

УДК 624.014

Оптимальне проектування двохшарових поперечних рам з елементами наскрізного перерізу для критого складу для збереження технічної сірки

¹Пелешко І.Д., к.т.н., ²Пальчик М.М., ³Юрченко В.В., к.т.н.,
³Біляєв М.А., магістр

¹Національний університет «Львівська політехніка», Україна
²ВАТ «УкрНДІпроектстальконструкция ім. В.М. Шимановського», Україна
³Київський національний університет будівництва і архітектури, Україна

Анотація. У статті представлені формулювання та результати розв'язку задачі параметричної оптимізації двохшарових поперечних рам з елементами наскрізного перерізу з труб, що працюють в складі каркаса критого складу для зберігання гранульованої сірки. В якості змінних проектування розглядалися параметри геометричної схеми поперечної рами і розміри поперечних перерізів її елементів. Як критерій оптимізації було розглянуто мінімум маси конструкції, а також мінімум кошторисної вартості для її зведення. У математичній моделі задачі оптимізації враховані технологічні обмеження, обумовлені технологічним завданням на проектування, нормативні обмеження, які висуваються до шарнірно-стержневих систем при їх перевірці за двома групами граничних станів, а також обмеження на тонкостінність несучих елементів та умови конструювання бесфасоночних вузлів із труб. Задача параметричної оптимізації розв'язана з використанням програмного забезпечення (www.optcad.com), що реалізовує пошукову методологію на базі градієнтного методу. Отримані оптимальні проектні рішення поперечних рам каркаса забезпечують суттєву економію маси конструкції та кошторисної вартості її зведення.

Аннотация. В статье представлены формулировка и результаты решения задачи параметрической оптимизации двухшарнирных поперечных рам с элементами сквозного сечения из труб, работающих в составе каркаса крытого склада гранулированной серы. В качестве переменных проектирования рассматривались параметры геометрической схемы поперечной рамы и размеры поперечных сечений ее элементов. Критерием оптимизации рассматривались минимум массы конструкции, а также минимум стоимости ее возведение. В математической модели задачи оптимизации были учтены технологические ограничения, описанные в техническом задании на проектирование объекта строительства, нормативные ограничения, регламентированные для шарнирно-стержневых систем при их проверке по двум группам предельных состояний, а также ограничения на тонкостенность несущих элементов и условия конструирования бесфасоночных узлов из труб. Задача параметрической оптимизации была решена с использованием программного обеспечения (www.optcad.com), реализующего поисковую методологию на базе градиентного метода. Полученные оптимальные проектные решения поперечных рам каркаса обеспечивают существенную экономию массы конструкции и ее стоимости при возведении.

Abstract. In this paper formulation and results of parametric optimization task for steel portal frames with lattice structural members were presented. The portal frames are the bearing construction of the storage warehouse for granulated sulfur with further shipment in merchant ship. Parameters of the geometric scheme of the portal frames and cross-sectional sizes of the structural members from tubes were considered

as design variables. The minimum weight of the transverse frame as well as the minimum cost on fabrication and erection were considered as the criteria of optimality. All technological constraints described in requirements specification were taken into account. Additionally, verifications of bearing capacity of structural members at the ultimate limit state (namely, stresses checks, overall and local buckling checks for structural members subject to central tension and compression) as well as displacement checks at the serviceability limit state were included into the constraint system. The parametric optimization task was solved using software (www.optcad.com) based on gradient method for searching the optimum design decisions. New optimal layouts of steel portal frames by the criterion of minimum weight as well as minimum costs on fabrication and erection were presented.

Ключові слова: металева поперечна рама каркаси, параметрична оптимізація, градієнтний метод, програмне забезпечення.

Вступ. Прикладні задачі оптимального проектування металевих конструкцій формулюють як задачі пошуку таких значень невідомих параметрів системи, які забезпечують найменше (або найбільше) значення вибраного критерію оптимальності в області допустимих проектних рішень.

Математична модель задачі оптимального проектування конструкцій об'єднує критерій якості, множину незалежних змінних проектування та обмеження, які відображають у загальному випадку нелінійні взаємозв'язки між змінними. У випадках, коли критерій якості та обмеження математичної моделі є неперервно диференційованими функціями, а область пошуку є гладкою, параметричні задачі оптимізації металевих стержневих систем успішно вирішують за допомогою градієнтних методів.

Покажемо застосування методів оптимізації при проектуванні конструкції поперечної рами з елементами наскрізного перерізу. Базуючись на виборі конструктивного рішення об'єкта, прийнятого на стадії технічного проекту, оптимізація заданої конструктивної форми поперечної рами здійснювалась варіюванням її параметрів при заданих топології конструкції, умовах закріплення системи на опорах, статичному характері спряжень несучих елементів у вузлах та діючих навантаженнях.

Технічна характеристика об'єкта будівництва. Об'єкт будівництва розташований у морському порту Усть-Луга Російської Федерації та призначений для зберігання гранульованої сірки з подальшим відвантаженням її на морські торгові кораблі. Район будівництва належить до III-го снігового району, II-го вітрового району, тип місцевості – А.

Генеральні габарити будівлі складу: довжина – 247,25 м, ширина – 69,0 м. Несучий каркас будівлі представляє собою систему поперечних двохсхилих рам прогоном 69,0 м, розміщених по довжині будівлі з кроком 7,5 м. По довжині будівля складу поділена на дві температурні секції деформацій-

ним швом. Поперечні перерізи несучих елементів рам прийняті з круглих гарячедеформованих труб, виконаних зі сталі марки Ст20. Спряження елементів у вузлах прийняті безфасоночними.

Будівля складу є холодною, конструкції огороження виконані з профільованого настилу, вкритого полімерним покриттям, який влаштовується по прогонах покриття і конструкціях фахверка поздовжніх та торцевих стін.

Просторова жорсткість каркаса будівлі в цілому забезпечується влаштуванням жорстких блоків із системою в'язей, яка містить вертикальні в'язі між стояками поперечних рам та горизонтальні і вертикальні в'язі по покриттю.

На відмітці +28,25 м у будівлі складу передбачена технологічна площадка, яка підвішується до конструкції поперечної рами і призначена для обпірання крана-перевантажувача та транспортера, призначеного для подачі сірки. Зварні балки технологічної площадки виконуються з універсальної листової сталі класу С245.



Рис. 1. Зведення поперечних рам каркаса складської будівлі

Розроблення математичної моделі задачі оптимізації. Математична модель задачі параметричної оптимізації поперечних рам з елементами наскрізних перерізів формулювалась як задача нелінійного програмування, до складу якої увійшли набір змінних проектування, система обмежень та детермінований критерій якості проектного рішення.

Вибір змінних проектування. Змінними геометричними параметрами конструкції поперечної рами були обрані висота будівлі у карнизному вузлі рами H_{zdk} та у гребеневому вузлі рами H_{zd} ; відстань між поясами наскрізного ригеля поперечної рами у карнизному вузлі h_{op} та у монтажних вуз-

лах ригеля h_2 , h_4 , h_6 і h_7 , а також відстань між поясами наскрізної колони у карнизному вузлі b_{op} і розмір b_7 (рис. 2). Окрім того, як змінні проектування розглядались розміри перерізів наскрізних елементів поперечної рами для кожного типу жорсткості конструкції (табл. 1). Початкові значення змінних параметрів поперечної рами були прийняті відповідно до вихідного проекту каркаса будівлі, розробленого відділом просторових споруд ВАТ «УкрНДІпроектстальконструкція ім. В.М. Шимановського». Початкові значення геометричних змінних проектування: $H_{zd} = 39,58$ м, $H_{zdk} = 10,63$ м, $h_2 = h_4 = h_6 = h_7 = h_{op} = b_{op} = 2,6$ м, $b_7 = 0,55773$ м.

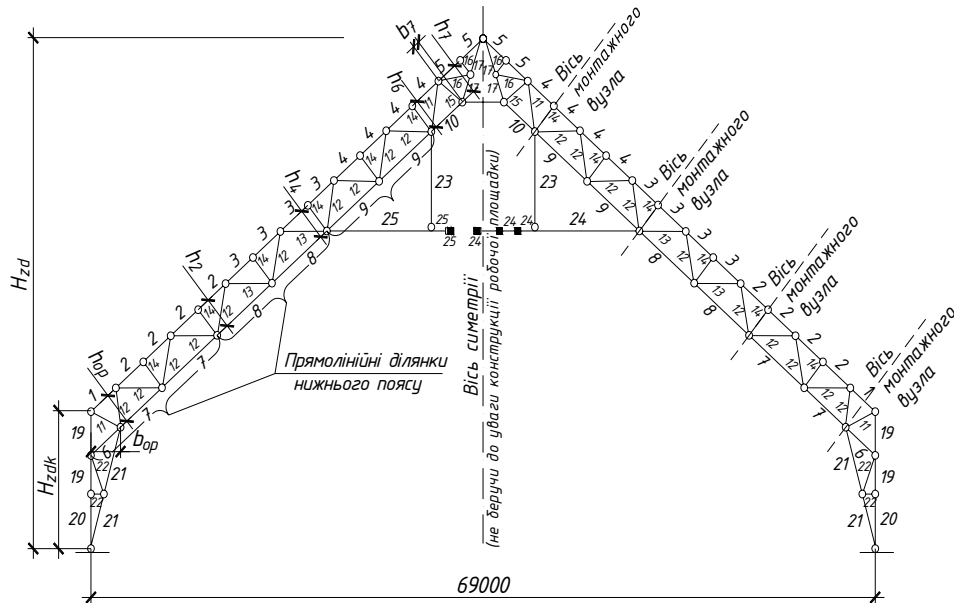


Рис. 2. Розрахункова схема поперечної рами із зазначенням геометричних змінних проектування та нумерацією типів жорсткості

Опис розрахункової схеми та збір навантажень. Статична схема поперечної рами була прийнята як шарнірно-стержньова система із шарнірним обпиранням колон поперечних рам на фундаменти.

Геометрична схема поперечної рами описувалась сукупністю вузлів та стержнів при орієнтації на виконання статичного аналізу конструкції методом скінченних елементів. Координати вузлів розрахункової схеми поперечної рами задавались у системі координат Декарта і були представлені виразами, що описують функціональні залежності від геометричних змінних проектування задачі оптимізації.

Таблиця 1

**Змінні розміри поперечних перерізів
несучих елементів поперечної рами каркаса**

Призначення та розташування конструктивного елемента	Номер типу жорсткості	Ім'я змінних, діаметр×товщина	Початкові розміри, мм×мм	Номер типу жорсткості	Ім'я змінних, діаметр×товщина	Початкові розміри, мм×мм
Пояси наскрізних елементів поперечної рами	1	$d_1 \times t_1$	299×25	7	$d_6 \times t_7$	299×16
	2	$d_1 \times t_2$	299×14	8	$d_8 \times t_8$	299×10
	3	$d_1 \times t_3$	299×10	9	$d_9 \times t_9$	299×10
	4	$d_1 \times t_4$	299×14	10	$d_{10} \times t_{10}$	299×14
	5	$d_1 \times t_5$	299×14	11	$d_{11} \times t_{11}$	180×12
	6	$d_6 \times t_6$	299×10	–	–	–
Решітка наскрізного ригеля	12	$d_{12} \times t_{12}$	152×8	14	$d_{14} \times t_{14}$	102×5
	13	$d_{13} \times t_{13}$	121×8	–	–	–
Гребінь поперечної рами	15	$d_{15} \times t_{15}$	152×8	17	$d_{17} \times t_{17}$	180×12
	16	$d_{16} \times t_{16}$	102×5	18	$d_{18} \times t_{18}$	180×12
Решітка наскрізних колон	19	$d_{19} \times t_{19}$	299×10	21	$d_{21} \times t_{21}$	299×25
	20	$d_{19} \times t_{20}$	299×25	22	$d_{22} \times t_{22}$	102×5
Підвіски робочої площадки	23	$d_{23} \times t_{23}$	180×12	–	–	–

Постійні навантаження включали власну вагу поперечної рами, прогонів покрівлі, в'язей шатра покрівлі, пожежних драбин і площадок, профільованого настилу, який влаштовується в якості огорожувальної конструкції вздовж зовнішнього контуру будівлі, а також корисне навантаження на пожежні драбини і площадки. Коефіцієнт надійності для розрахункових значень навантажень, а також коефіцієнт надійності за призначенням приймалися відповідно до [6], що обумовлено розташуванням об'єкта будівництва.

Технологічні навантаження, які діють на поперечну раму каркаса, приймалися відповідно до технологічного завдання на проектування (рис. 3). Збір кліматичних навантажень виконувався відповідно до вимог [6]. Так, при оптимізаційному розрахунку поперечної рами розглядалось три типи снігового навантаження та два типи вітрового навантаження конструкції.

Розрахункові навантаження об'єднувались у розрахункові комбінації з врахуванням коефіцієнтів їх поєднань. Загальна кількість комбінацій розрахункових навантажень для оптимізаційного розрахунку рами склала 16.

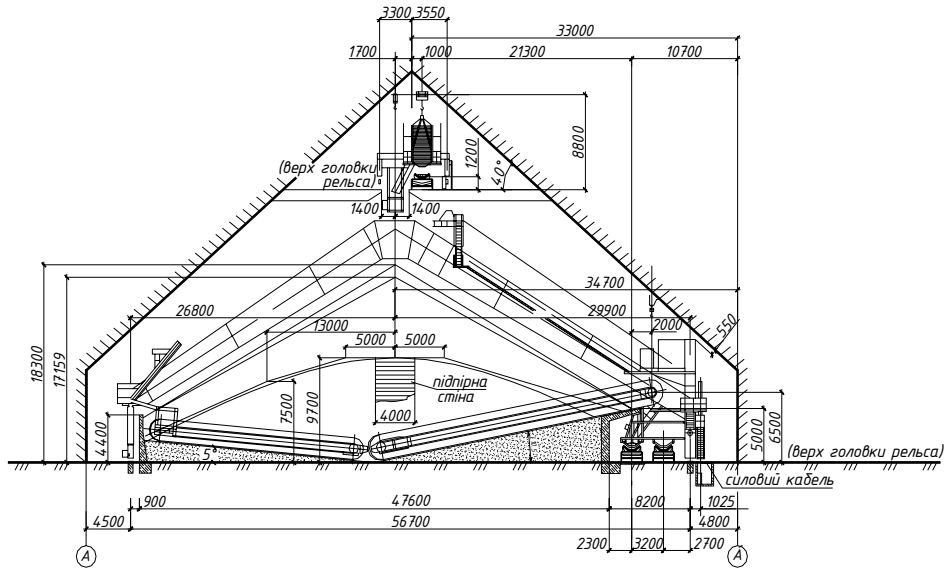


Рис. 3. Схема розміщення технологічного обладнання

Усі навантаження зводились до вузлових, а числові значення навантажень представлялись за допомогою виразів, у яких закладалась функціональна залежність від змінних параметрів геометричної схеми розглядуваної конструкції.

Система обмежень. До системи обмежень були залучені нормативні обмеження, які висуваються до шарнірно-стержневих систем при їх перевірці за двома групами граничних станів, а також технологічні обмеження, обмеження тонкостінності несучих елементів із труб та умови конструювання бесфасоночних вузлів із труб.

Нормативні обмеження включали:

1) обмеження міцності центрально-розтягнутих та центрально-стиснутих елементів:

$$\frac{N_{j,k}}{A_{n,j} R_{y,j} \gamma_c} - 1, 0 \leq 0; \quad j=1 \dots N_E; \quad k=1 \dots N_{LC}^{ULS}; \quad (1)$$

2) обмеження стійкості центрально-стиснутих елементів:

$$\frac{N_{j,k}}{\varphi_{xz,j} A_j R_{y,j} \gamma_c} - 1, 0 \leq 0; \quad \frac{N_{j,k}}{\varphi_{xy,j} A_j R_{y,j} \gamma_c} - 1, 0 \leq 0; \quad j=1 \dots N_E; \quad k=1 \dots N_{LC}^{ULS}; \quad (2)$$

3) обмеження граничної гнучкості:

$$\frac{l_{ef,xz,j}}{i_{xz,j}[\lambda]_j} - 1, 0 \leq 0; \quad \frac{l_{ef,xy,j}}{i_{xy,j}[\lambda]_j} - 1, 0 \leq 0; \quad j = 1 \dots N_E; \quad (3)$$

4) обмеження лінійних переміщень:

$$\frac{\delta_{x,i,k}}{[\Delta]_x} - 1, 0 \leq 0, 0; \quad \frac{\delta_{z,i,k}}{[\Delta]_z} - 1, 0 \leq 0, 0; \quad i = 1 \dots N_N; \quad k = 1 \dots N_{LC}^{SLS}. \quad (4)$$

У формулах (1) – (4) позначено: i і j – номери відповідно вузла і стержня стержневої системи; N_N і N_E – загальна кількість відповідно вузлів і стержнів; k – номер розрахункової комбінації навантажень; N_{LC}^{ULS} і N_{LC}^{SLS} – загальна кількість комбінацій відповідно за першою та другою групами граничних станів; $N_{j,k}$ – розрахункове зусилля, що діє в перерізі j -го елемента при дії k -ї комбінації розрахункових граничних навантажень; $A_{n,j}$ і A_j – площі поперечного перерізу j -го елемента відповідно нетто і брутто; $R_{y,j}$ – розрахунковий опір сталі на розтяг, стиск і згин j -го елемента, який приймається згідно з табл. 51* [5]; γ_c – коефіцієнт умов роботи, прийнятий за табл. 6* [5]; $i_{xz,j}$ і $i_{xy,j}$ – радіуси інерції поперечного перерізу j -го елемента відносно осей $x-x$ та $z-z$ відповідно; $l_{ef,xz,j}$ і $l_{ef,xy,j}$ – розрахункові довжини j -го елемента поперечної рами відповідно в площині рами xOz та з площини рами xOy ; $[\lambda]_j$ – гранична гнучкість j -го елемента; $\varphi_{xz,j}$ і $\varphi_{xy,j}$ – коефіцієнти поздовжнього згину при центральному стиску, які обчислюються за табл. 72* [5] залежно від значень гнучкостей відповідно $\lambda_{xz,j} = l_{ef,xz,j} / i_{xz,j}$ та $\lambda_{xy,j} = l_{ef,xy,j} / i_{xy,j}$; $\delta_{x,i,k}$ і $\delta_{z,i,k}$ – лінійні переміщення i -го вузла поперечної рами при k -й комбінації розрахункових експлуатаційних навантажень відповідно вздовж осей $x-x$ та $z-z$; $[\Delta]_x$ і $[\Delta]_z$ – граничні горизонтальне і вертикальне переміщення вузлів стержневої конструкції.

Розрахункові довжини елементів $l_{ef,xz,j}$ і $l_{ef,xy,j}$ приймалися відповідно до [5] як: для поясів, опорних розкосів та опорних стояків наскрізних елементів поперечної рами – $l_{ef,xz,j} = l_j$; $l_{ef,xy,j} = l_{1,j}$; для інших елементів решітки наскрізних елементів – $l_{ef,xz,j} = 0,85l_j$; $l_{ef,xy,j} = 0,85l_{1,j}$; тут l_j – геометрична довжина j -го стержня наскрізного елемента поперечної

рами; $l_{1,j}$ – відстань між закріпленнями елемента від горизонтальних переміщень з площини поперечної рами.

Гранична гнучкість стержнів наскрізних елементів поперечної рами приймалась відповідно до [5] як: $[\lambda]_j = 400$ – для розтягнутих стержнів; $[\lambda]_j = 180 - 60\alpha$ – для стиснутих стержнів.

Граничні значення лінійних переміщень вузлів поперечної рами з елементами наскрізного перерізу приймалися за табл. 4 [6] з врахуванням примітки 4 до цієї ж таблиці як $[\Delta]_x = H_{zd} / 210$ і $[\Delta]_z = L / 300$.

Додатково відповідно до вимог [4] на розміри поперечних перерізів елементів поперечних рам із труб були висунуті обмеження мінімальної товщини та максимальної тонкостінності елемента, а саме:

$$1,0 - \frac{t_l}{t_{\min,l}} \leq 0,0; \quad l = 1 \dots N_{ST}; \quad (5)$$

$$\frac{D_l}{t_l \delta_{\max,l}} - 1,0 \leq 0,0; \quad l = 1 \dots N_{ST}, \quad (6)$$

де l – номер типу жорсткості; N_{ST} – кількість типів жорсткості конструкції; t_l і D_l – відповідно товщина і діаметр перерізу труби l -го типу жорсткості (див. табл. 1); $t_{\min,l}$ – мінімальна товщина перерізу труби, яка приймалась відповідно до п. 18.14 [4] рівною 3 мм для поясів, опорних розкосів і опорних стояків наскрізних елементів та 2,5 мм для інших елементів решітки; $\delta_{\max,l}$ – максимальна тонкостінність елемента трубчастого перерізу, яка приймалась згідно з п. 18.15 для значень нормативного опору сталі $R_{yn} = 245 \text{ МПа} < 295 \text{ МПа}$ рівною 30 для поясів та контурних елементів поперечної рами і 90 для прилеглих елементів.

До складу системи обмежень також були залучені обмеження, що описують необхідні умови конструювання безфасоночних вузлів елементів із труб, сформульовані відповідно до вимог [4] з врахуванням розташування монтажних стиків:

$$0,3d_m \leq d_l \leq d_m; \quad m, l = 1 \dots N_{ST}, \quad (7)$$

де m і l – номери типів жорсткостей елементів у вузлі.

Критерій якості. Критерієм оптимізації було розглянуто мінімум маси конструкції, а також мінімум кошторисної вартості її зведення. Аналітич-

ний вираз маси конструкції у залежності від змінних розмірів поперечних перерізів запишемо як

$$M(D_j, t_j) = \varphi \rho \sum_{j=1}^{N_E} A_j l_j = 4\pi \varphi \rho \sum_{j=1}^{N_E} t_j (D_j - t_j) l_j \rightarrow \min, \quad (8)$$

де A_j і l_j – відповідно площа поперечного перерізу і довжина j -го елемента конструкції; ρ – густина сталі, $\rho = 7850$ кг/м³; φ – будівельний коефіцієнт, що враховує збільшення маси конструкції за рахунок наявності допоміжних конструктивних елементів і прийнятий відповідно до повної специфікації сталі, наведеної у вихідному проекті будівлі складу, $\varphi = 1,1$.

Кошторисна вартість двохарнірної поперечної рами з елементами наскрізного перерізу з врахуванням кошторисної вартості робочих площадок, влаштованих на відмітці +28,25, може бути представлена як

$$K = C_{\text{виг}}^n + C_{\text{виг}}^c + C_{\text{мон}} + C_{\text{мон}}^{\text{ок}} + C_{\text{к.з.}} + C_{\text{к.я.}} + C_m,$$

де $C_{\text{виг}}^n$ – вартість виготовлення елементів наскрізного перерізу; $C_{\text{виг}}^c$ – вартість виготовлення несучих елементів робочої площадки; $C_{\text{мон}}$ – вартість зведення поперечної рами; $C_{\text{мон}}^{\text{ок}}$ – вартість зведення огорожувальних конструкцій; $C_{\text{к.з.}}$ – вартість виконання комплексу робіт з антикорозійного захисту конструкцій; $C_{\text{к.я.}}$ – вартість контролю якості зварних з'єднань; C_m – вартість матеріалів несучих елементів поперечної рами.

Вартість матеріалів несучих елементів поперечної рами C_m складається з вартості матеріалів елементів наскрізного перерізу поперечної рами $C_m^{\text{нн}}$, вартості несучих конструкцій робочої площадки $C_m^{\text{пн}}$ та вартості огорожувальних конструкцій (профільованого настилу) $C_m^{\text{ок}}$, тобто:

$$C_m = C_m^{\text{нн}} + C_m^{\text{пн}} + C_m^{\text{ок}};$$

$$C_m^{\text{нн}} = 1,035 k_{\text{ex}} (k_{\text{np}} m_{\text{np}} + 1,5) c_{1,m}^{\text{нн}} = 1,035 \times 1,078 \times (1,14 \times 1,089 M(D_j, t_j) + 1,5) \times 6983,03 = 9747,4 M(D_j, t_j) + 20899 \text{ грн};$$

$$C_m^{\text{пн}} = 1,035 k_{\text{ex}} (k_{\text{np}} m_{\text{np}} + 1,5) c_{1,m}^{\text{пн}} = 1,035 \times 1,035 (1,11 \times 0,011 M(D_j, t_j) + 1,5) \times 5733,03 = 75 M(D_j, t_j) + 9210 \text{ грн};$$

$$C_M^{ок} = C_M^{ок.см} + C_M^{ок.нок} = 1,035k_{ex} (k_{np} (m_{np}^{см} + m_{np}^{нок}) + 1,5(c_{1,м}^{ок.см} + c_{1,м}^{ок.нок})) =$$

$$1,035 \times 1,035 \times (1,13 \times (7,5 \times 2,0 \times (53,50H_{zdk} + 65,59\sqrt{(0,5L)^2 + (H_{zd} - H_{zdk})^2})) +$$

$$+ 1,5 \times 119,09) = 970H_{zdk} + 1190\sqrt{(0,5L)^2 + (H_{zd} - H_{zdk})^2} + 190 \text{ грн},$$

де вартості одиниці маси елементів наскрізного перерізу, виготовлених із труб, $c_{1,м}^{пн}$ та листової сталі $c_{1,м}^{пн}$, прийняті усередненими в цінах 2008 р. $c_{1,м}^{пн} = 6983,03$ грн/т; $c_{1,м}^{пн} = 5733,03$ грн/т. Вартість одиниці маси профільованого настилу для огорожувальних конструкцій стін $c_{1,м}^{ок.см}$ та покрівлі $c_{1,м}^{ок.нок}$ прийняті як для профільованого настилу з полімерним покриттям виробництва СеверСталь (Росія) в розмірі: для покрівельного огороження (марка Н 57-750-0.8) – $c_{1,м}^{ок.нок} = 65,59$ грн/т; для стінового огороження (марка НС 44-1000-0.7) – $c_{1,м}^{ок.см} = 53,50$ грн/т; k_{np} – коефіцієнт приплат до гуртових цін на металеві конструкції, що враховує додаткові витрати на обмірювання та випробування конструкцій, числове значення цього коефіцієнта приймалось у залежності від марки сталі, з якої виготовлені конструкції, за рекомендаціями [1] як: $k_{np} = 1,14$ – для елементів трубчастого перерізу, виготовлених із низьколегованої сталі; $k_{np} = 1,11$ – для несучих конструкцій робочої площадки, виготовлених із маловуглецевої сталі звичайної міцності; $k_{np} = 1,13$ – для профільованого настилу завтовшки 7 мм і 8 мм; k_{ex} – коефіцієнт, що враховує збільшення вартості матеріалу через наявні при виготовленні конструкції відходи, який приймався за рекомендаціями [1], як: для конструкцій з прокатних, холодногнутих профілів, товстолистої і універсальної сталі рівним $k_{ex} = 1,035$, для елементів трубчастого перерізу – $k_{ex} = 1,078$. Інші показники були визначені на основі локальних кошторисів на окремі види робіт. Остаточний аналітичний вираз кошторисної вартості виготовлення та зведення конструкції поперечної рами у залежності від змінних проектування представлено як

$$K = 20670M(D_j, t_j) + 1525D_{ov} + 1300H_{zdk} + 110A_s + 21120 \rightarrow \min, \quad (9)$$

де D_{ov} – довжина напівригеля рами, $D_{ov} = \sqrt{(0,5L)^2 + (H_{zd} - H_{zdk})^2}$; L – прогін рами.

Параметрична оптимізація конструкції на базі градієнтного методу

Для розв'язку задачі параметричної оптимізації поперечних рам з елементами наскрізного перерізу використано градієнтний метод, докладно описаний у працях [2, 3, 8]. Цей метод базується на ітераційній побудові послідовності проектних рішень конструкції, яка забезпечує збіжність до оптимального проектного рішення \bar{x}^* , що характеризується мінімальним значенням функції мети f^* :

$$\bar{x}_{k+1} = \bar{x}_k + \Delta\bar{x}_k, \quad (10)$$

де $\bar{x}_k = (x_1^k, x_2^k, \dots, x_n^k)^T$ – поточне наближення до розв'язку задачі оптимізації; $\Delta\bar{x}_k = (\Delta x_1^k, \Delta x_2^k, \dots, \Delta x_n^k)^T$ – приріст вектора змінних проектування; k – номер кроку.

У початковій точці, яка представляє собою інженерну оцінку раціонального проекту, на основі аналізу локальної поведінки функції мети визначається напрям, уздовж якого відбувається найшвидше її зменшення. Потім даний напрям проектується на лінеаризовану у цій точці поверхню активних обмежень і здійснюється невеликий крок у напрямку цієї проекції при одночасній ліквідації порушень лінеаризованих обмежень.

На кожній ітерації розглядаються лише активні обмеження, множина номерів яких \mathbf{A} у поточній точці \bar{x}_k (для поточного проектного рішення) визначається як:

$$\mathbf{A} = \mathbf{I} \cup \mathbf{J}, \quad \mathbf{I} = \left\{ \kappa \mid \kappa = \overline{1, n_{ec}} \right\}, \quad \mathbf{J} = \left\{ \eta \mid \varphi_\eta(\bar{x}_k) \geq -\varepsilon, \eta = \overline{n_{ec} + 1, n_{ic}} \right\},$$

де ε – мале додатне число.

Приріст вектора змінних проектування $\Delta\bar{x}_k$ обчислюється відповідно до рівняння

$$\Delta\bar{x}_k = \Delta\bar{x}_\perp^k + \Delta\bar{x}_\parallel^k, \quad (11)$$

де $\Delta\bar{x}_\perp^k$ та $\Delta\bar{x}_\parallel^k$ – вектори, які визначаються відповідно з умови ліквідації нев'язок у порушених обмеженнях та покращення значення функції мети.

Компонента $\Delta\bar{x}_\perp^k$ визначається як

$$\Delta\bar{x}_\perp^k = \mathbf{\Gamma} \times \bar{\mu}_\perp, \quad (12)$$

де $\mathbf{\Gamma}$ – матриця градієнтів активних обмежень; $\bar{\mu}_\perp$ – вектор-стовпець, правила обчислення якого наводяться нижче.

Значення нев'язок у порушених обмеженнях у поточному проектному рішенні \bar{x}_k представляється вектором нев'язок

$$\vec{\phi} = \left(\psi_\kappa(\bar{x}) \quad \forall \kappa \in \mathbf{I}; \quad \varphi_\eta(\bar{x}) \quad \forall \eta \in \mathbf{J} \mid \varphi_\eta(\bar{x}) > 0; \quad 0 \quad \forall \eta \in \mathbf{J} \mid \varphi_\eta(\bar{x}) \leq 0 \right)^T.$$

З метою ліквідації нев'язок в обмеженнях $\vec{\phi}$ компонента $\Delta\bar{x}_\perp^k$ у першому наближенні повинна задовольняти теорему Тейлора [7] для гладкої функції багатьох змінних в околі \bar{x}_k для усіх обмежень з множини \mathbf{A} , а саме:

$$-\vec{\phi} = \mathbf{\Gamma}^T \times \Delta\bar{x}_\perp^k. \quad (13)$$

При підстановці (12) в (13) отримаємо систему рівнянь для обчислення вектора-стовпця $\bar{\mu}_\perp$, як це представлено нижче:

$$\mathbf{\Gamma}^T \times \mathbf{\Gamma} \times \bar{\mu}_\perp = -\vec{\phi}. \quad (14)$$

Компонента $\Delta\bar{x}_\parallel^k$ підраховується як

$$\Delta\bar{x}_\parallel^k = \xi \bar{p} = \xi \times (\nabla\vec{f} - \mathbf{\Gamma} \times \bar{\mu}_\parallel), \quad (15)$$

де $\nabla\vec{f}$ – вектор градієнта функції мети у поточній точці \bar{x}_k ; \bar{p} – проекція вектора градієнта функції мети $\nabla\vec{f}$ на поверхню активних обмежень у поточній точці \bar{x}_k ; ξ – параметр кроку; $\bar{\mu}_\parallel$ – вектор-стовпець, який обчислюється з використанням методу найменших квадратів відповідно до залежності, наведеної нижче:

$$\mathbf{\Gamma} \times \bar{\mu}_\parallel \approx \nabla\vec{f} \quad (16)$$

$$\text{або } \mathbf{\Gamma}^T \times \mathbf{\Gamma} \times \bar{\mu}_\parallel = \mathbf{\Gamma}^T \times \nabla\vec{f}. \quad (17)$$

Використовуючи (12) та (15) рівняння (11) може бути представлено як

$$\Delta\bar{x}_k = \mathbf{\Gamma} \times \bar{\mu}_\perp + \xi \times (\nabla\vec{f} - \mathbf{\Gamma} \times \bar{\mu}_\parallel); \quad (18)$$

$$\Delta\bar{x}_k = \xi \times \nabla\vec{f} + \mathbf{\Gamma} \times (\bar{\mu} - \xi \times \bar{\mu}_\parallel), \quad (19)$$

де $\bar{\mu}_\perp$ та $\bar{\mu}_\parallel$ обчислюються відповідно за рівняннями (14) та (16) або (17).

Результати оптимізаційного розрахунку поперечних рам каркаса.
Сформульована задача параметричної оптимізації поперечних рам каркаса

з елементами наскрізного перерізу розв'язана з використанням програмного забезпечення OptCAD (www.optcad.com), математичний апарат якого поєднує метод скінченних елементів для виконання статичного лінійного аналізу стержневих систем та градієнтний метод для вирішення задачі параметричної оптимізації [8]. Вимірність задачі оптимізації складала 50 змінних проектування та 14000 обмежень.

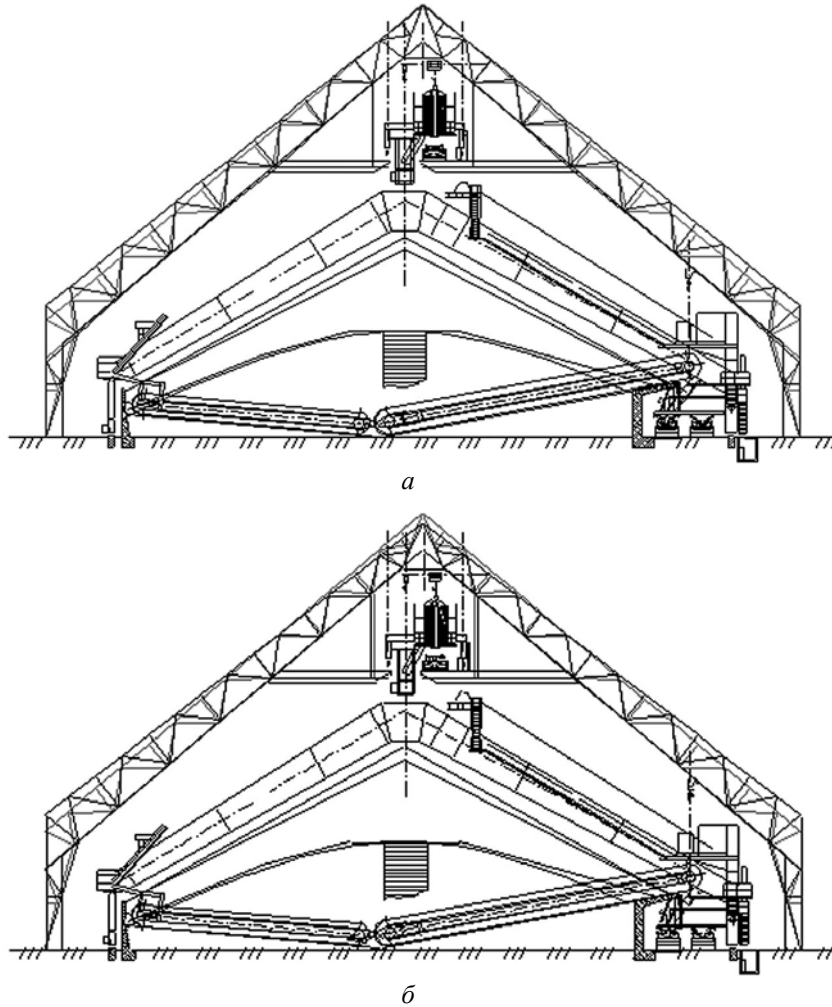


Рис. 3. Оптимальні проектні рішення поперечної рами з елементами наскрізного перерізу за критерієм мінімуму кошторисної вартості конструкції для випадків, коли нижній пояс ригеля:
a – прямолінійний; *б* – полігональний

Таблиця 2

Результати оптимального проектування поперечних рам каркасу

Змінні проектування	Початкові значення	Оптимальні значення за критерієм мінімуму							
		маси конструкції			кошторисної вартості конструкції				
		для випадків, коли нижній пояс наскрізного ригеля рами							
		криволін.	прямолінійний	криволін.	прямолінійний	криволін.	прямолінійний		
у просторі пошуку									
		неперервному		дискретн.		неперервному		дискретн.	
H_{zd}	39,580	39,55	38,82	38,97	38,74	39,44	38,91		
H_{zdk}	10,630	11,84	11,92	11,68	12,08	12,03	11,80		
h_2	2,600	3,23	–	–	–	3,31	–		
h_4	2,600	3,21	–	–	–	3,23	–		
h_6	2,600	2,68	–	–	–	2,70	–		
h_7	2,600	2,68	2,18	2,26	2,13	2,61	2,24		
b_7	0,55773	0,56	1,00	0,92	1,05	0,63	0,95		
h_{op}	2,600	3,72	3,61	3,43	3,73	3,87	3,51		
b_{op}	2,600	3,02	3,08	3,06	3,02	2,95	2,81		
$d_1 \times t_1$	299×25	183,4×8,4	192,3×8,6	194×9,0	173,9×9,3	172,9×8,6	168×11,0		
$d_1 \times t_2$	299×14	183,4×6,1	192,3×6,4	194×7,0	173,9×6,9	172,9×6,3	168×8,0		
$d_1 \times t_3$	299×10	183,4×6,9	192,3×6,5	194×6,5	173,9×7,3	172,9×7,4	168×8,5		
$d_1 \times t_4$	299×14	183,4×8,5	192,3×9,3	194×9,0	173,9×10,7	172,9×9,3	168×11,0		
$d_1 \times t_5$	299×14	183,4×6,1	192,3×6,4	194×6,5	173,9×5,8	172,9×5,8	168×6,0		
$d_6 \times t_6$	299×10	297,4×9,9	303,1×10,1	299×10,0	298,1×9,9	292,3×9,7	299×10,0		
$d_6 \times t_7$	299×16	297,4×11,3	303,1×11,4	299×12,0	298,1×11,6	292,3×11,5	299×12,0		
$d_8 \times t_8$	299×10	264,4×8,8	269,4×9,0	299×10,0	269,0×9,0	263,6×8,8	273×9,5		
$d_9 \times t_9$	299×10	203,0×6,8	210,7×7,0	194×8,5	211,5×7,0	202,8×6,8	219×7,5		
$d_{10} \times t_{10}$	299×14	143,5×4,8	147,1×4,9	152×5,5	148,1×4,9	143,3×4,8	146×5,5		
$d_{11} \times t_{11}$	180×12	183,4×9,7	192,3×9,6	194×9,5	173,9×11,5	172,9×11,1	168×13,0		
$d_{12} \times t_{12}$	152×8	161,2×4,5	165,6×4,6	152×5,5	164,9×4,6	160,8×4,5	168×5,0		
$d_{13} \times t_{13}$	121×8	110,3×3,9	107,4×3,6	108×4,0	80,7×4,9	79,1×5,6	83×5,0		
$d_{14} \times t_{14}$	102×5	89,2×3,5	90,9×3,5	95×3,5	89,4×3,5	87,7×3,5	95×3,5		
$d_{15} \times t_{15}$	152×8	143,5×5,2	147,1×5,1	152×5,0	133,5×5,9	135,1×5,6	133×6,0		
$d_{16} \times t_{16}$	102×5	55,0×3,5	57,9×3,5	60×3,5	52,2×3,5	51,9×3,5	54×3,5		
$d_{17} \times t_{17}$	180×12	112,8×4,9	116,3×4,7	108×5,0	90,4×6,1	101,8×5,4	95×6,0		

Закінчення таблиці 2

Змінні проектування	Початкові значення	Оптимальні значення за критерієм мінімуму					
		маси конструкції			кошторисної вартості конструкції		
		для випадків, коли нижній пояс наскрізного ригеля рами					
		криволін.	прямолінійний	криволін.	прямолінійний	криволін.	прямолінійний
		у просторі пошуку					
		неперервному	дискретн.	неперервному	дискретн.		
$d_{18} \times t_{18}$	180×12	143,5×6,3	147,1×6,6	152×6,5	148,1×6,6	143,3×6,4	146×7,5
$d_{19} \times t_{19}$	299×10	297,4×9,9	303,2×10,1	299×10,0	298,1×9,9	292,3×9,7	299×10,0
$d_{19} \times t_{20}$	299×25	297,4×9,9	303,2×10,1	299×10,0	298,1×9,9	292,3×9,7	299×10,0
$d_{21} \times t_{21}$	299×25	297,4×21,0	303,2×21,1	299×22,0	298,1×22,3	292,3×22,3	299×24,0
$d_{22} \times t_{22}$	102×5	89,2×3,5	90,9×3,5	95×3,5	89,4×3,5	87,7×3,5	95×3,5
$d_{23} \times t_{23}$	180×12	148,9×5,3	151,6×5,3	152×5,5	79,7×11,4	81,8×10,6	83×1,2
Маса, т	30,78	18,45	18,98	19,70	–	–	–
Кошторисна вартість, грн	786681	–	–	–	534647	524257	552368

Результати оптимізаційного розрахунку наведені у табл. 2. На рис. 3 представлені оптимальні проектні рішення поперечних рам за критерієм мінімуму кошторисної вартості на виготовлення і зведення. При цьому вихідне проектне рішення поперечної рами представлено червоним кольором, а оптимальне проектне рішення – синім.

Після оптимізаційного розрахунку поперечних рам каркаса був виконаний розрахунок безфасоночних вузлів несучих елементів ригелів і колон із труб, а також вузлів спряжень ригеля з колоною і монтажних вузлів ригеля із застосуванням фігурних накладок та болтових з'єднань. Несуча здатність безфасоночних вузлів елементів із труб великою мірою визначається розмірами поперечних перерізів елементів у вузлі. При розрахунку безфасоночних вузлів були уточнені розміри поперечних перерізів елементів поперечних рам, внаслідок чого загальна маса конструкції та її кошторисна вартість зросли і склали відповідно 21,78 т і 574102 грн. (для оптимального проектного рішення поперечної рами з прямолінійним нижнім поясом ригеля).

Висновок

У статті наведені формулювання та результати розв'язку задачі параметричної оптимізації двошарнірних поперечних рам з елементами наскрізного перерізу з труб, які працюють у складі каркаса критого складу для зберігання гранульованої сірки. В якості змінних проектування

розглядалися параметри геометричної схеми поперечної рами і розміри поперечних перерізів її елементів. Критерієм оптимізації було розглянуто мінімум маси конструкції, а також мінімум кошторисної вартості її зведення. У математичній моделі задачі оптимізації були враховані технологічні обмеження, обумовлені технологічним завданням на проектування, нормативні обмеження, які висуваються до шарнірно-стержневих систем при їх перевірці за двома групами граничних станів, а також обмеження на тонкостінність несучих елементів та умови конструювання бесфасоночних вузлів із труб. Задача параметричної оптимізації розв'язана з використанням програмного забезпечення (www.optcad.com), що реалізовує пошукову методологію на базі градієнтного методу. Отримані оптимальні проектні рішення поперечних рам каркаса забезпечують суттєву економію маси конструкції та кошторисної вартості її зведення.

Література

- [1] Лихтарников Я.М. Вариантное проектирование и оптимизация стальных конструкций – М.: Стройиздат, 1979. – 319 с.
- [2] Пелешко І.Д., Юрченко В.В. Про удосконалення одного з методів оптимізації сталевих конструкцій // Вісник Державного університету «Львівська політехніка». Теорія і практика будівництва, 1988, № 360. – С. 166-174.
- [3] Пермяков В.А., Перельмутер А.В., Юрченко В.В. Оптимальное проектирование металлических конструкций. – Киев: Изд-во «Сталь», 2008.
- [4] Пособие по проектированию стальных конструкций (к СНИП II-23-81*) / ЦНИИСК им. Кучеренко Госстроя СССР. – М.: ЦИТП, 1989.
- [5] СНИП II-23-81*. Металлические конструкции. – М., 1996. – 96 с.
- [6] СНИП 2.01.07-85*. Нагрузки и воздействия. – М., 1996. – 50 с.
- [7] Хог А., Арора Дж. Прикладное оптимальное проектирование: механические системы и конструкции. – М: Мир, 1983.
- [8] Peleshko I., Yurchenko V. An optimum structural computer-aided design using update gradient method. // Modern Building Materials, Structures and Techniques: Proceedings of 8th International Conference – Vilnius, VGTU, 2004.

Надійшла до редколегії 30.06.2009