

ВИЗНАЧЕННЯ ВУЗЛОВИХ ПЕРЕМІЩЕНЬ В КОНСТРУКЦІЯХ ПРОСТОРОВИХ ЦИЛІНДРИЧНИХ СТЕРЖНЕВИХ ПОКРИТТІВ

Вступ

Одним з основних питань при розрахунку просторових циліндричних стержневих покриттів (рис. 1) є визначення вертикальних і горизонтальних переміщень вузлів для оцінки напружено-деформованого стану просторової конструкції. Вузлові переміщення досягають інколи великих значень і можуть виступати в якості критерію істотної зміни форми покриття аж до втрати його несучої здатності [1–3]. Тому питання визначення переміщень вузлів є актуальним. Подібному питанню присвячена дана стаття, в якій використовуючи відомі залежності та метод розкладання на плоскі грані, запропоновані аналітичні формули для визначення вертикальних і горизонтальних переміщень вузлів.

Визначальні передумови і співвідношення

Згідно теореми Мора переміщення вузлів шарнірно-стержневих систем виражається формулою

$$\Delta_{1F} = \sum \int_0^l \frac{\overline{N}_i N_i dl_i}{EA_i}. \quad (1)$$

Оскільки по довжині стержня поздовжні сили і площа поперечного перерізу постійні, то формула (1) прийме вигляд

$$\Delta_{1F} = \sum \frac{\overline{N}_i N_i l_i}{EA_i}, \quad (2)$$

де N_i – зусилля від навантаження F ; \overline{N}_i – зусилля від одиничного навантаження, яке прикладене у вузлі i для якого визначається прогин за напрямком прогину; l_i – довжина елемента.

Застосування методу розкладання на плоскі грані

Зусилля N_i визначається із виведених раніше формул [4]. Для визначення N_i зручно використовувати поверхні впливу, що проаналізовано авторами [5]. Простота розрахунку за цією методикою полягає у тому, що вона дозволяє легко і наочно вирішувати питання про невідгідне розташування тимчасового навантаження, а також може використовуватись при матричному способі розрахунку.

Застосуємо метод розкладання на плоскі грані. Нумерацію вузлів позначимо двома цифрами. Перша k буде визначати розташування вузла уздовж ребер, друга i – уздовж ламаної лінії покриття. Стержень позначимо чотирма цифрами, де перші дві вказують на його початок, а дві другі – на його кінець. При визначенні зусиль уздовж ребер, k залишається незмінним, а i – змінним. При визначенні зусиль уздовж ламаної лінії покриття (стояків) i незмінне, а k змінне. Для діагональних елементів (розкосів) обидва індекси змінні.

Закон зміни зусиль в стержнях при русі одиничного навантаження дає можливість записати аналітичну залежність для i -го стержня:

– верхнього поясу

$$\overline{N}_{ki,k(i+1)} = -\frac{(j-1)(n-1)}{n} \text{ctg}\varphi, \quad j \leq i; \quad \overline{N}_{ki,k(i+1)} = -\frac{i(n-j+1)}{n} \text{ctg}\varphi, \quad j > i; \quad (3)$$

– нижнього поясу

$$\overline{N}_{(k-1)i,(k-1)(i+1)} = \frac{(j-1)(n-i+1)}{n} \text{ctg}\varphi, \quad j < i; \quad \overline{N}_{(k-1)i,(k-1)(i+1)} = -\frac{(i-1)(n-j+1)}{n} \text{ctg}\varphi, \quad j \geq i; \quad (4)$$

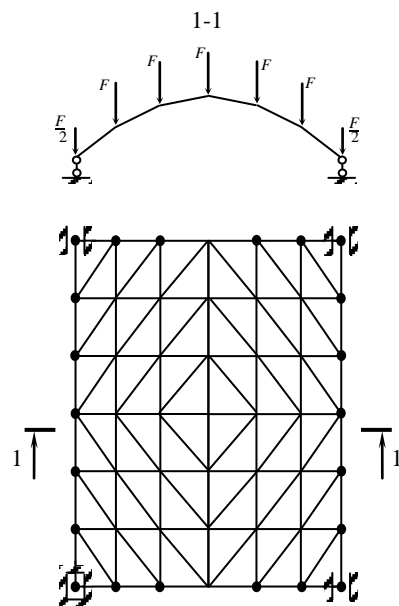


Рис. 1. Конструкція просторового циліндричного стержневого покриття

– розкосів

$$\overline{N_{(k-1)(i+1),ki}} = -\frac{j-1}{n \sin \varphi}, \quad j \leq i; \quad \overline{N_{(k-1)(i+1),ki}} = \frac{n-j+1}{n \sin \varphi}, \quad j > i; \quad (5)$$

– стояків

$$\overline{N_{(k-1)i,ki}} = \frac{j-1}{n}, \quad j < i; \quad \overline{N_{(k-1)i,ki}} = -\frac{n-j+1}{n}, \quad j \geq i. \quad (6)$$

Враховуючи те, що зусилля одержані від одиничного навантаження, а фактично до граней прикладені складові одиниці, помножимо одержані значення на $\overline{F_{k(k-1)}}$ і $\overline{F_{k(k+1)}}$, які дорівнюють:

– при вертикально прикладеному одиничному навантаженні:

$$\overline{F_{k(k-1)}} = \frac{\cos(m-2k+1)\beta}{\sin 2\beta}; \quad \overline{F_{k(k+1)}} = \frac{\cos(m-2k+3)\beta}{\sin 2\beta}; \quad (7)$$

– при горизонтально прикладеному одиничному навантаженні:

$$\overline{F_{k(k-1)}} = \frac{\sin(m-2k+1)\beta}{\sin 2\beta}; \quad \overline{F_{k(k+1)}} = \frac{\sin(m-2k+3)\beta}{\sin 2\beta}. \quad (8)$$

Склавши з відповідними знаками зусилля в стержнях ребра k і підставивши у вирази (3–6) значення складових, одержимо формули для визначення зусиль від вертикально прикладеного одиничного навантаження в елементах просторової конструкції:

$$\overline{N_{(k-1)i,(k-1)(i+1)}} = \frac{(j-1)(n-i+1)\cos(m-2k+1)\beta}{n \sin 2\beta} \text{ctg} \varphi, \quad j < i; \quad (9)$$

$$\overline{N_{(k-1)i,(k-1)(i+1)}} = \frac{(i-1)(n-j+1)\cos(m-2k+1)\beta}{n \sin 2\beta} \text{ctg} \varphi, \quad j \geq i; \quad (10)$$

$$\overline{N_{ki,k(i+1)}} = \frac{(j-1)[(n-i)\cos(m-2k+1)\beta + (n-i+1)\cos(m-2k+3)\beta]}{n \sin 2\beta} \text{ctg} \varphi, \quad j \leq i; \quad (11)$$

$$\overline{N_{ki,k(i+1)}} = -\frac{(n-j+1)[i\cos(m-2k+1)\beta + (i-1)\cos(m-2k+3)\beta]}{n \sin 2\beta} \text{ctg} \varphi, \quad j > i; \quad (12)$$

$$\overline{N_{(k+1)i,(k+1)(i+1)}} = \frac{(j-1)(n-1)\cos(m-2k+3)\beta}{n \sin 2\beta} \text{ctg} \varphi, \quad j \leq i; \quad (13)$$

$$\overline{N_{(k+1)i,(k+1)(i+1)}} = \frac{i(n-j+1)\cos(m-2k+3)\beta}{n \sin 2\beta} \text{ctg} \varphi, \quad j > i; \quad (14)$$

$$\overline{N_{(k-1)(i+1),ki}} = -\frac{(j-1)\cos(m-2k+1)\beta}{n \sin \varphi \sin 2\beta}, \quad j \leq i; \quad (15)$$

$$\overline{N_{(k-1)(i+1),ki}} = \frac{(n-j+1)\cos(m-2k+1)\beta}{n \sin \varphi \sin 2\beta}, \quad j > i; \quad (16)$$

$$\overline{N_{(k-1)i,ki}} = \frac{(j-1)\cos(m-2k+1)\beta}{n \sin 2\beta}, \quad j < i; \quad (17)$$

$$\overline{N_{(k-1)i,ki}} = -\frac{(n-j+1)\cos(m-2k+1)\beta}{n \sin 2\beta}, \quad j \geq i; \quad (18)$$

$$\overline{N_{(k+1)i,k(i+1)}} = \frac{(j-1)\cos(m-2k+3)\beta}{n \sin \varphi \sin 2\beta}, \quad j \leq i; \quad (19)$$

$$\overline{N_{(k+1)i,k(i+1)}} = -\frac{(n-j+1)\cos(m-2k+3)\beta}{n \sin \varphi \sin 2\beta}, \quad j > i; \quad (20)$$

$$\overline{N_{ki,(k+1)i}} = -\frac{(j-1)\cos(m-2k+3)\beta}{n \sin 2\beta}, \quad j < i; \quad (21)$$

$$\overline{N_{ki,(k+1)i}} = -\frac{(n-j+1)\cos(m-2k+3)\beta}{n \sin 2\beta}, \quad j \geq i; \quad (22)$$

У формулах (9–14) і (19–22) k змінюється від 2 до $m/2$, у формулах (15–18) від 2 до $m/2 + 1$. В середньому ребрі ($k = m/2 + 1$) зусилля дорівнюють:

$$\overline{N}_{\left(\frac{m+1}{2}\right)i, \left(\frac{m+1}{2}\right)(i+1)} = -\frac{(j-1)(n-i)}{n \sin \beta} \operatorname{ctg} \varphi, \quad j \leq i; \quad (23)$$

$$\overline{N}_{\left(\frac{m+1}{2}\right)i, \left(\frac{m+1}{2}\right)(i+1)} = -\frac{i(n-j+1)}{n \sin \beta} \operatorname{ctg} \varphi, \quad j > i; \quad (24)$$

Тепер ми маємо всі дані для визначення переміщень будь-якого кута j по ребру k . Зусилля від одиничного навантаження в цьому випадку будуть виникати тільки в елементах грані $k, (k-1)$ і $k, (k+1)$.

Навантаження F прикладене по всьому покриттю і зусилля від нього виникнуть в усіх елементах, але оскільки у формулу (2) входить добуток $\overline{N}_i N_i$, то слід визначати зусилля від F тільки в тих елементах, в яких виникають зусилля від одиниці. Інші добутки $\overline{N}_i N_i$ будуть дорівнювати нулю.

Отже, остаточно формула для визначення прогину по ребру k буде мати такий вигляд:

$$\begin{aligned} \Delta_{kj} = & \sum_{i=1}^n \frac{N_{k-1} \overline{N}_{k-1} l_i}{EA_i} + \sum_{i=1}^n \frac{N_k \overline{N}_k l_i}{EA_i} + \\ & + \sum_{i=1}^n \frac{N_{k+1} \overline{N}_{k+1} l_i}{EA_i} + \sum_{i=1}^n \frac{N_{p(k-1)k} \overline{N}_{p(k-1)k} d_i}{EA_i} + \\ & + \sum_{i=1}^n \frac{N_{pk(k+1)} \overline{N}_{pk(k+1)} d_i}{EA_i} + \sum_{i=1}^n \frac{N_{c(k-1)k} \overline{N}_{c(k-1)k} h_i}{EA_i} + \\ & + \sum_{i=1}^n \frac{N_{c(k+1)k} \overline{N}_{c(k+1)k} h_i}{EA_i}, \end{aligned} \quad (25)$$

де p і c – індекси зусиль в розкосах і стояках; h – висота плоскої грані; d – довжина розкосу.

Якщо прийняти $N/A = R_y$, то в цьому випадку переміщення будуть визначатися так:

$$\begin{aligned} \Delta_{kj} = & \frac{R_y}{E} \left(\sum_1^n \overline{N}_{k-1} l_i + \sum_1^n \overline{N}_k l_i + \sum_1^n \overline{N}_{p(k-1)k} d_i + \sum_1^n \overline{N}_{pk(k+1)} d_i + \right. \\ & \left. + \sum_1^n \overline{N}_{c(k-1)k} h_i + \sum_1^n \overline{N}_{c(k+1)k} h_i \right). \end{aligned} \quad (26)$$

Визначаємо суми зусиль. На основі (9, 10) одержимо

$$\begin{aligned} \sum_1^n \overline{N}_{k-1} = & \left[2 \sum_{i=1}^j \frac{(i-1)(n-j+1) \cos(m-2k+1)\beta}{n \sin 2\beta} + \right. \\ & \left. + 2 \sum_{i=j+1}^{\frac{n+1}{2}} \frac{(j-1)(n-j+1) \cos(m-2k+1)\beta}{n \sin 2\beta} \right] \operatorname{ctg} \varphi, \end{aligned} \quad (27)$$

після перетворень

$$\sum \overline{N}_{k-1} = \frac{(j-1)(n-j) \cos(m-2k+1)\beta}{2 \sin 2\beta}. \quad (28)$$

Використавши цю методику, одержимо значення сум для інших поздовжніх елементів:

$$\sum \overline{N}_k = -\frac{(j-1) \operatorname{ctg} \varphi}{2 \sin 2\beta} [n \cos(m-2k+1)\beta + (n-j) \cos(m-2k+3)\beta]; \quad (29)$$

$$\sum \overline{N}_{k+1} = \frac{n(j-1) \operatorname{ctg} \varphi \cos(m-2k+3)\beta}{2 \sin 2\beta}, \quad (30)$$

а для елементів решітки:

– розкосів

$$\sum \overline{N}_{p(k-1)k} = \frac{(j-1) \cos(m-2k+1)\beta}{\sin \varphi \sin 2\beta}; \quad (31)$$

$$\sum \overline{N}_{pk(k+1)} = -\frac{(j-1) \cos(m-2k+3)\beta}{\sin \varphi \sin 2\beta}; \quad (32)$$

– СТОЯКІВ

$$\sum \overline{N}_{c(k-1)k} = -\frac{j \cos(m-2k+1)\beta}{\sin 2\beta}; \quad (33)$$

$$\sum \overline{N}_{ck(k+1)} = \frac{(j-1) \cos(m-2k+3)\beta}{\sin 2\beta}; \quad (34)$$

Складемо одержані суми і помножимо їх на довжину елементів:

$$\sum N_{реб} l = \frac{l j (j-1) \operatorname{ctg} \varphi}{2 \sin 2\beta} [\cos(m-2k+1)\beta - \cos(m-2k+3)\beta]; \quad (35)$$

$$\sum N_{розк} d = \frac{2l(j-1)}{\sin 2\varphi \sin 2\beta} [\cos(m-2k+1)\beta - \cos(m-2k+3)\beta]; \quad (36)$$

$$\sum N_{стояк} h = \frac{l \operatorname{tg} \varphi}{\sin 2\beta} [j \cos(m-2k+1)\beta - (j-1) \cos(m-2k+3)\beta]. \quad (37)$$

Тут $d = l/\cos \varphi$; $h = l \operatorname{tg} \varphi$.

Склавши одержані результати і виконавши відповідні перетворення, одержимо формулу для визначення переміщень:

$$\Delta_{kz} = \frac{R_y l}{E \sin 2\varphi \sin 2\beta} \left\{ [2(2j-1) + (j-3)j \cos^2 \varphi] \cos(m-2k+1)\beta - (j-1)[4 + (j-2) \cos^2 \varphi] \cos(m-2k+3)\beta \right\}. \quad (38)$$

Нами одержані вертикальні проекції переміщень (за напрямком осі z), горизонтальні ж проекції (за напрямком осі y) визначаються за цією ж формулою, тільки замість косинусів необхідно підставити синуси цих же кутів (замість $\cos(m-2k+1)\beta$, $\cos(m-2k+3)\beta$ підставляємо $\sin(m-2k+1)\beta$, $\sin(m-2k+3)\beta$).

Наведемо деякі приклади знаходження вузлових переміщень в циліндричному стержневому покритті (рис. 2).

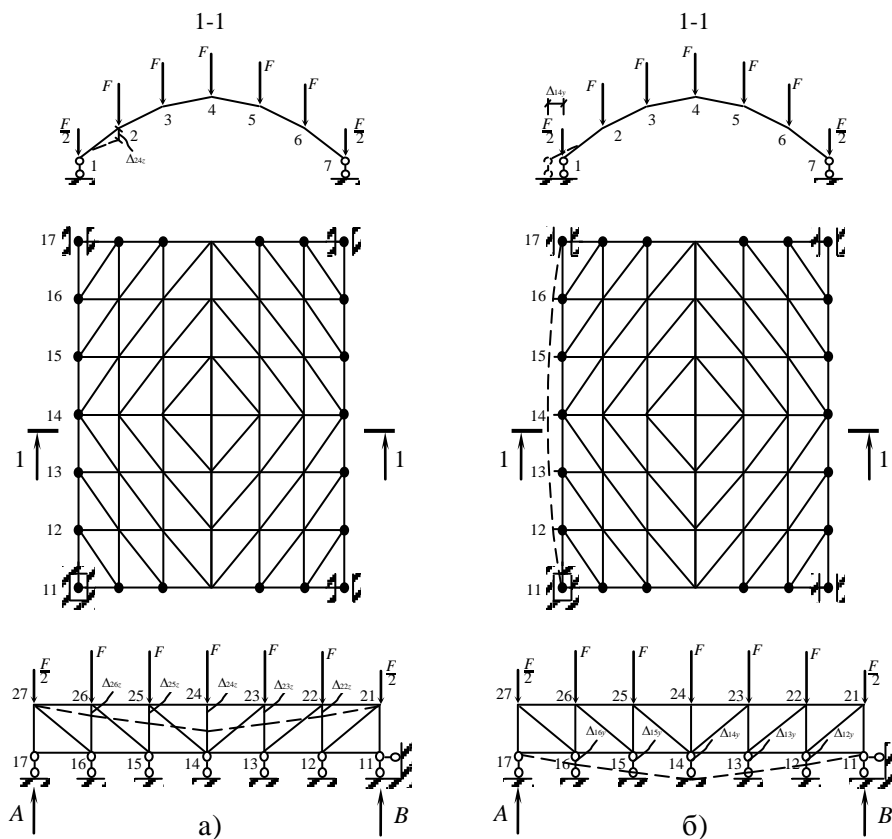


Рис. 2. Характер розподілу вертикальних (а) та горизонтальних (б) вузлових переміщень в нижній граневій фермі циліндричного покриття

Приклад 1. Знайти вертикальні переміщення вузлів для нижньої граневої ферми (рис. 2, а).
Переміщення визначаються за формулою:

$$\Delta_{kz} = \frac{R_y l}{E \sin 2\varphi \sin 2\beta} \left\{ [2(2j-1) + (j-3)j \cos^2 \varphi] \cos(m-2k+1)\beta - \right. \\ \left. - (j-1)[4 + (j-2) \cos^2 \varphi] \cos(m-2k+3)\beta \right\}.$$

Якщо $m = 6$; $j = 2,3,4$; $n = 6$; $\alpha = 110^\circ$; $l = 4$ м; $\varphi = 45^\circ$; $k = 2$; $\beta = 9^\circ$.

Тоді

$$\Delta_{22z} = \frac{2100 \cdot 400}{2,06 \cdot 10^6 \cdot \sin 90^\circ \cdot \sin 18^\circ} \left\{ [2(2 \cdot 2 - 1) + (2-3)2 \cos^2 45^\circ] \cos(6-2 \cdot 2+1)9^\circ - \right. \\ \left. - (2-1)[4 + (2-2) \cos^2 45^\circ] \cos(6-2 \cdot 2+3)9^\circ \right\} = 2,15 \text{ см};$$

$$\Delta_{23z} = \frac{2100 \cdot 400}{2,06 \cdot 10^6 \cdot \sin 90^\circ \cdot \sin 18^\circ} \left\{ [2(2 \cdot 3 - 1) + (3-3)3 \cos^2 45^\circ] \cos(6-2 \cdot 2+1)9^\circ - \right. \\ \left. - (3-1)[4 + (3-2) \cos^2 45^\circ] \cos(6-2 \cdot 2+3)9^\circ \right\} = 3,36 \text{ см};$$

$$\Delta_{24z} = \frac{2100 \cdot 400}{2,06 \cdot 10^6 \cdot \sin 90^\circ \cdot \sin 18^\circ} \left\{ [2(2 \cdot 4 - 1) + (4-3)4 \cos^2 45^\circ] \cos(6-2 \cdot 2+1)9^\circ - \right. \\ \left. - (4-1)[4 + (4-2) \cos^2 45^\circ] \cos(6-2 \cdot 2+3)9^\circ \right\} = 4,82 \text{ см}.$$

Приклад 2. Знайти горизонтальні переміщення вузлів для нижньої граневої ферми (рис. 2, б).
Переміщення визначаються за формулою:

$$\Delta_{kxy} = \frac{R_y l}{E \sin 2\varphi \sin 2\beta} \left\{ [2(2j-1) + (j-3)j \cos^2 \varphi] \sin(m-2k+1)\beta - \right. \\ \left. - (j-1)[4 + (j-2) \cos^2 \varphi] \sin(m-2k+3)\beta \right\}.$$

Якщо $m = 6$; $j = 2,3,4$; $n = 6$; $\alpha = 110^\circ$; $l = 4$ м; $\varphi = 45^\circ$; $k = 1$; $\beta = 9^\circ$.

Тоді

$$\Delta_{12y} = \frac{2100 \cdot 400}{2,06 \cdot 10^6 \cdot \sin 90^\circ \cdot \sin 18^\circ} \left\{ [2(2 \cdot 2 - 1) + (2-3)2 \cos^2 45^\circ] \sin(6-2 \cdot 1+1)9^\circ - \right. \\ \left. - (2-1)[4 + (2-2) \cos^2 45^\circ] \sin(6-2 \cdot 1+3)9^\circ \right\} = -0,03 \text{ см};$$

$$\Delta_{13y} = \frac{2100 \cdot 400}{2,06 \cdot 10^6 \cdot \sin 90^\circ \cdot \sin 18^\circ} \left\{ [2(2 \cdot 3 - 1) + (3-3)3 \cos^2 45^\circ] \sin(6-2 \cdot 1+1)9^\circ - \right. \\ \left. - (3-1)[4 + (3-2) \cos^2 45^\circ] \sin(6-2 \cdot 1+3)9^\circ \right\} = -1,24 \text{ см};$$

$$\Delta_{14y} = \frac{2100 \cdot 400}{2,06 \cdot 10^6 \cdot \sin 90^\circ \cdot \sin 18^\circ} \left\{ [2(2 \cdot 4 - 1) + (4-3)4 \cos^2 45^\circ] \sin(6-2 \cdot 1+1)9^\circ - \right. \\ \left. - (4-1)[4 + (4-2) \cos^2 45^\circ] \sin(6-2 \cdot 1+3)9^\circ \right\} = -2,68 \text{ см};$$

У формулі (38) j змінюється від 2 до $n/2 + 1$, тобто з другого вузла до середини, в першому вузлі $\Delta = 0$, якщо опора в першому вузлі відсутня, то j змінюється від 1 до $n/2 + 1$.

Цифра k змінюється від 3 до $m/2$, при цьому якщо $k = 2$, то змінюється знак в першому доданку (35), оскільки і від вантажного і від одиничного навантаження зусилля будуть зі знаком "+". Виконавши підсумовування і перетворення, одержимо формулу для визначення переміщень по другому ребру:

$$\Delta_{2j} = \frac{R_y l}{E \sin 2\varphi \sin 2\beta} \left\{ [2(2j-1) + (2nj - j^2 - j - 2n) \cos^2 \varphi] \cos(m-3)\beta - \right. \\ \left. - (j-1)[4 + (j-2) \cos^2 \varphi] \cos(m-1)\beta \right\}. \quad (39)$$

При $k = m/2 + 1$, тобто по середньому ребру суми зусиль в елементах дорівнюють:
– сума зусиль в ребрах

$$\sum \overline{N_{\frac{m}{2}}} = \sum \overline{N_{\frac{m}{2}+2}} = \frac{(j-1)(n-j)}{4 \sin 2\beta} \operatorname{ctg} \varphi; \quad (40)$$

$$\sum \overline{N_{\frac{m}{2}+1}} = -\frac{n(j-1)}{2 \sin \beta} \operatorname{ctg} \varphi; \quad (41)$$

– сума зусиль в розкосах

$$\sum \overline{N_{\frac{m}{2},(\frac{m}{2}+1)}} = \sum \overline{N_{(\frac{m}{2}+1),(\frac{m}{2}+2)}} = \frac{j-1}{2 \sin \varphi \sin \beta}; \quad (42)$$

– сума зусиль в стояках

$$\sum \overline{N_{\frac{m}{2},(\frac{m}{2}+1)}} = \sum \overline{N_{(\frac{m}{2}+1),(\frac{m}{2}+2)}} = \frac{j}{2 \sin \beta}; \quad (43)$$

Підставивши одержані значення сум у формулу (26), отримаємо значення переміщень вузлів в середньому ребрі:

$$\Delta_{\frac{(m}{2}+1)j} = \frac{R_y l}{E \sin 2\varphi \sin \beta} \left[2(2j-1) + j(j-3) \cos^2 \varphi \right]. \quad (44)$$

У випадку, коли задані площі поперечного перерізу елементів, переміщення вузлів одержуємо за формулою (25) з урахуванням добутків $\sum \overline{N_i N_i}$.

Для спрощення формули введемо деякі додаткові позначення:

$$\begin{aligned} 2n^2 - 3n - 2 &= A; & \cos(m-3)\beta &= r_3; \\ \cos(m-2k+1)\beta &= c_1; & \cos(m-5)\beta &= r_5; \\ \cos(m-2k+3)\beta &= c_3; & \cos \beta - \cos 3\beta &= t; \\ \cos(m-2k-1)\beta &= c_{-1}; & n-j &= \rho; & n+4 &= \eta. \end{aligned}$$

Використавши їх, запишемо в загальному вигляді формулу для визначення переміщень вузлів:

$$\begin{aligned} \Delta_{kj} &= \frac{F l n(j-1) \operatorname{ctg}^2 \varphi}{96 E \sin^2 2\beta} \left\{ \frac{[(A+6n)(c_1-c_5) - A(c_{-1}-c_5)](nc_1 + \rho c_3)}{2A_{pe\delta}} - \right. \\ &\quad \left. - \frac{(A+6n)[\rho c_1(c_3-c_7) + nc_3(c_{-1}-c_3) + A(c_1-c_5)(\rho c_1 + nc_3)]}{2A_{pe\delta}} + \right. \\ &\quad \left. + \frac{6n}{A_p \cos^3 \varphi} [(c_1-c_5)c_1 - (c_{-1}-c_3)c_3] + \frac{6 \operatorname{tg}^3 \varphi}{A_c} [(\eta c_1 - nc_5) \times \right. \\ &\quad \left. \times \frac{jc_1}{j-1} - (\eta c_1 - nc_3)c_3 \right\}, \quad (45) \end{aligned}$$

де k змінюється від 2 до $m/2$.

При $k=2$ формула переміщень буде мати такий вигляд:

$$\begin{aligned} \Delta_{2j} &= \frac{F l n(j-1) \operatorname{ctg}^2 \varphi}{96 E \sin^2 2\beta} \left\{ \frac{Apr_3^2 + [(A+6n)r_3 - A(r_5-r_1)](nk_3 + \eta k_1)}{2A_{pe\delta}} - \right. \\ &\quad \left. - \frac{nk_3[(A+6n)(r_5-r_1) - A(r_7-r_3)]}{2A_{pe\delta}} + \frac{6n}{A_p \cos^3 \varphi} [r_3^2 - r_1(r_5-r_1)] + \right. \\ &\quad \left. + \frac{6\eta \operatorname{tg}^3 \varphi}{A_c} \left[\frac{jr_3^2}{j-1} + \frac{nr_1^2}{\eta} - r_5 r_1 \right] \right\}, \quad (46) \end{aligned}$$

а при $k=m/2+1$ формула запишеться так:

$$\begin{aligned} \Delta_{\frac{m}{2}+1} &= \frac{F l n(j-1) \operatorname{ctg}^2 \varphi}{96 E \sin 2\beta \sin \beta} \left\{ \frac{(A+6n)nt - \rho[(A+6n)(\cos \beta - \cos 5\beta) - At]}{2A_{pe\delta}} + \right. \\ &\quad \left. + \frac{6nt}{A_p \cos^3 \varphi} + \frac{6j}{A_c(j-1)} \operatorname{tg}^3 \varphi [nt + 4 \cos \beta] \right\}. \quad (47) \end{aligned}$$

ВИСНОВКИ

На підставі відомих з класичної механіки канонічних залежностей отримані аналітичні формули для визначення переміщень вузлів в конструкціях просторових циліндричних стержневих покриттів. Використано метод розкладання на плоскі грані, ефективність якого

продемонстрована конкретними прикладами з отриманням числових результатів розрахунку. В наведених прикладах переміщення вузлів визначені для найбільш деформованої нижньої грані покриття. Показано, що найбільш небезпечними є вертикальні переміщення вузлів, оскільки за величиною вони значно перевищують горизонтальні. Різниця максимальних горизонтальних і вертикальних переміщень вузлів в найбільш небезпечній припорній зоні покриття посередині нижньої грані зафіксована на рівні 56 %.

СПИСОК ЛПЕРАТУРИ

1. Свердлов В.Д., Сіянов О.І. Залежність загальної стійкості від напружено-деформованого стану одношарового циліндричного стержневого покриття // *Металеві конструкції: Матеріали Укр. наук.-техн. конф.* – Дніпропетровськ. – 2000. – С. 68 – 70.
2. Гоцуляк Є.О., Сіянов О.І. Загальна стійкість одношарових циліндричних стержневих покриттів // *Вісник ВПІ*, 2002. – № 1. – С. 13 – 18.
3. Гоцуляк Е.А., Сіянов А.И. Устойчивость цилиндрических сетчатых оболочек покрытия в линейной и нелинейной постановке // *Прикладная механика.* – 2004. – Том 40, № 4. – С. 78 – 83.
4. Свердлов В.Д. Исследование пространственных цилиндрических стержневых систем покрытий: Дис. ... канд. техн. наук. – Киев, 1977. – 174 с.
5. Свердлов В.Д., Сіянов О.І. *Металеві циліндричні стержневі покриття.*–Вінниця: «УНІВЕРСУМ-Вінниця», 1999.–134 с.

Рекомендована кафедрою промислового та цивільного будівництва

Надійшла до редакції
Рекомендована до опублікування

Сіянов Олександр Ілліч – доцент кафедри промислового та цивільного будівництва.

Свердлов Володимир Деонисович – професор кафедри промислового та цивільного будівництва
Вінницький національний технічний університет