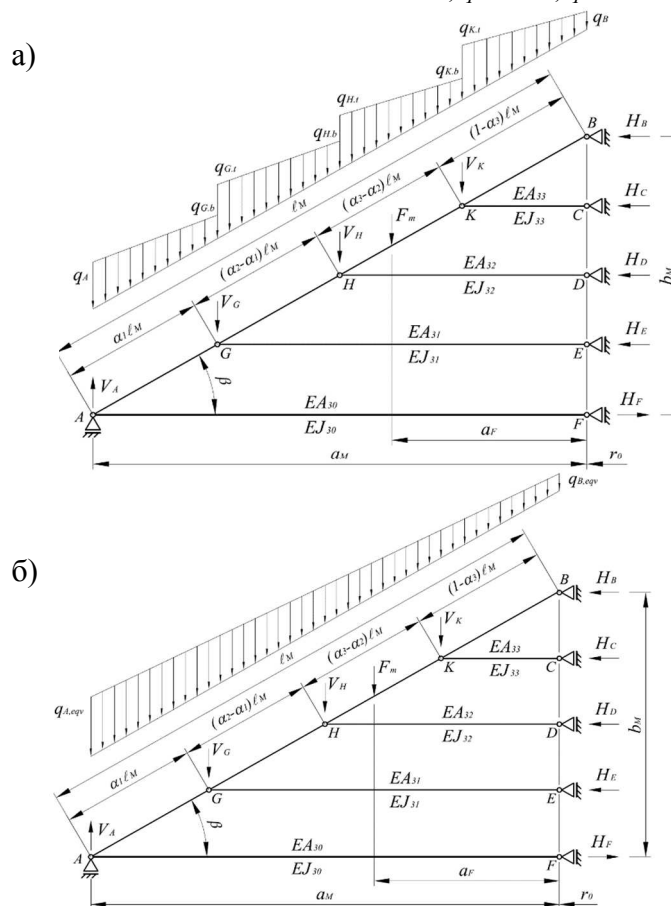


Рис. 2. Розрахункова схема головного радіального ребра жорсткості для покрівель з трьома проміжними кільцями жорсткості та другорядними балками: а – загальна схема прикладення навантаження; б – еквівалентне навантаження

За довжиною головне ребро розбивається на чотири ділянки ( $AG$ ,  $GH$ ,  $HK$ ,  $KB$ ), на кожній з яких діє розподілене трапецієвидне навантаження від власної ваги конструкцій та ваги снігового покриву і зосереджені сили  $V_G$ ,  $V_H$  та  $V_K$ , які схематизують опорний тиск кільцевих ребер першого, другого та третього ярусів (рис. 2а). Однією з передумов аналітичного розрахунку за такою схемою є заміна чотирьох ділянок дії нерівномірно розподіленого навантаження одним, еквівалентної дії ( $q_{A,eqv}$  -  $q_{B,eqv}$ ), відповідно рис. 2б.

Пошук невідомих внутрішніх зусиль в даній розрахунковій схемі виконується методом сил. Дане дослідження та загальний алгоритм розрахунку були наведені в роботах авторського колективу [10, 11].

**Результати досліджень.** Для циліндричних ємностей, які характеризуються особливо великими розмірами, доцільно виконувати головні ребра у вигляді ферм. Найчастіше застосовується варіант ферми з паралельними поясами, розрахункова схема яких матиме наступний вигляд (рис. 3). Проілюструємо можливість застосування методики досліджень [10, 11] на прикладі перевірного розрахунку головного радіального ребра покрівлі силосу діаметром  $D_w = 27,5$  м. Ребро виконане у вигляді ферми з паралельними поясами, рознесеними на відстань  $h_f = 700$  мм і шарнірно закріплені до опорної обичайки і центрального кільця в точках верхнього поясу (див. рис. 3).

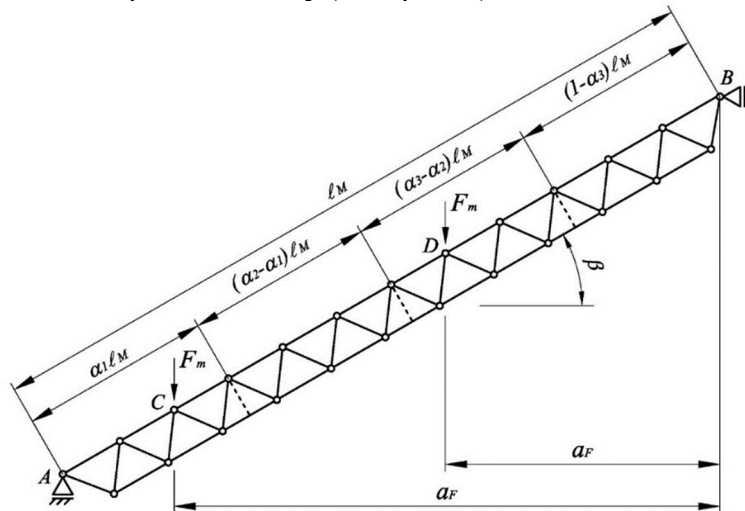


Рис. 3. Схема головного радіального ребра жорсткості покрівлі силосу

Покрівля має ухил  $\beta = 30^\circ$  і передбачає постановку трьох кілець жорсткості таким чином, що  $\alpha_1 = 0,25$ ,  $\alpha_2 = 2\alpha_1$  і  $\alpha_3 = 3\alpha_1$ . Загальна кількість головних радіальних ребер за периметром покрівлі  $n_M = 30$ . Діаметр центрального кільця жорсткості  $d_0 = 1800$  мм. Розрахунок виконаємо на загальне розподілене навантаження  $g_\Sigma = 1$  кПа і зосереджену силу  $F_m = 30$  кН від ваги термopідвісок в двох можливих положеннях, вказаних на рис. 3. Площі елементів покрівлі наведені в таблиці 1.

На першому етапі замінюємо ферму балкою еквівалентного моменту інерції. Так як площі поясів відрізняються, спершу необхідно визначити ординату центру ваги з наступного співвідношення

$$y_f = \frac{A_{fb} h_f}{A_{ft} + A_{fb}} \quad (3)$$

$$J_p \approx A_{ft} y_f^2 + A_{fb} (h_f - y_f)^2 \quad (4)$$

Таблиця 1.

Площі основних елементів покрівлі силосу  $D_w = 27,5$  м

Пояси ферми		Кільцеві ребра жорсткості			Опорна обичайка
верхній	нижній	1-го ярусу	2-го ярусу	3-го ярусу	
$A_{ft} = 10 \text{ см}^2$	$A_{fb} = 5 \text{ см}^2$	$A_{k1} = 7,5 \text{ см}^2$	$A_{k2} = 9 \text{ см}^2$	$A_{k3} = 9 \text{ см}^2$	$A_{k0} = 30 \text{ см}^2$

Відповідно до (3) та (4) для заданого ребра  $y_f = 23,3$  см;  $J_p = 16333,3 \text{ см}^4$ .

Встановивши відношення  $\Delta_D = d_0/D_w = 0,065$ , за (1) і (2) обчислюємо довжину головної балки, довжини кільцевих ребер жорсткості  $j$ -го ярусу) та довжини умовних затяжок  $j$ -го ярусу (при  $j = 1, 2, 3$ )

$$\ell_M = 0,5D_w(1-\Delta_D)/\cos\beta = 14838 \text{ мм},$$

$$\ell_{R,j} = \pi D_w [1 - \alpha_j(1 - \Delta_D)] / n_M = \begin{matrix} j=1 & j=2 & j=3 \\ 2207\text{мм} & 1534\text{мм} & 861,3\text{мм}, \end{matrix}$$

$$\ell_{R,j} = 0,5D_w(1-\alpha_j)(1-\Delta_D) = \begin{matrix} j=1 & j=2 & j=3 \\ 9637,5\text{мм} & 6425\text{мм} & 3212,5\text{мм}. \end{matrix}$$

Обчислюємо безрозмірні параметри навантажень, за схемою рис. 2а, як функцію параметру  $\alpha_j$  (в даному випадку і в подальшому  $\alpha_{j=0} = 0$ )

$$q_0 = \pi D_w (g_m + S_m) / n_M, \quad (5)$$

$$q_B = \pi d_0 (g_m + S_m) / n_M = q_0 \Delta_D, \quad (6)$$

$$q_A = q_0 / 3, \quad (7)$$

де  $g_m$  – власна вага конструкцій даху;  $S_m$  – снігове навантаження;  $(g_m + S_m) = g_\Sigma = 1$  кПа.

Маємо  $q_0 = 2,88$ кН/м,  $q_A = 0,96$ кН/м,  $q_B = 0,188$ кН/м.

$$\Delta_1 = q_{G.b} / q_A, \quad \Delta_2 = q_{H.b} / q_{G.t}, \quad \Delta_3 = q_{K.b} / q_{H.t}, \quad (8)$$

$$\Delta_j = \frac{1 - \alpha_j(1 - \Delta_D)}{1 - \alpha_{j-1}(1 - \Delta_D)} = \begin{matrix} j=1 & j=2 & j=3 \\ 0,766 & 0,695 & 0,561. \end{matrix} \quad (9)$$

Визначаємо реакції другорядних радіальних ребер жорсткості

$$V_G = 2(V_{G.b} + V_{G.t}), \quad V_H = 2V_{H.b} + V_{H.t}, \quad V_K = V_{K.b}. \quad (10)$$

$$V_{G.b} = q_A \alpha_1 \ell_M (2 + \Delta_1) / 6. \quad (11)$$

$$V_{G.t} = q_{G.t} (\alpha_2 - \alpha_1) \ell_M (2 + \Delta_2) / 6, \quad V_{H.b} = q_{G.t} (\alpha_2 - \alpha_1) \ell_M (1 + 2\Delta_2) / 6, \quad (11)$$

$$V_{H.t} = q_{H.t} (\alpha_3 - \alpha_2) \ell_M (2 + \Delta_3) / 6, \quad V_{K.b} = q_{H.t} (\alpha_3 - \alpha_2) \ell_M (1 + 2\Delta_3) / 6. \quad (12)$$

Маємо  $V_{G.b} = 1,50$ кН,  $V_{G.t} = 1,23$ кН,  $V_{H.b} = 1,09$ кН,  $V_{H.t} = 1,22$ кН,  $V_{K.b} = 1,0$ кН.

За формулами (10) визначаємо тиск кільцевих ребер

$$V_G = 5,46$$
кН,  $V_H = 3,4$ кН,  $V_K = 1,0$ кН.

Обчислюємо погонні жорсткості головного ребра та чотирьох умовних затяжок

$$EA_3 = 2\pi EA_k / n_M, \quad EJ_3 = 2\pi EJ_k / n_M. \quad (13)$$

$$I_M = \frac{EJ_M}{\ell_M^3}, \quad I_{30} = \frac{2EA_{30}}{D_w}, \quad I_{31} = \frac{EA_{31}}{\ell_{31}}, \quad I_{32} = \frac{EA_{32}}{\ell_{32}}, \quad I_{33} = \frac{EA_{33}}{\ell_{33}}. \quad (14)$$

$I_M = 10,3$ кН/м,  $I_{30} = 9413$ кН/м,  $I_{31} = 3358$ кН/м,  $I_{32} = 6044$ кН/м,  $I_{33} = 12087$ кН/м.

Застосовуючи вирази для внутрішніх зусиль в основній системі методу сил для головних радіальних ребер покрівель [10, 11], записуємо формули для зусиль в головному радіальному ребрі від одиничних сил, обмежуючись поздовжньою силою та моментом

$N_X$	$0 \leq y \leq 1 - \alpha_3$	$1 - \alpha_3 < y \leq 1 - \alpha_2$	$1 - \alpha_2 < y \leq 1 - \alpha_1$	$1 - \alpha_1 < y \leq 1$	$M_X$	$1 - \alpha_1$	$1 - \alpha_2$	$1 - \alpha_3$
$N_{XE}$	-0,217	-0,217	-0,217	0,650	$M_{XE}$	1,39		
$N_{XD}$	-0,433	-0,433	0,433	0,433	$M_{XD}$	1,86		
$N_{XC}$	-0,650	0,217	0,217	0,217	$M_{XC}$	1,39		

Обчислюємо параметри еквівалентного розподіленого навантаження

$$V_{q,A} = 0,083q_0 \ell_M \left[ (1 - \Delta_D)(\alpha_2^2 + 3\alpha_3^2) - 2(\alpha_2 + 3\alpha_3) + 6(1 + \Delta_D) \right]. \quad (15)$$

$$H_{q,B} = -H_{q,E} = \left[ q_0 \ell_M / (36 \operatorname{tg} \beta) \right] \left[ 2(1 - \Delta_D) (\alpha_2^3 + 3\alpha_3^3) - 3(\alpha_2^2 + 3\alpha_3^2) + 6(1 + 2\Delta_D) \right]. \quad (16)$$

$$q_{A,eqv} = (4V_{q,A} - 6H_{q,B} \operatorname{tg} \beta) / \ell_M, \quad \Delta_{eqv} = -(3H_{q,B} \operatorname{tg} \beta - V_{q,A}) / (3H_{q,B} \operatorname{tg} \beta - 2V_{q,A}). \quad (17)$$

Остаточно отримуємо  $q_{A,eqv} = 0,881$  кН/м;  $\Delta_{eqv} = 0,417$ .

Для функцій зусиль в основній системі від еквівалентного розподіленого навантаження та зосереджених сил від термопідвісок в двох можливих положеннях отримуємо наступні співвідношення

$$N_{p,q}(y) = -(1,72y^2 + 3,09y + 6,36), \quad M_{p,q}(y) = -(14,73y^3 + 3,975y^2 - 54,48y)$$

$$y_{F1} = 1 - 1/12 = 0,833, \quad y_{F2} = 1 - 7/12 = 0,417,$$

$$N_F(y) \quad 0 \leq y \leq y_F \quad y_F < y \leq 1$$

$$M_F(y) \quad 0 \leq y \leq y_F \quad y_F < y \leq 1$$

$$N_{F1}(y) \quad -7,50 \text{ кН} \quad -22,50 \text{ кН},$$

$$M_{F1}(y) \quad 64,26 \text{ кНм} \quad 321,24(1-y) \text{ кНм}.$$

$$N_{F2}(y) \quad -26,25 \text{ кН} \quad -41,25 \text{ кН}$$

$$M_{F2}(y) \quad 224,88 \text{ кНм} \quad 160,62(1-y) \text{ кНм}$$

Помітно, що друге положення більш небезпечне, тому приймаємо його в якості розрахункового.

За аналогічною процедурою конкретизуємо функції зусиль від тиску кільцевих ребер жорсткості (для моментів приводимо максимуми)

$N_V$	$0 \leq y \leq 1 - \alpha_3$	$1 - \alpha_3 < y \leq 1 - \alpha_2$	$1 - \alpha_2 < y \leq 1 - \alpha_1$	$1 - \alpha_1 < y \leq 1$	$M_V$	$1 - \alpha_1$	$1 - \alpha_2$	$1 - \alpha_3$
$N_{VG}$	-2,047	-2,047	-2,047	-4,776	$M_{VG}$	13,15		
$N_{XH}$	-2,542	-2,542	-4,236	-4,236	$M_{VH}$		10,90	
$N_{XK}$	-1,133	-1,636	-1,636	-1,636	$M_{VK}$			2,43

Визначаємо горизонтальні переміщення точок відкинутих в'язей в основній системі. Для порівняльного аналізу розрахунки проводимо у вигляді дробу, в чисельнику якого наведені значення, обчислені з урахуванням жорсткості умовних затяжок, в знаменнику – без них

$$\delta_{11} = \frac{0,638}{0,284}; \quad \delta_{12} = \frac{0,385}{0,348}; \quad \delta_{13} = \frac{0,240}{0,221}; \quad \delta_{22} = \frac{0,696}{0,506}; \quad \delta_{23} = \frac{0,360}{0,348}; \quad \delta_{33} = \frac{0,373}{0,284} \quad \left[ \frac{\text{мм}}{\text{кН}} \right].$$

На даному етапі, без побудови просторової розрахункової схеми, видно, що жорсткість опорного кільця (опорної обичайки) буде досить суттєво впливати на спектр зусиль в головному радіальному ребрі. Тому після прийняття остаточного рішення про переріз опорного кільця, обов'язково має бути виконаний перерахунок головного радіального ребра покрівлі. Для решти переміщень отримуємо

$$A_q = \frac{3,267}{3,813}; \quad A_{2q} = \frac{4,905}{5,270}; \quad A_{3q} = \frac{3,513}{3,696}; \quad [\text{мм}],$$

$$A_V = \frac{4,623}{5,115}; \quad A_{2V} = \frac{6,533}{6,861}; \quad A_{3V} = \frac{4,464}{4,628}; \quad [\text{мм}],$$

$$A_F = \frac{14,470}{16,726}; \quad A_{2F} = \frac{23,737}{25,241}; \quad A_{3F} = \frac{17,556}{18,308}; \quad [\text{мм}].$$

Можна помітити, що переміщення від фактичних навантажень менш чутливі до жорсткості умовних затяжок та ними можна знехтувати (мається на увазі жорсткість затяжки в рівні нижньої опори, оскільки лише вона фігурує у формулах)

Невідомі опорні реакції оцінюємо за наступними співвідношеннями. У фігурних дужках в чисельнику вказане значення, що обчислене без урахування жорсткості умовних затяжок, а в знаменнику – з урахуванням жорсткості лише при обчисленні одиничних переміщень.

$$\begin{aligned}
 H_E &= \left[ A_{1\Sigma}(\delta_{23}^2 - \delta_{22}\delta_{33}) + A_{2\Sigma}(\delta_{12}\delta_{33} - \delta_{13}\delta_{23}) + A_{3\Sigma}(\delta_{13}\delta_{22} - \delta_{12}\delta_{23}) \right] / \Sigma\delta, \\
 H_D &= \left[ A_{1\Sigma}(\delta_{12}\delta_{33} - \delta_{13}\delta_{23}) + A_{2\Sigma}(\delta_{13}^2 - \delta_{11}\delta_{33}) + A_{3\Sigma}(\delta_{11}\delta_{23} - \delta_{12}\delta_{13}) \right] / \Sigma\delta, \\
 H_C &= \left[ A_{1\Sigma}(\delta_{13}\delta_{22} - \delta_{12}\delta_{23}) + A_{2\Sigma}(\delta_{11}\delta_{23} - \delta_{12}\delta_{13}) + A_{3\Sigma}(\delta_{12}^2 - \delta_{11}\delta_{22}) \right] / \Sigma\delta, \\
 \Sigma\delta &= \delta_{33}\delta_{12}^2 - 2\delta_{12}\delta_{13}\delta_{23} + \delta_{22}\delta_{13}^2 + \delta_{11}\delta_{23}^2 - \delta_{11}\delta_{22}\delta_{33}. \\
 H_E &= \frac{-3,15}{\begin{Bmatrix} -8,55 \\ -8,16 \end{Bmatrix}}; \quad H_D = \frac{-28,87}{\begin{Bmatrix} -51,53 \\ -30,0 \end{Bmatrix}}; \quad H_C = \frac{-38,52}{\begin{Bmatrix} -24,00 \\ -37,22 \end{Bmatrix}} \quad [\text{кН}].
 \end{aligned}
 \tag{18}$$

В подальшому визначаємо внутрішні зусилля в ребрі для небезпечного перерізу. В даному випадку їх два – на нижній опорі ребра, де діє максимальна стискаюча сила при нульовому моменті та переріз під термопідвіскою, де діє максимальний згинальний момент

$$N_{\Sigma 1} = -86,0 \text{ кН}, \quad M_{\Sigma 1} = 0; \quad N_{\Sigma 2} = -35,6 \text{ кН}, \quad M_{\Sigma 2} = 38,0 \text{ кНм}.$$

Для зусиль верхнього та нижнього поясу можна записати

$$N_{f,1} = N_{\Sigma 1}(1 - y_f / h_f) \approx -57,4 \text{ кН}, \quad N_{f,2} = N_{\Sigma 2}(1 - y_f / h_f) - M_{\Sigma 2} / h_f \approx -78,0 \text{ кН};$$

$$N_{bt,2} = N_{\Sigma 2} y_f / h_f + M_{\Sigma 2} / h_f \approx 42,5 \text{ кН}.$$

В подальшому перевірка несучої здатності виконується відповідно до [12].

**Висновок.** Наведене дослідження, щодо розрахунку головного радіального ребра конічної покрівлі, виконаного у вигляді ферми з паралельними поясами, ілюструє простоту та універсальність запропонованої аналітичної методики оцінки параметрів напружено-деформованого стану конструкцій покрівель сталевих силосних ємностей.

## Література

1. Баженов В.А. Будівельна механіка і теорія споруд. Нариси з історії / В.А. Баженов, Ю.В. Ворона, А.В. Перельмутер. – К. : Каравела, 2016. – 428 с.
2. Рабинович И.М. Основы строительной механики стержневых систем / И.М. Рабинович. – М.: Стройиздат, 1960. – 516 с.
3. Липницкий М.Е. Купола. Расчет и проектирование / М.Е. Липницкий. – Ленинград : Издательство литературы по строительству, 1973. – 129 с.
4. Chen X. Finite Element Modeling and Simulation with ANSYS Workbench / X. Chen, Y. Liu. – CRC Press, 2018. – 457 p.
5. Семёнов А.А. Металлические конструкции. Расчёт элементов и соединений с использованием программного комплекса SCAD / А.А. Семёнов, А.И. Габитов, И.А. Порываев, М. Н. Сафиуллин, В.В. Юрченко. – М. : СКАД СОФТ, АСВ, 2012. – 338 с.
6. ЛИРА-САПР. Книга I. Основы / Е.Б. Стрелец-Стрелецкий, А.В. Журавлев, Р.Ю. Водопьянов; под ред. А.С. Городецкого. – К. : LIRALAND, 2019. – 154 с.
7. Семко В.О. Сталеві холодноформовані тонкостінні конструкції. Монографія / В.О. Семко. – Полтава : АСМІ, 2017. – 325 с.
8. Рыбаков В.А. Основы строительной механики легких стальных тонкостенных конструкций. Учебное пособие / В.А. Рыбаков. – СПб. : Издательство ПУ, 2011. – 207 с.
9. Махінько Н.О. Геометричні характеристики перерізів тонкостінних елементів силосних ємностей в задачах розрахунку надійності / Н.О. Махінько // Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури. – Одеса : ОДАБА, 2019. – Вип. 74. – С.40-46.
10. Лапенко О.І. Розрахунок покрівель силосних ємностей великих діаметрів / О.І. Лапенко, Н.О. Махінько // Збірник наукових праць Українського інституту сталевих конструкцій ім. В.М. Шимановського. – К., 2019. – Вип. 21-22. – С. 67-77.
11. Махінько Н.О. Розрахунок напружено-деформованого стану конусних покрівель при симетричному навантаженні / Н.О. Махінько // Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури. – Дніпро : ПДАБА, 2018. – Вип.1. – С.74-83.

12. ДБН В.2.6-198:2014. Сталеві конструкції. Норми проектування. – [Чинний від 2015-01-01]. – К. : Мінрегіон України, 2014. – 199 с. – (Державні будівельні норми України).

### References

- [1] V.A. Bazhenov, *Budivelna mekhanika i teoriia sporud. Narysy z istorii*. Kyiv: Karavela, 2016.
- [2] I.M. Rabinovich, *Osnovy stroitelnoi mekhaniki sterzhnevyykh sistem*. Moscow: Stroiizdat, 1960.
- [3] M.E. Lipnitskii, *Kupola. Raschet i proektirovanie*. Leningrad: Izdatelstvo literatury po stroitelstvu, 1973.
- [4] X. Chen and Y. Liu, *Finite Element Modeling and Simulation with ANSYS Workbench*. CRC Press, 2018.
- [5] A.A. Semenov, A.I. Gabitov, I.A. Poryvaev, M.N. Safiullin and V.V. Iurchenko, *Metallicheskie konstruktsii. raschet elementov i soedinenii s ispolzovaniem programmnoho kompleksa SCAD*. Moscow: SKAD SOFT, ASV, 2012.
- [6] E.B. Strelets-streletskii, A.V. Zhuravlev and R.IU. Vodopianov, *LIRA-SAPR. Kniga i osnovy*. Kyiv: LIRALAND, 2019.
- [7] V.O. Semko, *Stalevi kholodnoformovani tonkostinni konstruktsii*. Poltava: ASMI, 2017.
- [8] V.A. Rybakov, *Osnovy stroitelnoi mekhaniki legkikh stalnykh tonkostennykh konstruktsii*. Sankt-Peterburg: Izdatelstvo Politehnicheskogo universiteta, 2011.
- [9] N.O. Makhinko, "Heometrychni kharakterystyky pereriziv tonkostinnykh elementiv sylosnykh yemnostei v zadachakh rozrakhunku nadiinosti," in *Visnyk ODABA*, Vol. 74. Odesa: ODABA, 2019, pp. 40-46.
- [10] O.I. Lapenko and N.O. Makhinko, "Rozrakhunok pokrivel sylosnykh yemnostei velykykh diametriv" in *Zb. nauk. pr. Ukrainskoho instytutu stalevykh konstruktsii im. V.M. Shymanovskoho*, Vol. 21-22. Kyiv: Stal, 2019, pp. 67-77.
- [11] N.O. Makhinko, "Rozrakhunok napruzhenno-deformovanoho stanu konusnykh pokrivel pry symetrychnomu navantazhenni," in *Visnyk PDABA*, Vol. 1. Dnipro: PDABA, 2018, pp. 74-83.
- [12] DBN V.2.6-198:2014. *Stalevi konstruktsii. Normy proektuvannia*. Kyiv: Minrehion Ukrainy, 2014.

### ПРАКТИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ К РАСЧЕТУ КОНИЧЕСКИХ КРОВЕЛЬ СТАЛЬНЫХ СИЛОСНЫХ ЕМКОСТЕЙ

**Махинько А.В.**, д.т.н., с.н.с.

ТОВ «Этуаль»

pasargada1981@gmail.com, ORCID 0000-0002-9147-7087

**Махинько Н.А.**, к.т.н.

Национальный авиационный университет

pasargada1985@gmail.com, ORCID 0000-0001-8120-6374

**Аннотация.** Данная статья касается вопросов изучения напряженно-деформируемого состояния тонколистовых стальных элементов конических покрытий цилиндрических силосов. Современные проектно-расчетные комплексы прочностного анализа, на основе метода конечных элементов, позволяют достаточно легко и с высокой точностью выполнять такой расчет. Однако в некоторых случаях возникают задачи, когда использование компьютеризированного аппарата ввода данных, наоборот усложняет процесс решения. Альтернативным является решение такой задачи в простой форме аналитического расчета. Его результат, хотя и будет иметь меньшую точность, однако значительно уменьшит как временные, так и трудовые затраты инженера. В данной статье рассмотрен ряд практических вопросов, которые возникают, в случае конструктивного решения главного радиального ребра кровли в виде балки тонкостенного профиля или фермы с параллельными поясами. Проиллюстрированы особенности учета в расчетной схеме ребра присутствия кольцевых ребер жесткости, а также предложена упрощенная процедура оценки действующих нагрузок,



которая заключается в использовании эквивалентной нагрузки с определенными параметрами. Поиск неизвестных внутренних усилий в данной расчетной схеме выполняется методом сил. Общий алгоритм заключается в последовательном определении усилий в главном радиальном ребре от единичных сил; вычислении параметров эквивалентного распределенной нагрузки; нахождении функций усилий от данной нагрузки и термоподвесок, а также от давления кольцевых ребер жесткости; определении горизонтальных перемещений точек отброшенных связей в основной системе и величины перемещений; расчете неизвестных опорных реакций и определении внутренних усилий для опасных сечений. Численная реализация позволяет выполнить оценку точности данного расчета и свидетельствует о простоте его выполнения, в сравнении с компьютерной процедурой расчета на основе метода конечных элементов.

**Ключевые слова:** силос, коническая кровля, главное радиальное ребро, опорная обечайка, кольца жесткости, напряженно-деформированное состояние.

## PRACTICAL APPROACHES TO CALCULATION OF CONICAL ROOFS OF STEEL SILO CAPACITIES

**Makhinko A.V.**, Doctor of Engineering., Senior Scientist,  
*ETUAL LLC*,  
pasargada1981@gmail.com, ORCID 0000-0002-9147-7087  
**Makhinko N.O.**, PhD, Assistant Professor,  
*National Aviation University*  
pasargada1985@gmail.com, ORCID 0000-0001-8120-6374

**Abstract.** This article deals with the study of parameters of the stress-strain state of the elements of conical roofs of the cylindrical silos. They are mainly made of the thin sheet steel structures. On the basis of the finite element method modern design and calculation complexes of the strength analysis allow easily and with sufficient accuracy perform such a calculation. However, in some cases there are such problems when using a computerized data-entry machine rather complicates the decision process. The alternative is to solve this problem in a simple form of analytical calculation. Though the result will have less accuracy, but it will significantly reduce both time and work load of a designer. This article considers a number of practical questions that occur in case of a constructive solution of the main radial rib of the roof in the form of a beam of the thin-walled profile or a construction with parallel belts. In the calculation scheme of the rib it was illustrated the features of considering the presence of three annular stiffeners and secondary beams. It was proposed a simplified procedure for estimating current loads, by replacing four sections of unevenly distributed load with one of equivalent action. The search of unknown internal forces in this calculation scheme is performed by the force method. The general algorithm lies in a consistent determination of efforts in the main radial rib from the single efforts; in calculation of parameters of equivalently distributed load; in finding the effort functions of the given load and thermal suspension, as well as of the pressure of the annular stiffeners; in determining the horizontal displacements of points of disconnection in the main system and the magnitude of the displacements; in calculation of unknown support reactions and determination of internal efforts for dangerous sections. The numerical implementation allows estimating the accuracy of this calculation. Also the example demonstrates the simplicity of its implementation, compared to a computer procedure based on the finite element method.

**Keywords.** Silos, conical roof, the main radial rib, support shell ring, stiffening rings, stress-strain state.