



ISSN 1814-5566 print

ISSN 1993-3517 online

**МЕТАЛЕВІ КОНСТРУКЦІЇ
МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ КОНСТРУКЦИИ
METAL CONSTRUCTIONS**

N3, ТОМ 15 (2009) 189-200

УДК 624.014

(09)-0196-0

ОПТИМАЛЬНЕ ПРОЕКТУВАННЯ ПОПЕРЕЧНИХ РАМ КАРКАСУ КРИТОГО СКЛАДУ ДЛЯ ЗБЕРЕЖЕННЯ ТЕХНІЧНОЇ СІРКИ

І.Д. Пелешко¹, М.М. Пальчик², В.В. Юрченко³, М.А. Біляєв³

¹Національний університет "Львівська політехніка",

12, вул. Ст. Бандери, 79000, Львів, Україна,

E-mail: ipeleshko@hotmail.com;

²ВАТ "УкрНДІпроектстальконструкція" ім. В. М. Шимановського,

1, пр. Визволителів, 02660, Київ, Україна,

E-mail: palchik@urdisc.com.ua;

³Київський національний університет будівництва та архітектури,

31, пр. Повітрофлотський, 03680, Київ, Україна,

E-mail: vitalinay@rambler.ru.

Отримана 28 серпня 2009; прийнята 28 вересня 2009

Анотація. У статті представлені формулювання та результати розв'язку задачі параметричної оптимізації двохшарнірних поперечних рам з елементами наскрізного перерізу з труб, які працюють в складі каркасу критого складу для зберігання гранульованої сірки. Змінними проектування розглянуті параметри геометричної схеми поперечної рами і розміри поперечних перерізів її елементів. 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 безфасоночних вузлів з труб. Задача параметричної оптимізації за критерієм мінімуму маси конструкції, а також мінімуму кошторисної вартості її зведення розв'язана з використанням програмного забезпечення OptCAD (www.optcad.com), що реалізовує пошукову методологію на базі градієнтного методу. Отримані оптимальні проектні рішення поперечних рам каркасу забезпечують суттєву економію маси конструкції та кошторисної вартості її зведення.

Ключові слова: параметрична оптимізація, поперечні рами каркасу, градієнтний метод, програмне забезпечення.

ОПТИМАЛЬНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПОПЕРЕЧНЫХ РАМ КАРКАСА КРЫТОГО СКЛАДА ДЛЯ ХРАНЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКОЙ СЕРЫ

И.Д. Пелешко¹, М.Н. Пальчик², В.В. Юрченко³, Н.А. Биляев³

¹Национальный университет "Львовская политехника",

12, ул. Ст. Бандеры, 79000, Львов, Украина,

E-mail: ipeleshko@hotmail.com;

²ОАО "УкрНДІпроектстальконструкция" им. В. Н. Шимановского,

1, пр. Освободителей, 02660, Киев, Украина,

E-mail: palchik@urdisc.com.ua;

³Киевский национальный университет строительства и архитектуры,

31, пр. Воздухофлотский, 03680, Киев, Украина,

E-mail: vitalinay@rambler.ru.

Получена 28 августа 2009; принята 28 сентября 2009

Аннотация. В статье представлены формулирование и результаты решения задачи параметрической оптимизации двухшарнирных поперечных рам с элементами сквозного сечения из труб, работающих в составе каркаса крытого склада для хранения гранулированной серы. Переменными проектирования рассмотрены параметры геометрической схемы поперечной рамы, а также размеры поперечных сечений ее элементов. В математической модели задачи оптимизации учтены технологические ограничения, обусловленные технологическим заданием на проектирование, нормативные ограничения, предъявляемые к шарнирно-стержневым системам 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 по критериям минимума массы конструкции, а также минимума сметной стоимости ее монтажа решена при использовании программного обеспечения OptCAD (www.optcad.com), реализующего поисковую методологию на базе градиентного метода. Полученные оптимальные проектные решения поперечных рам каркаса обеспечивают существенную экономию массы конструкции и сметной стоимости ее монтажа.

Ключевые слова: параметрическая оптимизация, поперечные рамы каркаса, градиентный метод, программное обеспечение.

OPTIMUM DESIGN OF STEEL FRAMES FOR TECHNICAL SULPHUR STOREHOUSE

Ivan D. Peleshko¹, Myhajlo M. Palchik², Vitalina V. Yurchenko³, Mykyta A. Bylyayev³

¹National University "Lvivska Politechnika",
12, St. Bandery Str., 79000, Lviv, Ukraine,
E-mail: ipeleshko@hotmail.com;

²OJSC "V. Shimanovsky Ukrainian Research and Design Institute of Steel Constructions",
1, Vyzvolyteliv Avenue, 02660, Kyiv, GSP-660, Ukraine,
E-mail: palchik@urdisc.com.ua;

³Kyiv National University of Civil Engineering and Architecture,
31, Povitroflotskyj Avenue, 03680, Kyiv, Ukraine,
E-mail: vitalinay@rambler.ru.

Received 28 August 2009; accepted 28 September 2009

Abstract. This paper presents a problem statement and results of parametric optimization task of steel frames with lattice tube structural members for storehouse of technical sulphur. Parameters of geometrical scheme as well as cross-sectional sizes of frame structural members were considered as design variables. A structure weight and budget were accepted as optimization criteria. Technological constraints according to project statement, constraints which described verification conditions at the ultimate and serviceability limit states according to building standards and regulations as well as detailing conditions for tube structural joints were taken into account in the mathematical model. Parametric optimization task was solved using the software OptCAD (www.optcad.com) based on the gradient searching methodology. Optimum designs of steel frames obtained provide a significant reduction of the structure weight and budget.

Keywords: parametric optimization, steel frames, steel framework, gradient method, software.

Вступ

Прикладні задачі оптимального проектування металевих конструкцій формують як задачі пошуку таких значень невідомих параметрів системи, які забезпечують найменше (або найбільше) значення вибраного критерію оптимальності в області допустимих проектних рішень [8, 9, 12].

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 [7, 10].

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 кар-

кас будівлі представляє собою систему поперечних двохсхилих рам прольотом 69,0 м, розміщених по довжині будівлі з кроком 7,5 м. По довжині будівля складу поділена на дві температурні секції деформаційним 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 будівлі виконані з профільованого настилу, вкритого полімерним покриттям, який влаштовується по прогонах покриття і конструкціях фахверку поздовжніх та торцевих стін.

Просторова жорсткість каркасу 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 обпирання крана-перевантажувача та транспортеру, призначеного для подачі сірки. Зварні балки технологічної площадки виконуються з універсальної листової сталі класу С245.



Рис. 1. Зведення поперечних рам каркасу складської будівлі.

Розробка 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 вузлах 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 каркасу будівлі, розробленого

відділом просторових споруд ВАТ "УкрНДІпроектстальконструкція" ім. В. М. Шимановського. Початкові значення геометричних змінних проектування: $H_{zd}=39,58\text{м}$, $H_{zdk}=10,63\text{м}$, $h_2=h_4=h_6=h_7=h_{op}=b_{op}=2,6\text{м}$, $b_7=0,55773\text{м}$.

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 скінчених 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.

Постійні навантаження включали власну вагу поперечної рами, прогонів покрівлі, в'язей шатра покрівлі, пожежних драбин і площадок, профільованого настилу, який влаштовується в якості огорожуючої конструкції вздовж зовнішнього

Таблиця 1. Змінні розміри поперечних перерізів несучих елементів поперечної рами каркасу.

Призначення та розташування конструктивного елемента	Номер типу жорсткості	Імена змінних, діаметр×товщина	Початкові розміри, мм×мм	Номер типу жорсткості	Імена 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	–	–	–
Гребень 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	–	–	–

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 каркасу, приймалися відповідно до технологічного завдання на проектування (рис. 3).

Збір кліматичних навантажень виконувався відповідно до вимог [6]. Так, при оптимізаційному

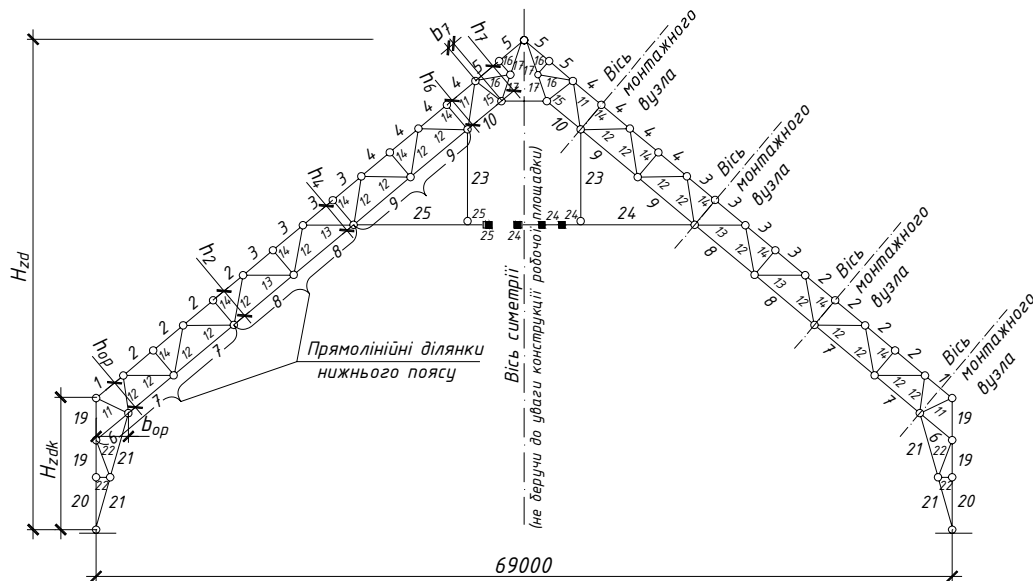


Рис. 2. Розрахункова схема поперечної рами із зазначенням геометричних змінних проектування та нумерацією типів жорсткості.

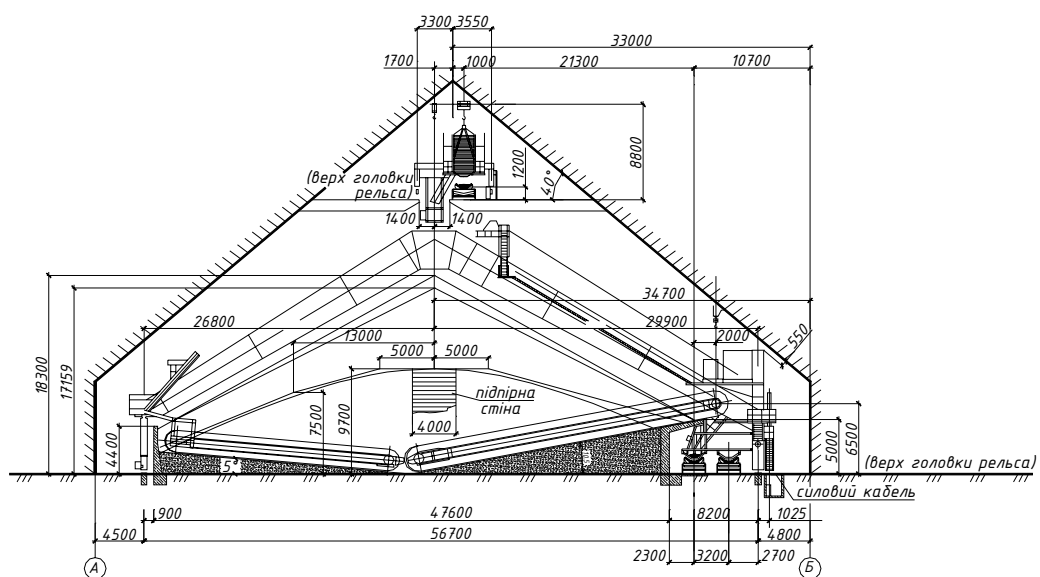


Рис. 3. Схема розміщення технологічного обладнання.

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. 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 безфасоночних вузлів із труб.

Нормативні обмеження включали:

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

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

- 2) обмеження стійкості центрально-стиснутих елементів:

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

- 3) обмеження граничної гнучкості:

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

- 4) обмеження лінійних переміщень:

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

У формулах (1) – (4) позначено: i, 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 бруто; $R_{y,j}$ – 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 та 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 $l_{ef,xy,j} / i_{xy,j}$; $\delta_{x,i,k}$ 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 $l_{ef,xy,j}$ приймались 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 приймались за табл. 4 [6] з врахуванням прим. 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 примикальних 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. Аналітичний вираз маси конструкції у залежності від змінних розмірів поперечних перерізів запишемо як:

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

де A_j і l_j – відповідно площа поперечного перерізу і довжина j -го елемента конструкції;
 ρ – густина сталі, $\rho = 7850 \text{ кг/м}^3$;
 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 двошарнірної 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 огорожуючих 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^{nn} , вартості несучих конструкцій робочої площадки C_M^{pn} та вартості огорожувальних конструкцій (профільованого настилу) $C_M^{\text{ок}}$, тобто:

$$C_M = C_M^{nn} + C_M^{pn} + C_M^{\text{ок}}$$

де:

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

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

$$C_M^{\text{ок}} = C_M^{\text{ок.ст}} + C_M^{\text{ок.пок}} = 1,035 k_{\text{ex}} (k_{np} (m_{np}^{\text{ст}} + m_{np}^{\text{пок}}) + 1,5 \times (c_{1,m}^{\text{ок.ст}} + c_{1,m}^{\text{ок.пок}})) = 1,035 \times 1,035 \times (1,13 \times (7,5 \times 2,0 \times (53,50 H_{zdk} + 65,59 \times \sqrt{(0,5L)^2 + (H_{zd} - H_{zdk})^2})) + 1,5 \times 119,09) = 970 H_{zdk} + 1190 \times \sqrt{(0,5L)^2 + (H_{zd} - H_{zdk})^2} + 190 \text{ грн}$$

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

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

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

Результати оптимізаційного розрахунку поперечних рам каркасу

Для розв'язку задачі параметричної оптимізації поперечних рам з елементами наскрізного перерізу використано градієнтний метод, докладно описаний у працях авторів [2, 3, 11].

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

Результати оптимізаційного розрахунку наведені у табл. 2. На рис. 4 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 каркасу 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 порівняно до отриманих оптимальних проектних рішень (див. табл. 2) і склали відповідно 21,78 т і 574102 грн. (для оптимального проектного рішення поперечної рами з прямолінійним нижнім поясом ригеля).

Висновок

Отримана оптимальна геометрична схема поперечних рам каркасу відрізняється від вихідного проектного рішення рами у першу чергу значно більшою відстанню між поясами наскрізних елементів у карнизному вузлі, що відповідає розподілу згинального моменту по довжині елементів і сприяє зменшенню розрахункових зусиль у поясах.

Проте необхідно відмітити, що непаралельність поясів наскрізних елементів поперечної рами призводить до значного ускладнення

конструктивних рішень її вузлів порівняно до вихідного проекту. Можна констатувати, що таке ускладнення конструктивної форми не знайшло належного чисельного відображення в складі розробленої функції мети, тому будь-яке порівняння отриманого оптимуму із вихідним проектним рішенням є неправомірним.

Висловлені міркування засвідчують необхідність проведення подальших досліджень щодо розробки такого критерію оцінки проектних рішень, який би дозволив у повній мірі описати специфіку виготовлення досліджуваної конструктивної форми.

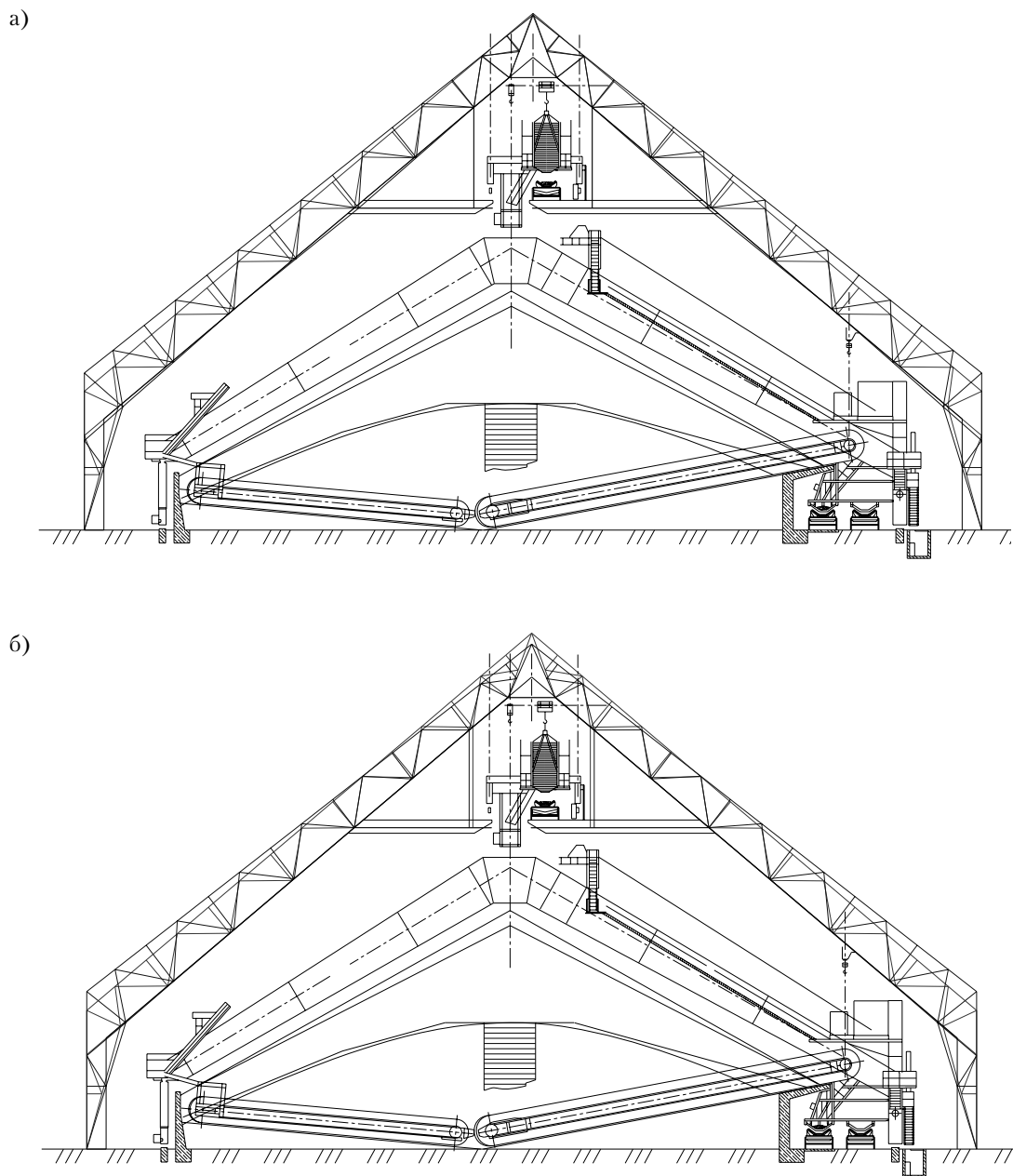


Рис. 4. Оптимальні проектні рішення поперечної рами з елементами наскрізного перерізу за критерієм мінімуму кошторисної вартості конструкції, для випадків, коли нижній пояс ригеля: а — прямолінійний; б — полігональний.

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 ригелю рами					
		криволін.	прямолінійний	криволін.	прямолінійний	неперервні	дискретн.
неперервні		дискретн.		неперервні		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
$d_{18} \times t_{18}$	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
<i>Після розрахунку безфасоночних вузлів несучих елементів ригелів і колон із труб, а також вузлів спряжень ригеля з колоною і монтажних вузлів ригеля</i>							
Маса, т	30,78	–	–	21,78	–	–	–
Кошторисна вартість, грн	786681	–	–	–	–	–	574102

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 сталених 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: 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 систем и конструкций. — М: Мир, 1983.
8. Adeli H., Kamal O. Efficient optimization of space trusses // Computer and Structures. — 24 (3). — 1986. — С. 502–511.
9. Bendsøe M. P. Optimization of structural topology, shape and materials, Berlin, Springer-Verlag, 1995.
10. Kirsch U., Optimum Structural Design, New York, McGraw-Hill, 1981.
11. 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.
12. Timo Turkkila. Discrete multicriteria optimization of truss structures with material selection // Proc. of Second World Congress on Structural and Multidisciplinary Optimization WCSMO-2, (Zakopane, 26-30 May, 1997). — С. 331-336.

Пелешко Іван Дмитрович є доцентом кафедри будівельного виробництва національного університету "Львівська політехніка". Наукові інтереси: оптимальне проектування складних технічних систем, оптимізація лінійно-деформованих стержневих конструкцій, різноманітні методології пошуку оптимального рішення.

Пальчик Михайло Миколайович є завідувачем відділу просторових споруд проектного комплексу ВАТ "УкрНДПроектстальконструкція ім. В. М. Шимановського", а також членом науково-технічної ради при Правлінні ВАТ "УкрНДПроектстальконструкція ім. В. М. Шимановського", яка розглядає найбільш важливі питання наукової та науково-технічної діяльності інституту. Наукові інтереси: проектування просторових споруд унікальних будівель і споруд, сучасні зварні конструкції із труб.

Юрченко Віталіна Віталіївна є доцентом кафедри металевих і дерев'яних конструкцій Київського національного університету будівництва та архітектури, членом європейської асоціації науково-дослідних та освітніх організацій в галузі металобудівництва. Наукові інтереси: оптимальне проектування стержневих конструкцій, пошук оптимальної топології стержневих лінійно-деформованих систем, удосконалення методів розрахунку вузлів металевих конструкцій.

Біляєв Микита Аркадійович є інженером III категорії Українського науково-дослідного і проектного інституту сталевих конструкцій ім. В. М. Шимановського, випускником Київського національного університету будівництва та архітектури. Наукові інтереси: оптимальне проектування стержневих конструкцій, пошук оптимальної топології стержневих лінійно-деформованих систем, удосконалення методів розрахунку вузлів металевих конструкцій.

Пелешко Іван Дмитрієвич являється доцентом кафедри строительного производства національного університета "Львовская політехніка". Научні інтереси: оптимальне проектування складних технічних систем, оптимізація лінійно-деформованих стержневих конструкцій, різні методології пошуку оптимального рішення.

Пальчик Михайл Николаєвич являється завідуючим відділом просторових споруд проектного комплексу ОАО "УкрНДПроектстальконструкція ім. В. Н. Шимановського", а також членом науково-технічного совету при Правлінні ОАО "УкрНДПроектстальконструкція ім. В.Н.Шимановського", розглядає найбільш важливі питання наукової та науково-технічної діяльності інституту. Научні інтереси: проектування просторових споруд унікальних будівель і споруд, сучасні зварні конструкції із труб.

Юрченко Віталіна Віталіївна является доцентом кафедры металлических и деревянных конструкций Киевского национального университета строительства и архитектуры, членом европейской ассоциации научно-исследовательских и образовательных организаций в области металлостроительства. Научные интересы: оптимальное проектирование стержневых конструкций, поиск оптимальной топологии стержневых линейно-деформируемых систем, усовершенствование методов расчета узлов металлических конструкций.

Беляев Никита Аркадиевич является инженером III категории Украинского научно-исследовательского и проектного института стальных конструкций им. В. Н. Шимановского, выпускником Киевского национального университета строительства и архитектуры. Научные интересы: оптимальное проектирование стержневых конструкций, поиск оптимальной топологии стержневых линейно-деформируемых систем, усовершенствование методов расчета узлов металлических конструкций.

Peleshko Ivan Dmytrovych is an Associate Professor of the Department of Building Production of the National University "Lvivska politechnika". His research interests include optimum design of completed technical systems, optimization of elastic frame structures, development of different techniques for optimum decision searching.

Pal'chik Mikhail Nikolayevich — head of the department of spatial structures of V.M. Shimanovsky Public Corporation "UkrNIiproektstal'konstruktsiya", a member of the Scientific and Technical Council at the Board of Administration of the V.M. Shimanovsky Public Corporation "UkrNIiproektstal'konstruktsiya", which is concerned with the most important questions of the scientific and scientific and technical activity of the Institute. Scientific interests: design of spatial structures of unique buildings and structures, up-to-date welded pipe structures.

Yurchenko Vitalina Vitaliivna is an Associate Professor of the Department of Steel and Wooden Structures of Kyiv National University of Civil Engineering and Architecture. Yurchenko Vitalina Vitaliivna is a member of the European Network of Research and Development and Training Organizations in Metal Branch. Her research interests include optimum design of steel frame systems, topology optimization of elastic frame structures, improvement of the design techniques for steel structural joints and connections.

Belyayev Nikita Arkad'yevich — a third-category engineer of the Ukrainian V.M. Shimanovsky Research and Design Institute of Steel Structures, a graduate of Kiev National University of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: optimal design of framing, search for an optimal topology of linear-strained systems, improvement of methods of analysis of metal structures.