

УДК 624.014

Оптимальное проектирование металлоконструкций зданий с вантовым покрытием

Харченко Р.Б., к.т.н., **Царик А.В.**, аспирант

ОАО «УкрНИИпроектстальконструкция им. В.Н. Шимановского»,
Украина

Анотація. Розглядається розв'язок задачі оптимального проектування несучих металлоконструкцій споруд із покриттям вантового типу. Наводяться розрахункові співвідношення, схема чисельного рішення, способи врахування фізичних особливостей задачі, чисельні результати.

Аннотация. Рассматривается решение задачи оптимального проектирования несущих металлоконструкций здания с покрытием вантового типа. Приводятся расчетные соотношения, схема численного решения, способы учета физических особенностей задачи, численные результаты.

Abstract. The task of optimal design of carrying iron building's with cable-stayed structure is considered. Calculated relation, plan of numerical solution, devices of accounting physical singularity of the task, numerical results are given.

Ключевые слова: несущие металлоконструкции, ванты, проектирование, анкерные рамы.

Постановка задачі. Рассматривается пространственная несущая система протяженного в плане однопролетного здания, состоящего из установленных с определенным шагом несущих элементов в виде предварительно напряженных жестких нитей (прогонов), кровельных элементов, концевых анкерных рам, воспринимающих продольные усилия от прогонов-нитей. Рамы приняты из сварных двутавров, прогоны-нити – из высокопрочной оцинкованной проволоки, кровля – из листов профилированного настила. Материал конструкций работает в упругой стадии. Схема здания приведена на рис. 1.

Считаем заданными все геометрические параметры здания (пролет, длина здания, высота рамы), кроме шага рам. Заданы также нагрузка, прочностные и физические характеристики материалов. Сечения всех несущих элементов (т.е. количество проволок в вантах, площадь сечений ригелей, колонн и оттяжек рам) считаем искомыми параметрами проектирования. Задача несколько упростится, если величину неизвестного шага рам примем в виде ряда дискретных значений: $l_0 = 3$ м, 6 м, 9 м, 12 м. Задачу проектирования металлоконструкций здания рассмотрим как задачу оптимального проектирования на основе критерия стоимости конструкции в деле:

$$C_g(X_1, X_2, \dots, X_n) \rightarrow \min \quad (1)$$

при ограничениях по прочности:

$$\sigma = (X_1, X_2, \dots, X_n) \leq [\sigma] \quad (2)$$

и перемещениям:

$$u = (X_1, X_2, \dots, X_n) \leq [u], \quad (3)$$

а также условия устойчивости по Эйлеру и ограничениях дискретности, где X_1, X_2, \dots, X_n – неизвестные задачи, а именно: X_1 – шаг рам; X_2 – количество проволок в ванте; X_3, X_4 – площадь сечения соответственно ригеля и колонн промежуточной рамы; X_5, X_6 – площадь сечения соответственно ригеля и колонн концевых анкерных рам; X_7 – площадь сечения оттяжек концевых рам; X_8 – площадь сечения настила кровли.

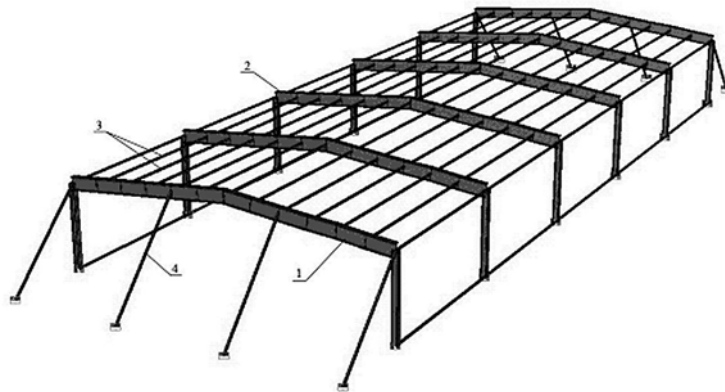


Рис. 1. Конструкция схемы здания:
1 – торцовая рама; 2 – промежуточная рама каркаса;
3 – нити-струны; 4 – оттяжка торцовой рамы

Расчетные соотношения. Расчетные схемы основных несущих элементов здания приведены на рис. 2.

Функция стоимости представляется в виде

$$C = C_{np} A_{np} X_2 \left[X_1 + \frac{1}{2} \int_l (y')^2 dx \right] \frac{L}{X_1} \gamma + C_{cm} (X_3 L_p + 2X_4 h) \left(\frac{L}{X_1} - 1 \right) \gamma + C_{cm} (X_5 L_p + 4X_6 h) \cdot 2\gamma + C_n X_7 L_p \frac{L}{X_1} \gamma, \quad (4)$$

где $C_{пр}$, $C_{ст}$, $C_{н}$ – удельная цена стали соответственно высокопрочной проволоки вант, стали металлоконструкций рам и настила кровли; $A_{пр}$ – площадь сечения одной проволоки диаметром 6 мм; L – длина здания; $y(x)$ – функция провисания ванты; γ – удельная масса стали; I – момент инерции сечения одной проволоки ванты; E – модуль упругости проволоки ванты.

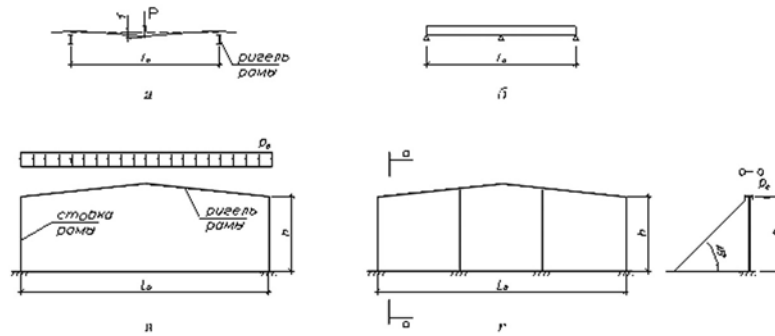


Рис. 2. Расчетные схемы
а – ванты-прогона; б – настила кровли; в – промежуточной рамы;
г – концевой анкерной рамы

Параметрами расчета являются: для многопролетного ванты-прогона $y_0(x), y'(x)$ – функции провисания ванты соответственно в начальном и расчетном состояниях; u_0, u – безразмерные параметры; H_0, H – усилия в ванте соответственно в начальном и расчетном состояниях; f_0, f – стрела провисания в начальном и расчетном состояниях; M – момент в сечении, где приложена сосредоточенная нагрузка; g – начальная нагрузка на вант (от собственного веса), g_p – расчетная нагрузка на ванту.

Расчетные соотношения для ванты, рассматриваемой как нить конечной жесткости [1], при этом продольное усилие определяется как для гибкой нити:

$$y_0 = \frac{gl_0^4}{384EI} \cdot \frac{48}{u_0} \left(\frac{u_0^2}{4} - 2th \frac{u_0}{2} \right); \quad (5)$$

$$y = \frac{5}{384} \cdot \frac{g_p l_0^4}{EI} \cdot \frac{48}{5u^4} \left\{ \frac{u^2}{4} - u \left[\frac{u^2}{u_0^2} \left(1 - \frac{thu_0}{u_0} \right) \right] \frac{th \frac{u}{2}}{2} \right\} + \frac{pl^3}{192EI} \cdot \frac{4}{u^3} \left(\frac{u^2}{u} \cdot \frac{chu - shu}{uchu - shu} - th \frac{u}{2} \right); \quad (6)$$

$\omega = y - y_0$ – прогиб ванты в расчетном сечении от расчетной нагрузки;

$$y'_0 = \frac{dy_0}{dx_0} = -\frac{32}{u_0^3} \left[u_0 \xi - u_0 \frac{shu_0 \xi \cdot chu_0 (1 - \xi)}{chu_0} \right]; \quad (7)$$

$$y' = \frac{dy}{dx_0} = \frac{g_p l_0^3}{24EI} \frac{6}{u^3} \left[u(0,5 - \xi) - u \left(0,5 - \frac{shu \xi \cdot chu(1 - \xi)}{shu} \right) \right] + \frac{pl^2}{16EI} \cdot \frac{8}{u^2} \left[\frac{shu}{2} \cdot \frac{shu \xi \cdot shu(0,5 - \xi)}{shu} \right]; \quad (\xi = 0; 0,1; 0,2 \dots, 1); \quad (8)$$

$$M_{\xi=0,5} = \frac{g_p l_0^2}{12} \cdot \frac{6}{u^2} \left[0,5 - u \left(\frac{1}{2thu} - th \frac{u}{2} \right) \right] + \frac{pl_0}{8} \cdot \frac{8}{u} \left(sh \frac{u}{2} - \frac{1}{4} th \frac{u}{2} \right). \quad (9)$$

Параметр u_0 определяется решением трансцендентного уравнения

$$\frac{384 f_0 EI}{g l_0^4} = 24 \left(\frac{1}{2u_0^2} - \frac{chu_0 - 1}{u_0^3 shu_0} \right); \quad (10)$$

$$H_0 = \frac{4u_0^2 EI}{l_0^2}. \quad (11)$$

Усилие нити определяется уравнением

$$H^3 - H_0 H^2 - \frac{EFD}{2l_0} = 0, \quad (12)$$

где
$$D = \frac{g^2 l_0^2}{12} + \frac{gpl_0}{4} + \frac{p^2}{4}. \quad (13)$$

Параметр u определяется по формуле

$$u = \frac{l_0}{2} \sqrt{\frac{H}{EI}}. \quad (14)$$

Для ригелей и колонн промежуточной рамы принимаем соотношения, приведенные в [2] при условии $\frac{I_p}{I_k} = 1,785$, соответствующее условию равенства пролетного и опорного изгибающих моментов в ригеле. Тогда,

$$M_{\text{риг}}^{\text{расч}} = \frac{qL_p^2}{16}.$$

Определение усилия в колоннах рамы и максимальный прогиб ригеля не вызывает затруднений. Также не вызывает затруднений определение величин напряженно-деформированного состояния в элементах концевых рам [3]. Сечение профилированного настила кровли принято рассмотрением его по двухпролетной расчетной схеме. Для каждого из рассмотренных несущих элементов с искомыми параметрами проектирования приняты ограничения (2) – (3), соответствующие условиям прочности, устойчивости и деформативности, а также конструктивным требованиям.

Приведем алгоритм численного решения, сводящийся к методу прямого поиска [3]:

1 шаг. Ввод начальных значений конструктивных и оптимизируемых параметров системы.

2 шаг. Решение задачи определения напряженно-деформированного состояния системы. Проверка ограничений.

3 шаг. Если ограничения не соблюдаются – вводятся поправки на применение вектора \vec{x} . Повторяется проверка ограничений.

4 шаг. Вычисление целевой функции в базовой точке $x^{(0)}$. Запоминание величины $f(x^{(0)})$.

5 шаг. Изменение значений искоемых переменных в цикличном порядке. Задание новой точки $x^{(6)}$.

6 шаг. Повторная проверка ограничений.

7 шаг. Вычисление $f(x^{(6)}) = f(x)$.

8 шаг. Проверка, меньше ли стрела $f(x)$, чем $f(x^{(0)})$ в исходной базисной точке.

Если нет, то задать новую базисную точку. Проверка ограничений, повторное вычисление функции цели. Если да, то проверка: является ли величина Δx меньше некоторого наперед заданного числа ε . Если «да», то «останавливаем». Если «нет», то уменьшается параметр возмущения по минимально допустимым значениям оптимизируемых параметров.

Пример

Заданные параметры:

$L = 90$ м; нагрузка $q = 0,2$ т/м²; $R_{np} = 9000$ кг/м²; $R_{cm} = 3000$ кг/м²;
 $E_{np} = 1,9 \cdot 10^7$ т/м²; $E_{cm} = 2,1 \cdot 10^7$ т/м²; $d_{np} = 6$ мм; $L_p = 18,0$ м;

В результате решения получено:

$X_1 = l_0 = 6,0$ м; $X_2 = n = 12,0$ м; $X_3 = A_p = 276$ см²; $X_4 = A_k = 198$ см²;
 $X_5 = A_p^{анк} = 380$ см²; $X_6 = A_k^{анк} = 85$ см²; $X_7 = A_{omm}^{анк} = 18$ см².

Минимальное значение целевой функции $C^{min} = 357417$ грн.

Выводы

В изложенной задаче нелинейного оптимального проектирования присутствует нелинейная целевая функция, 7 неизвестных параметров и 15 ограничений, уравнения состояний с трансцендентными функциями. Физический смысл задачи позволяет свести ее к системе с одним независимым неизвестным параметром и шестью зависимыми от него параметрам, причем искомое независимое может быть представлено в виде дискретного ряда величин. Таким образом, задача сводится к простой и достаточно легко решаемой (на калькуляторе), без применения сложных методов математического программирования

Литература

- [1] В.Н. Шимановский, Ю.В. Смирнов, Р.Б. Харченко. Расчет висячих конструкций. – К.: Будівельник, 1973.
- [2] Г.С. Глушков и др. Формулы для расчета рам. – М.: Госстройиздат, 1958.
- [3] Методические рекомендации по проектированию и монтажу покрытий струнного типа для зданий сельскохозяйственного назначения. Киев, НИИСК, 1982.

Надійшла до редколегії 12.06.2009 р.