

Дослідження параметрів попередньо напружених металевих комбінованих вантових систем з підвісним транспортним устаткуванням

Володимир Фурса

м. Київ, Україна,
volodymyrfursa@gmail.com, orcid.org/0000-0003-4737-8409

DOI: 10.32347/2522-4182.4.2019.78-88

Анотація. Попереднє напруження в будівельних конструкціях дозволяє розподіляти зусилля і матеріал між елементами конструкції таким чином, щоб у кожному з них хоча б при одній комбінації нагрузок фактичне напруження було рівним або близьким розрахунковому опору матеріалу. Досліджено попередньо напружені металеві комбіновані вантові системи з підвісним транспортним устаткуванням, розраховані з оптимізацією розподілу зусиль і матеріалу за запропонованими автором методикою та алгоритмом. Оптимізація виконана з використанням лінійного програмування. За допомогою створеної автором комп'ютерної програми проведено розрахунки металевих конструкцій комбінованих вантових покриттів промислових будівель з прогонами 60, 85 і 105 метрів на дію допустимих комбінацій постійного, снігового, вітрового і кранового навантажень. Порівняння результатів розрахунків велося за максимальними деформаціями та дійсній масі конструкції, з використанням побудованих автором графіків залежності будівельних коефіцієнтів маси вант від їх довжини. Наведено рекомендації щодо розрахунку подібних конструкцій за недеформованою схемою, щодо розбиття балки жорсткості на панелі, способу сполучення балки жорсткості, пілонів і стояків, кількості вант підвіски, висоти пілонів, куту нахилу відтяжок, вибору матеріалу вант, контролю модуля пружності матеріалу вант. Для прикладу приведені графіки, що ілюструють результати деяких досліджень для окремих прогонів конструкції.

Ключові слова: попереднє напруження, оптимізація, алгоритм розрахунку, металеві стрижневі конструкції, вантові системи.

Економії металу в будівництві найбільше сприяють розвиток конструктивних форм різних видів металевих конструкцій, застосування попереднього напруження і високоміцних матеріалів, оптимізація розподілу зусиль і матеріалу в елементах



Володимир Фурса
к.т.н., доц.

конструкцій. До систем, де ці напрямки поєднуються найбільш ефективно, відносяться і комбіновані вантові системи.

МЕТА І МЕТОДИ

Завдання розрахунку попередньо напружених стрижневих систем полягає в тому, щоб при заданих геометричній схемі, матеріалі, схемі, величині і можливих комбінаціях зовнішніх навантажень визначити поперечні перерізи статично невизначуваної стрижневої системи, контрольовані зусилля попереднього напруження в зайвих в'язях, і, у разі потреби, привантажувачі, що забезпечують мінімум об'єму, маси або вартості конструкції. При цьому можуть існувати додаткові вимоги, наприклад конструктивні (вимоги уніфікації елементів, обмеження сортаменту, тощо).

Контрольованими зусиллями попереднього напруження називаються зусилля в зайвих в'язях, які необхідно проконтролювати під час здачі конструкції в експлуатацію, коли тимчасові навантаження на споруду відсутні, а привантажувачем - додаткове зовнішнє постійне навантаження, яке може знадобитися для вигіднішого вирішення або для виключення з роботи гнучких елементів.

Прийняті наступні допущення і основні розрахункові передумови: матеріал вважа-

ється однорідним і ідеально пружним; елементи мають кусково-постійний переріз по довжині; умови міцності приймаються за нормальними напруженнями; гнучкі елементи - стрижні, здатні сприймати тільки розтягувальні зусилля; можливе виключення з роботи гнучких елементів усуваються введенням такого попереднього напруження або привантажувачів, щоб при будь-якій комбінації навантажень зусилля в гнучких елементах були такими, що розтягують; розраховуються плоскі системи, стійкість яких із площини вважається забезпеченою; розрахунок ведеться за недеформованою схемою; враховуються реальні умови проектування відповідно до чинних норм.

Конструкція повинна розраховуватись на усіх стадіях існування: в процесі монтажування, створення попереднього напруження, в експлуатації. Але для спрощення, частину з них можна враховувати після закінчення проектування, у вигляді перевірконого розрахунку.

За початкові дані прийняті: розрахункові постійні і тимчасові навантаження і їх можливі комбінації; розрахункові опори і модулі пружності матеріалів, застосованих в конструкції; матриця площ перерізів (сортамент) гнучких елементів і матриці площ, моментів інерції і моментів опору перерізів жорстких елементів; таблиця коефіцієнтів поздовжнього згину центрально стислих стрижнів для матеріалів жорстких елементів.

Розрахунок досліджуваних конструкцій здійснюється за методикою, розробленою В.В.Трофимовичем і доповненою В.О.Пермяковим та В.О.Володимирським для одного завантаження [1] та розвинутою автором для багатьох завантажень, шляхом уведення надмірних обмежень для жорстких перерізів, коригування значень ядрових відстаней перерізів жорстких елементів та коефіцієнтів поздовжнього згину на кожному циклі розрахунку і розробки алгоритму розрахунку [2, 3], де розрахунок ведеться у вигляді наступної системи послідовних операцій:

1. Вибирається основна статично визначна система методу сил і призначаються розрахункові перерізи в елементах.

2. Формуються вихідні матриці методу сил: $\mathbf{P} = \|p\|_{\tau \times t}$ - матриця навантажень, де t

- кількість комбінацій зовнішніх навантажень, τ - максимальне число силових чинників по усіх t завантаженнях; $\mathbf{V} = \|b\|_{m \times n}$ - матриця зусиль в усіх розрахункових перерізах основної системи від усіх одиничних статичних невідомих, де m - загальне число зусиль в розрахункових перерізах усіх елементів, n - міра статичної невизначеності;

$\bar{\mathbf{V}}_i = \|\bar{b}_i\|_{m \times v}$ - те саме від v одиничних постійних навантажень, що прикладаються до здійснення попереднього напруження;

$\mathbf{V}_p = \|\bar{b}_p\|_{m \times \tau} = \mathbf{V}_p^0 + \mathbf{V}_p^\Delta$ - те саме від усіх одиничних зовнішніх силових чинників, де

$\bar{\mathbf{V}}_p^0 = \|\bar{b}_p^0\|_{m \times \tau}$ - від одиничних зовнішніх навантажень, приведених до вузлових навантажень, а $\bar{\mathbf{V}}_p^\Delta = \|\bar{b}_p^\Delta\|_{m \times \tau}$ - матриця, що враховує вплив місцевих завантажень;

$\mathbf{P}_i = \|p_i\|_{v \times 1}$ - матриця-стовпець навантажень, які виконуються до здійснення попереднього напруження. При розрахунку досліджуваних конструкцій, привантажувачі вант до балки жорсткості, виявилися непотрібними, тому тут не розглядаються.

3. Для першого наближення приймаються початкові перерізи елементів системи.

4. Знаходиться матриця зусиль в розрахункових перерізах від навантажень, які прикладаються до здійснення попереднього напруження.

5. Формується матриця податливості усіх елементів, що розглядаються самостійно $\mathbf{F} = \|f\|_{m \times m} = \begin{pmatrix} \mathbf{F}_1 & & & 0 \\ & \mathbf{F}_2 & & \\ & & \dots & \\ 0 & & & \mathbf{F}_h \end{pmatrix}$, де h

- кількість елементів в системі. Для j -го

елементу, при обліку впливу на переміщення тільки подовжньої деформації,

$$\mathbf{F}_j = l_j / E_j A_j \quad \text{і} \quad \mathbf{F}_j = l_j / 6E_j I_j \begin{bmatrix} 2 & 1 \\ 1 & 2 \end{bmatrix},$$

що враховується вплив тільки вигину в одній з головних площин інерції, де E_j - модуль пружності матеріалу, A_j - площа перерізу, а I_j - момент інерції перерізу.

6. Реалізується алгоритм Дж. Аргіріса (англ. Argyris J.H.) [5] - знаходиться матриця зусиль самонапруження від усіх комбінацій зовнішніх навантажень:

$$\mathbf{S}_{s.s.} = \bar{\mathbf{S}}_{s.s.} \mathbf{P} \rightarrow \rightarrow = [\bar{\mathbf{B}}_p - \mathbf{B}(\mathbf{B}'\mathbf{F}\mathbf{B})^{-1}(\mathbf{B}'\mathbf{F}\bar{\mathbf{B}}_p^0)]\mathbf{P}, \quad (2)$$

де $\bar{\mathbf{S}}_{s.s.} = \|\bar{\mathbf{S}}_{s.s.}\|_{m \times \tau}$ - матриця зусиль самонапруження від одиничних значень зовнішніх силових чинників, а \mathbf{B}' - транспонована матриця \mathbf{B} , тобто матриця, в якій рядки є стовпцями матриці \mathbf{B} .

7. Формується система обмежень, кількість яких повинна перевищувати кількість невідомих. Перша група обмежень - зусилля в гнучких (не працюючих на стиск) елементах позитивні при будь-якій розрахунковій комбінації навантажень:

$$S_j = \sum_{i=1}^n S_{ji} X_{p.s.i} + S_{ij} + (S_{s.s.j})_{\min} \geq 0, \quad (3)$$

$$A_k \geq \sum_{i=1}^n (-N_{ri} / \varphi_r - M_{ri} / \rho_r) X_{p.s.i} / R_{yk} + (-N_{ir} / \varphi_r - M_{ir} / \rho_r) / R_{yk} + (-N_{s.s.r} / \varphi_r - M_{s.s.r} / \rho_r)_{\max} / R_{yk};$$

$$A_k \geq \sum_{i=1}^n (-N_{ri} / \varphi_r + M_{ri} / \rho_r) X_{p.s.i} / R_{yk} + (-N_{ir} / \varphi_r + M_{ir} / \rho_r) / R_{yk} + (-N_{s.s.r} / \varphi_r + M_{s.s.r} / \rho_r)_{\max} / R_{yk};$$

$$A_k \geq \sum_{i=1}^n (N_{ri} - M_{ri} / \rho_r) X_{p.s.i} / R_{yk} + (N_{ir} - M_{ir} / \rho_r) / R_{yk} + (N_{s.s.r} - M_{s.s.r} / \rho_r)_{\max} / R_{yk};$$

$$A_k \geq \sum_{i=1}^n (N_{ri} + M_{ri} / \rho_r) X_{p.s.i} / R_{yk} + (N_{ir} + M_{ir} / \rho_r) / R_{yk} + (N_{s.s.r} + M_{s.s.r} / \rho_r)_{\max} / R_{yk},$$

де N_{ri} і M_{ri} - поздовжня сила і згинальний момент в r -ому розрахунковому перерізі від одиничного i -го зусилля попереднього напруження, узяті з матриці \mathbf{B} , φ_r і

де S_{ji} - зусилля в j -ому гнучкому елементі основної системи від i -го одиничного попереднього напруження; S_{ij} - те ж від постійного навантаження, що прикладається до здійснення попереднього напруження; $X_{p.s.i}$ - i -те зусилля попереднього напруження, що оптимізується; n - міра статичної невизначеності; $(S_{s.s.j})_{\min}$ - мінімальне з усіх комбінацій навантажень зусилля самонапруження в j -ому елементі, узяті з матриці $\mathbf{S}_{s.s.}$.

Друга група обмежень містить умови несучої здатності жорстких елементів. Для кожного r -го розрахункового перерізу жорстких елементів складаються обмеження:

$$A_k - A_{p.s.r} - A_{ir} - (A_{s.s.r})_{\max} \geq 0 \quad (4)$$

де A_k - площа k -го типу перерізу жорстких елементів - незалежна змінна величина, на яку накладається обмеження $A_k \geq 0$;

$A_{p.s.r}, A_{ir}, A_{s.s.r}$ - площі r -го перерізу відповідно від зусиль попереднього напруження, від зусиль, викликаних постійними навантаженнями, що прикладаються до здійснення попереднього напруження, і від зусиль самонапруження, визначувані за допомогою спрощеної формули Ясинського Ф.С. (рос. Ф.С.Ясинский) [6]. Оскільки, в загальному випадку, знаки розрахункових зусиль в жорстких елементах заздалегідь не відомі, для кожного розрахункового перерізу складається чотири обмеження (4):

ρ_r - коефіцієнт поздовжнього згину елемента, якому належить r -ий переріз і мінімальна ядрова відстань цього перерізу - відношення моменту опору до площі перері-

зу $\rho_r = W_r / A_r$, R_{yk} - розрахунковий опір R_y матеріалу з k -им типом перерізу. Зусилля $N_{s.s.r}$ і $M_{s.s.r}$ беруться із матриці $S_{s.s.}$, відповідають одній комбінації навантажень і забезпечують максимальне значення $A_{s.s.r}$.

Правило знаків для моментів може бути прийняте будь-яким, а поздовжні сили позитивні при розтягуванні елемента. Спрощена формула, яка включає ядрову відстань, в обмеженнях (4) використовується для лінеаризації залежності площі перерізу елемента від невідомих і тільки на етапі оптимізації.

8. Складається рівняння цільової функції. Проведені дослідження [7] показали, що цільову функцію для досліджуваного класу конструкцій можна записати у вигляді теоретичного об'єму основних елементів конструкції, а не вартості конструкції "в роботі" або приведених витрат [8]. Для зменшення розмірів масиву обмежень, площі перерізів гнучких елементів доцільніше виразити через зусилля:

$$A_j = \left(\sum_{i=1}^n S_{ji} X_{p.s.i} + S_{ij} + (S_{s.s.j})_{\max} \right) / R_{yj}, \quad (5)$$

де R_{yj} - розрахунковий опір R_y матеріалу j -го гнучкого елемента.

Відкидаючи вільний член, який не залежить від змінних $X_{p.s.i}$, а тому і не впливає на вирішення задачі мінімізації, цільову функцію запишемо так:

$$Z = \sum_{k=1}^m A_k l_k + \sum_{j=1}^p \left(\sum_{i=1}^n S_{ji} X_{p.s.i} / R_{yj} \right) l_j, \quad (6)$$

де m - кількість груп жорстких елементів з однаковим типом перерізу, а p - кількість гнучких елементів.

9. Симплекс-методом вирішується основне завдання лінійного програмування - знайти максимум функції (6) при обмеженнях (3) - (4). Для знаходження мінімуму, в правій частині функції (6) знаки усіх членів міняються на протилежні. Знаходиться

Z_{\min} , матриця оптимальних зусиль попереднього напруження $X_{p.s.} = \|x_{p.s.}\|_{n \times 1}$ і площі перерізів жорстких A_k і гнучких A_c або тільки жорстких елементів.

10. Визначаються зусилля в розрахункових перерізах від оптимальних зусиль попереднього напруження:

$$S_{p.s.} = \mathbf{B} X_{p.s.} \quad (7)$$

11. Визначаються контрольовані зусилля попереднього напруження:

$$S_s = \mathbf{B}_i + S_{p.s.} \quad (8)$$

12. Визначаються повні зусилля в розрахункових перерізах системи:

$$S_{ij} = S_{s.s.ij} + S_{si}, \quad (9)$$

де $i = 1, 2, \dots, m$; $j = 1, 2, \dots, t$; m - загальне число зусиль в розрахункових перерізах усіх елементів; t - кількість комбінацій зовнішніх навантажень.

13. Виконується підбір перерізів відповідно до чинних будівельних норм.

14. Порівнюються отримані площі перерізів елементів з початковими для цього наближення. У разі розбіжності між площами коригуються геометричні характеристики перерізів елементів A_j , A_k , I_k , ρ_k , φ_r , навантаження від власної ваги і здійснюється перехід до пункту 5.

15. Розрахункові навантаження наводяться до нормативних, тобто матриці \mathbf{P} і \mathbf{P}_i наводяться до матриць \mathbf{P}^n і \mathbf{P}_i^n .

16. Визначаються переміщення по напрямках прикладених зовнішніх сил:

$$\mathbf{W} = (\bar{\mathbf{B}}_p^0)' \mathbf{F} \bar{\mathbf{S}}_{s.s.} \mathbf{P}^n; \quad (10)$$

$$\mathbf{W}_i = (\bar{\mathbf{B}}_p^0)' \mathbf{F} \bar{\mathbf{B}}_i \mathbf{P}_i^n; \quad (11)$$

$$\mathbf{W}_{p.s.} = (\bar{\mathbf{B}}_p^0)' \mathbf{F} \mathbf{B} X_{p.s.}, \quad (12)$$

де $(\bar{\mathbf{B}}_p^0)'$ - транспонована матриця $\bar{\mathbf{B}}_p^0$.

Процес розрахунку, описаний алгоритмом, є таким, що швидко збігається. При

довільному призначенні початкових перерізів елементів, достатньо від 4 до 6 етапів розрахунку, а при осмисленому – від 2 до 3, залежно від кроку елементів сортаментів. Застосування при розрахунку сортаментів вирішує проблему інтуїтивного призначення ядрових відстаней перерізів і коефіцієнтів поздовжнього згину жорстких елементів. Крім того підвищується точність рішення, оскільки автоматично відпадає необхідність задаватися мірою точності рішення. Прийняття контрольованих зусиль попереднього напруження як шуканих, відповідає вимогам проектувальників і будівельників.

Запропонований алгоритм реалізований у вигляді комп'ютерної програми. Виконані експериментальні проектування показали, що істотну економію металу можна отримати як при заміні комбінованих полігональних ферм на комбіновану вантову систему [2] так і від оптимізації зусиль попереднього напруження в комбінованій вантовій системі покриття [3].

ОСНОВНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

За допомогою програми досліджено залежність маси і деформативності конструкцій металевих комбінованих вантових систем покриттів з підвісним транспортним устаткуванням від різних чинників. Порівняння результатів розрахунку при цьому велося за дійсною масою конструкції і максимальними деформаціями. На підставі методики М.С.Стрелецького (рос. Н.С.Стрелецкий) [9] дійсна маса визначалася за формулою:

$$G_d = \sum_{i=1}^n G_{m,i} \psi_{b,i}, \quad (13)$$

де $G_{m,i}$ і $\psi_{b,i}$ - маса і будівельний коефіцієнт маси i -ої основної деталі; n - кількість основних деталей. Для балки жорсткості і пілонів $\psi_{b,i}$ приймався, на підставі вивчення літературних джерел і проведеного дослідного проектування, постійним: для балки жорсткості із зварних двотаврових балок - 1,16, для пілонів із зварних двотаврових профілів - 1,08, для пілонів із двох прокат-

них швелерів - 1,11, а для визначення $\psi_{b,i}$ вант побудовані графіки залежності ψ_b від довжини вант, з використанням робочих креслень анкерних конструкцій масового виробництва. Оскільки немає якої-небудь впорядкованої залежності ψ_b від діаметру каната, графіки побудовані для кожного каната окремо. Приклад таких графіків показано на Рис.1.

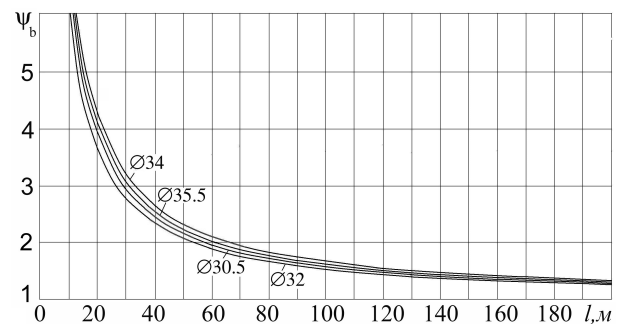


Рис.1. Залежність будівельних коефіцієнтів маси вант від довжини для закритих канатів (ГОСТ 3090-73)

Fig.1. The dependence of the construction coefficients of the weight of the guy on the length of the closed ropes (GOST 3090-73).

При виборі системи покриття розглядався спосіб передавання розпору і спосіб сполучення балки жорсткості, пілонів і стояків. Найбільш перспективна передача розпору на рами жорсткого каркаса допоміжних споруд, необхідність зведення яких характерна майже для усіх великопрогонових будівель. Створенням жорстких вузлів сполучення балки жорсткості, пілонів і стояків можна досягти зменшення максимальних прогинів на 1,0% - 1,5%, але при цьому виникають значні згинальні моменти в стояках і пілонах. Тому більш доцільні шарнірні сполучення цих елементів. В Табл.1 приведені максимальні прогини балки жорсткості для ангарів прогоном 85 м та висотою стояків і пілонів по 18 м, при навантаженнях та матеріалах, приведених для Рис.2.

Для безрозпірних і розпірних комбінованих вантових систем досліджувалася пра-

вомочність розрахунку за недеформованою схемою. У розглянутому діапазоні навантажень, фізичних і геометричних параметрів конструкції розбіжності між переміщеннями і зусиллями, отриманими при ро-

зрахунку з урахуванням зміни геометричної схеми і за недеформованою схемою, знаходяться в межах від 0,1 % до 1,9%, що є свідченням справедливості розрахунку подібних систем за недеформованою схемою.

Табл.1 Залежність максимальних прогинів від способу сполучення балки жорсткості, пілонів і стояків

Table 1 Dependence of the maximum deflections on the method of coupling the beam of stiffness, pylons and risers.

Схема конструкції	Максимальні прогини балки, см			Схема конструкції	Максимальні прогини балки, см		
	повні	в тому числі			повні	в тому числі	
		сніг	кран			сніг	кран
	99,90	60,20	39,70		33,00 (32,49)*	25,33	7,67
	96,06	58,04	38,02		29,90 (29,48)	22,76	7,14
	75,64	56,22	19,42		32,56 (32,01)	25,37	7,19
	73,23	54,43	18,80		29,66 (29,24)	22,69	6,97
	75,03	55,53	19,50		32,56 (32,08)	25,10	7,46
	71,95	53,15	18,80		29,50 (29,10)	22,56	6,94
	75,01	55,55	19,46		31,58 (31,18)	24,18	7,40
	71,91	53,16	18,75		28,95 (28,60)	22,03	6,92
	74,94	55,49	19,48		31,36 (30,98)	24,00	7,36
	71,89	53,13	18,76		28,85 (28,50)	21,95	6,90

* - в дужках приведено прогини балки при розрахунку конструкції за деформованою схемою

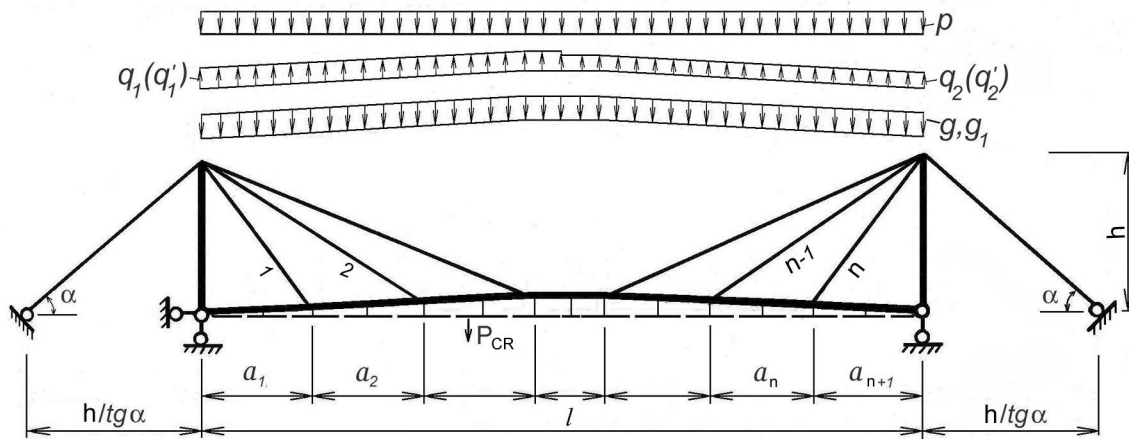


Рис.2. Схема досліджуваних конструкцій і діючих на них навантажень.
Fig.2. Scheme of the investigated structures and operating on them loads.

Дослідження попередньо напружених консольних вантових систем покриття показало, що, зважаючи на їх велику деформативність, для будівель з підвісним транспортним устаткуванням їх рекомендувати не можна.

Детальніше досліджувалися комбіновані вантові системи розпірних покриттів ангарів прогонами 60, 85 і 105 м із кроком рам 12 м, що найбільш відповідають технологічним вимогам, розрахункова схема яких показана на Рис.2. Як основна статично визначна система прийнята система з шарнірами у вузлах кріплення вант, а за зайві невідомі - опорні моменти в цих вузлах.

Досліджувана система розраховувалася на дію постійного $g = 11,8$ кН/м, снігового $p = 11,6$ кН/м, вітрового $q_1 = q'_2 = 5,40$ кН/м і $q_2 = q'_1 = 2,75$ кН/м та кранового $P_{cr} = 147,15$ кН (кран-балка вантажопідйомністю 50 кН) навантажень. При розрахунку використовувалися сортаменти зварних двотаврових балок і колонних профілів із сталі з $R_y = 210$ Н/мм² і $E = 2,06 \cdot 10^5$ Н/мм², а також закритих несучих канатів з $E = 1,67 \cdot 10^5$ Н/мм².

Досліджений вплив розрахункового опору матеріалу вант R_{yc} (Рис.3). Найбільш різке пониження маси конструкції спостерігається до $R_{yc} = 600-700$ Н/мм². Для по-

дальших досліджень прийнято $R_{yc} = 600$ Н/мм².

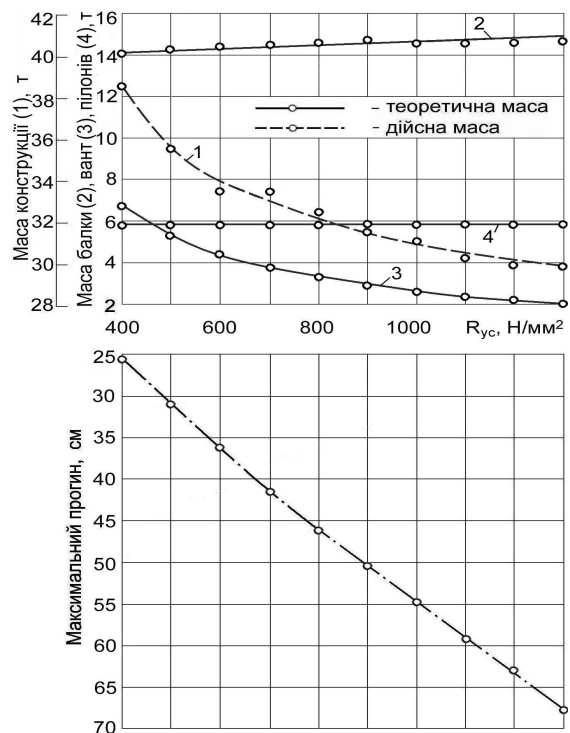


Рис.3. Вплив на масу і деформативність конструкції розрахункового опору матеріалу вант R_{yc} при $l = 105$ м, $n = 6$, $h = 22$ м, $\alpha = 35^\circ$.

Fig.3. Influence on the mass and deformability of the design of the resistance to the material of the guy R_{yc} at $l = 105$ m, $n = 6$, $h = 22$ m, $\alpha = 35^\circ$.

Найдоцільніше застосовувати закриті несучі канати з розрахунковим розривним зусиллям 1180 Н/мм^2 , оскільки застосування міцніших канатів обмежується загальними деформаціями системи.

Пропонується методика здійснення оптимального розбиття балки жорсткості постійного перерізу на панелі. Оптимальною можна рахувати таке розбиття, коли для кожного опорного перерізу і для одного з перерізів в кожній ділянці між вантами одна з нерівностей (4) виродиться в тотожність $0 \equiv 0$. В результаті реалізації симплекс-методу, для кожного обмеження знаходиться, на скільки необхідна площа для перерізу балки жорсткості в цілому більше необхідної площі для перерізу, якому належить обмеження. Аналізуючи ці "запаси міцності" в перерізах, робиться коригування розбиття на панелі, яка полягає у збільшенні одних і зменшенні інших панелей. При цьому оптимальною умовно вважається таке розбиття, коли подальші коригування не приносять економії в масі конструкції більше 1 %.

Отримані оптимальні відношення довжини панелей a_1, \dots, a_{n+1} до прогону l при числі вант підвіски $n = 2 - 0,325, 0,350, 0,325$, при $n = 4 - 0,203, 0,211, 0,172, 0,211, 0,203$, при $n = 6 - 0,1485, 0,1658, 0,1372, 0,0970, 0,1372, 0,1658, 0,1485$ та при $n = 8 - 0,1248, 0,1438, 0,1153, 0,0856, 0,0610, 0,0856, 0,1153, 0,1438, 0,1248$.

Оптимізація розбиття на панелі тягне в порівнянні з рівномірним розбиттям зменшення дійсної маси і збільшення максимальних прогинів при $n = 2$ відповідно на 0,2 % і 1,4 %, при $n = 4$ - на 6,2 % і 8,5 %, при $n = 6$ - на 9,5 % і 9,7 %, при $n = 8$ - на 13,2 % і 12,8 %.

Дослідження кута нахилу відтяжок α показали, що оптимальним відносно маси і вартості матеріалу є кут нахилу відтяжок $\alpha = 35^\circ$, а оптимальним відносно деформативності $\alpha = 30^\circ - 45^\circ$, незалежно від кількості вант підвіски (Рис.4). Зміна кута нахилу відтяжок впливає на масу пілонів і відтяжок, а також на прогини балки жорсткості, а на повні зусилля у вантах підвіски і балці жорсткості практично не впливає.

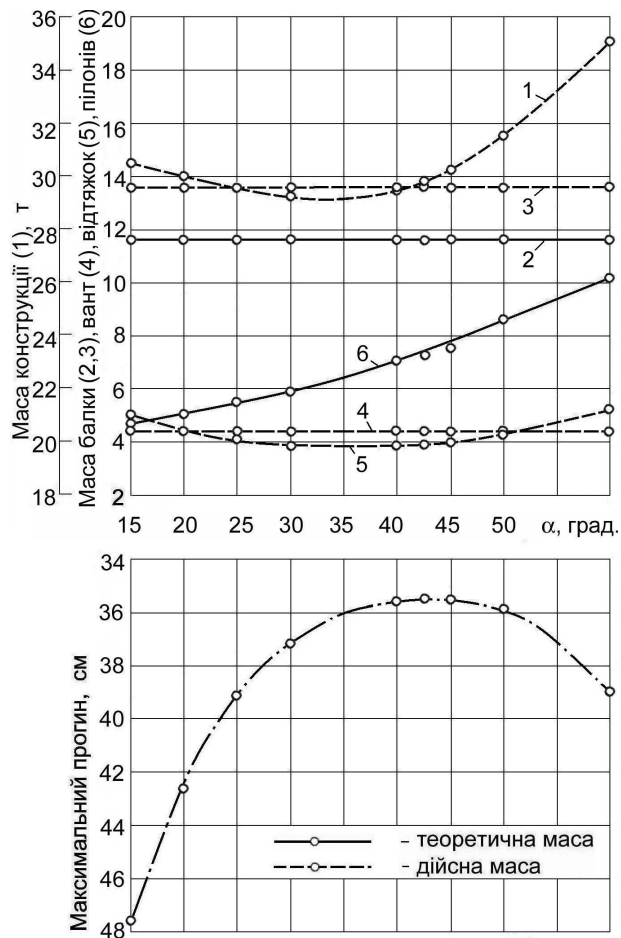


Рис.4. Вплив на масу і деформативність конструкції кута нахилу відтяжок α при $l = 105 \text{ м}$, $h = 28 \text{ м}$, $n = 6$

Fig.4. Effect on the mass and deformability of the construction of the slope angle of the guy-wire at $l = 105 \text{ m}$, $h = 28 \text{ m}$, $n = 6$

Досліджений вплив кількості вант підвіски (Рис.5). З конструкцією при $n = 2$ порівнювалися конструкції при $n = 4$, $n = 6$ та $n = 8$. При цьому, при рівномірному розбитті на панелі дійсна маса зменшилася відповідно на 21,9 %, 30,2 %, і 33,4 %, а при оптимальному розбитті дійсна маса зменшилася відповідно на 26,5%, 36,8 % і 42,0 %, максимальний прогин збільшився на 30 %, 50 % і 66 %. Тобто ефект від додавання кожної нової пари вант підвіски значно зменшується. Рекомендується приймати 4 ванти підвіски при прогонах до 100 м і 6 - при прогонах більше 100 м.

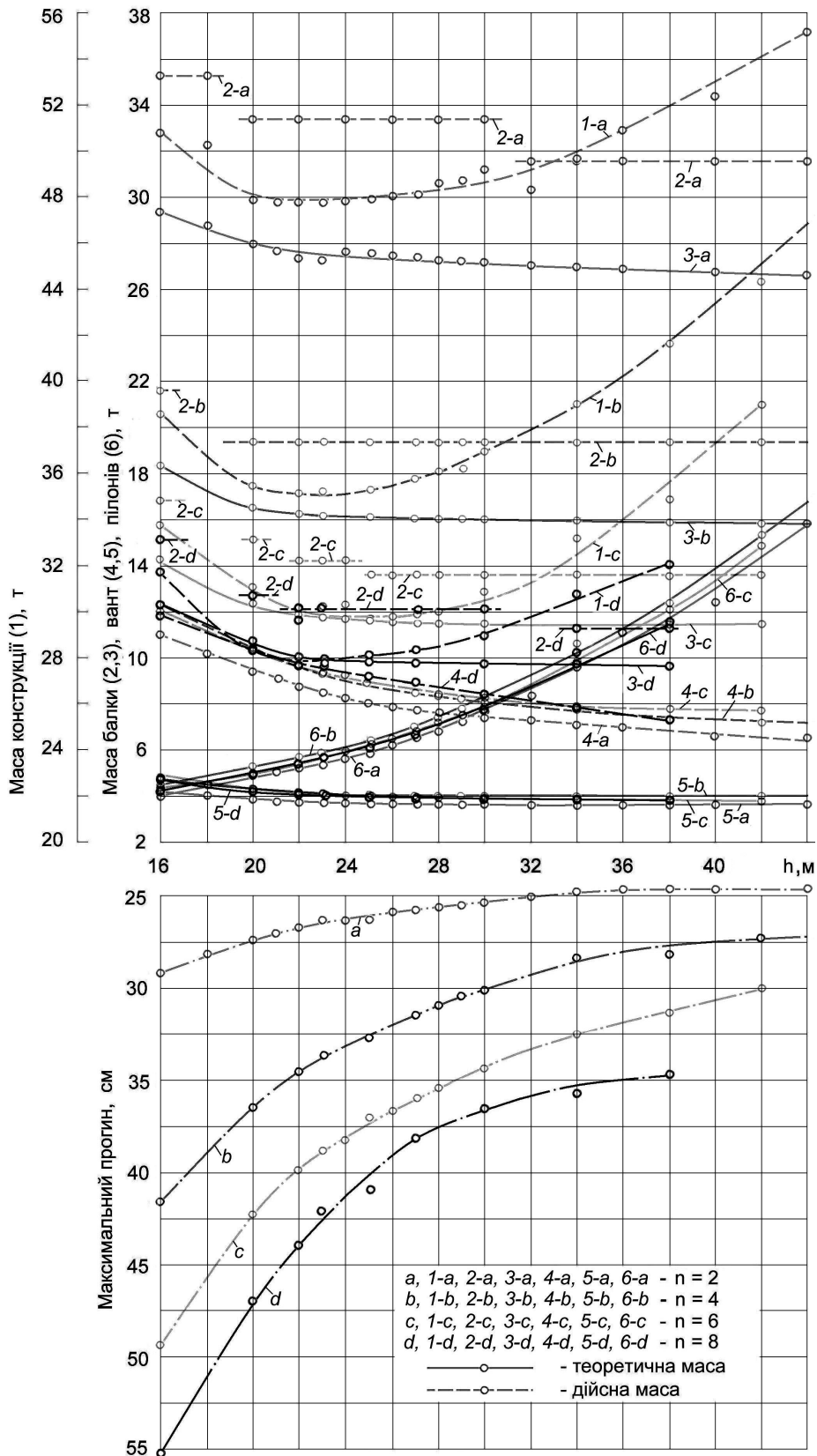


Рис.5. Вплив на масу і деформативність конструкції, розрахованої з оптимізацією розподілу зусиль і матеріалу, кількості вант пвдвіски і висоти пілонів при $l = 105$ м.

Fig.5. The effect on the mass and deformability of the structure, which is calculated with the optimization of the distribution of forces and material, the number of suspension cables and the height of the pylons at $l = 105$ m.

Незалежно від числа вант підвіски, оптимальна відносно маси конструкції висота пілона $h = 0,25l$, а оптимальна відносно вартості матеріалу $h = 0,28l$. Висоту пілонів рекомендується призначати в межах $(0,25 - 0,28)l$. Оптимальне розбиття балки жорсткості на панелі в цих межах мало залежить від висоти пілонів. Зменшення висоти пілона нижче $0,25l$ призводить до значного зростання деформацій. На Рис.5 показаний вплив на масу і деформативність конструкції кількості вант підвіски n і висоти пілонів h при $l = 105$ м.

Зміна модуля пружності в межах, характерних для будівельних сталей і виробів приводить до зміни величин деформацій і контрольованих зусиль. Повні зусилля, а отже, і маса конструкції при цьому практично не змінюється. Зменшення модуля пружності матеріалу вант E_a із $2,06 \cdot 10^5$ Н/мм² до $1,28 \cdot 10^5$ Н/мм² приводить до збільшення максимальних деформацій на 30 % - 50 %.

Непередбачене зменшення E_a в одній з вант на 10 % приводить до збільшення зусиль в деяких вантах до 5,4 % і нормального напруження в окремих перерізах балки жорсткості до 14,5 %. Тому можливість значного збільшення зусиль в системі, у зв'язку з непередбаченою зміною модуля пружності матеріалу вант, вказує на необхідність ретельного контролю його величини. Це зауваження також відноситься до ненапружених вантових систем.

Залежності максимальних прогинів від прогону конструкції в межах 60 - 105 м при незмінних діючих навантаженнях і співвідношеннях параметрів геометричної схеми лінійні, а залежності маси конструкції від прогону близькі до лінійних.

Контролювати зусилля зручніше у вантах підвіски, кількість яких співпадає із мірою статичної невизначеності.

ВИСНОВКИ

Проведені дослідження і експериментальне проектування вказують на раціональність застосування даних попередньо напружених вантових систем в покриттях

великопрогонових будівель як з підвісним транспортним устаткуванням так і без нього, а також доцільність подальшого вивчення подібних конструкцій...

Запропонована методика і алгоритм розрахунку можуть бути застосовані при проектуванні будь-яких статично невизначених металевих стрижневих систем.

ЛІТЕРАТУРА

1. Трофимович В. В., Пермяков В. А. Проектирование предварительно напряженных вантовых систем. Киев: «Будівельник», 1970. 139 с.
2. Трофимович В. В., Фурса В. П. Алгоритм расчета предварительно напряженных комбинированных вантово-стержневых систем на многие загрузки. *Эффективные металлические и пластмассовые конструкции*. Киев: «Будівельник», 1975. С. 3-12.
3. Фурса В.П. Оптимальное проектирование несущих конструкций ангара. *Строительство и архитектура: известия вузов*. 1976. № 5. С. 20-25.
4. Фурса В.П. Вплив різних чинників на масу та деформативність попередньо напружених металевих комбінованих вантових систем з підвісним транспортним устаткуванням. *Зб. наук. праць Укрінсталькон ім. В. М. Шимановського*. Київ: Вид-во «Сталь», 2017. Вип.20. С. 51-64.
5. Argyris J.H., Kelsey S. Energy theorems and Structural Analysis. London: *Butterworth Scientific publications*, 1960 [Русск. перевод: Аргирис Дж. Энергетические теоремы и расчет конструкций. *Современные методы расчета сложных статически неопределимых систем*. Л.: Судпромгиз, 1961. С. 37-293.]
6. Ясинский Ф.С. О проектировании нормальных двутавровых сечений. *Русский нормальный метрический сортамент фасонного железа*. СПб. 1900. С. 13-16.
7. Фурса В.П. Выбор целевой функции при оптимизации распределения усилий и материала в металлической предварительно-напряженной конструкции. *Строительство и архитектура: известия вузов*. 1984. № 1. - С. 8-13.
8. Лихтарников Я.М., Летников Н.С., Левченко В.Н. Технично-економические основы проектирования строительных конструкций. Киев-Донецк. Вища школа, 1980. 240 с..

9. Стрелецкий Н.С. Стрелецкий Д.Н. Проектирование и изготовление экономичных металлических конструкций. Вып. IV М: Стройиздат, 1964. 360 с.

9. Streleckij N.S. Streleckij D.N., 1964. Proektirovanie i izgotovlenie ekonomichnyh metallicheskikh konstruksij. IV. Moskva, Strojizdat, 360, (in Russian).

REFERENCES

1. Trofimoich V. V., Permyakov V. A., 1970. Proektirovanie predvaritelno napryazhennyh vantovyh sistem.-Kiev, «Budivelnik», 139, (in Russian).
2. Trofymovych V. V., Fursa V. P., 1975. Algoritm rascheta predvaritelno napryazhennyh kombinirovannyh vantovo-sterzhnevyyh sistem na mnogie zagruzheniya. *Effektivnye metallicheskie I plastmassovye konstrukcii*. Kiev, «Budivelnik», 3-12, (in Russian).
3. Fursa V. P., 1976. Optimalnoe proektirovanie nesushih konstrukcij angara. *Stroitelstvo i arhitektura: izvestiya vuzov*, 5, 20-25, (in Russian).
4. Fursa V. P., 2017. Vplyv riznykh chynnykiv na masu ta deformatyvnyshchynnist poperedno napryazhennykh metalevykh kombinovanykh vantovykh system z pidvisnym transportnym ustakuvanniam. *Zbirnyk naukovykh prats Ukrinstalkon im. V. M. Shymanovskoho*. Kyiv: «Stal», 20, 51-64, (in Ukrainian).
5. Argyris J.H., Kelsey S., 1960. Energy theorems and Structural Analysis. London: *Butterworth Scientific publications*. [Russkij perevod: Argyris Dzh., 1961. Energeticheskie teoremy i raschet konstruksij. *Sovremennye metody rascheta slozhnyh staticheskimi neopredelimyimi sistemami*. Leningrad, Sudpromgiz, 37-293, (in Russian).]
6. Yasinskij F.S., 1900. O proektirovanii normalnyh dvutavrovyyh sechenij. *Russkij normalnyj metricheskij sortament fasonnogo zheleza*. SPb, 13-16, (in Russian).]
7. Fursa V. P., 1984. Vybory celevoj funktsii pri optimizatsii raspredeleniya usilij i materiala v metallicheskoj predvaritelno-napryazhennoj konstrukcii. *Stroitelstvo i arhitektura: izvestiya vuzov*, 1, 8-13, (in Russian).]
8. Lihtarnikov Ya. M., Letnikov N.S., Levchenko V.N. 1980. Tehniko-ekonomicheskie osnovy proektirovaniya stroitelnykh konstrukcij. Kiev-Donetsk, Vyshcha shkola, 240, (in Russian).

Investigation of parameters of pre-stressed metal combined cable-stayed systems with hanging transport equipment

Volodymyr.Fursa

Abstract: The previous tension in building structures allows the distribution of force between the elements of the structure so that in each of them, at least at one combination of loads, the actual stress is equal to or close to the calculated resistance of the material. Pre-stressed metallic combined cable-stayed systems with hanging transport equipment have been investigated. They have been calculated with optimization of distribution of forces and material according to the method and algorithm proposed by the author. Optimization has been done executed using linear programming. With the help of the computer program created by the author, calculations of metal constructions of combined cable-stayed coverings of industrial buildings with 60, 85 and 105 meters spans were performed on the permissible combinations of permanent, snow, wind and crane loads. Comparison of calculations results was carried out on maximum deformations and the actual weight of the structure, using the graphs made by the author, concerning dependence of construction coefficients of weight of the cables on their length. Recommendations are given for the calculation of such structures in accordance with the undeformed scheme, the dismemberment of the beam of rigidity on the panel, the method of coupling the beam of stiffness, pylons and risers, the number of suspension guy, the height of the pylons, the slope angle of the guy-wire, the choice of the material of the cables, The table and examples of graphs are presented, which illustrate some results for individual runs of the investigated constitutions.

Key words: pre-stressing, optimization, calculation algorithm, metal bar structures, cable-stayed systems.