

УДК 624.014 : 725.391

## **Вплив різних чинників на масу та деформативність попередньо напружених металевих комбінованих вантових систем з підвісним транспортним устаткуванням**

**Фурса В. П.**, канд. техн. наук, Україна

**Анотація.** 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 підвісного кранового навантажень. Порівняння результатів розрахунків велось за максимальними деформаціями та дійсною масою 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, кута нахилу відтяжок, вибору матеріалу вант, контролю модуля пружності матеріалу вант.

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

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 задачі 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 вважається однорідним та 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 усувається 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 у площині вважається забезпеченою; розрахунок ведеться за недеформованою схемою; враховуються реальні умови проектування відповідно до чинних норм.

За початкові дані прийняті: розрахункові постійні і тимчасові навантаження і їх можливі комбінації; розрахункові опори і модулі пружності матеріалів, застосованих у конструкції; матриця площ перерізів (сортамент) гнучких елементів і матриці площ, моментів інерції і моментів опору перерізів жорстких елементів; таблиця коефіцієнтів поздовжнього згину центрально стиснутих 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 розроблення 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,  $\tau$  – 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 у 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;  $\bar{\mathbf{V}}_q = \|\bar{b}_q\|_{m \times u}$  – те саме від  $u$  одиничних привантажувачів;  $\bar{\mathbf{V}}_p = \|\bar{b}_p\|_{m \times \tau} = \bar{\mathbf{V}}_p^0 + \bar{\mathbf{V}}_p^\Delta$  – 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.

3. Для першого наближення приймаються початкові перерізи елементів системи.

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

$$\mathbf{V}_i = \bar{\mathbf{V}}_i \mathbf{P}_i . \quad (1)$$

5. Формується  $\mathbf{F} = \|f\|_{m \times m} = \begin{vmatrix} \mathbf{F}_1 & & & 0 \\ & \mathbf{F}_2 & & \\ & & \dots & \\ 0 & & & \mathbf{F}_h \end{vmatrix}$  – матриця піддатливості усіх

елементів, що розглядаються самостійно, де  $h$  – кількість елементів в системі. Для  $j$ -го елемента, при обліку впливу на переміщення тільки подовжньої деформації,  $\mathbf{F}_j = l_j / E_j A_j$  і  $\mathbf{F}_j = l_j / 6E_j I_j \begin{bmatrix} 2 & 1 \\ 1 & 2 \end{bmatrix}$ , якщо 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 – знаходиться матриця зусиль самонапруження від усіх комбінацій зовнішніх навантажень:

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

де  $\bar{\mathbf{S}}_{\bar{n}.i.} = \|\bar{\mathbf{S}}_{\bar{n}.i.}\|_{m \times \tau}$  – 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:

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

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

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

$$A_k - A_{i.i.r} - A_{qr} - A_{ir} - (A_{\bar{n}.i.r})_{\max} \geq 0 \quad (4)$$

де  $A_k$  – площа  $k$ -го типу перерізу жорстких елементів – незалежна змінна величина, на яку накладається обмеження  $A_k \geq 0$ ;  $A_{i.i.r}$ ,  $A_{qr}$ ,  $A_{ir}$ ,  $A_{\bar{n}.i.r}$  – площі  $r$ -го перерізу відповідно від зусиль попереднього напруження, від зусиль, викликаних привантажувачами, постійними навантаженнями, що прикладаються до здійснення попереднього напруження, і від зусиль самонапруження, що визначаються за допомогою спрощеної формули. Оскільки, в загальному випадку, знаки розрахункових зусиль у жорстких елементах заздалегідь не відомі, для кожного розрахункового перерізу складаються чотири обмеження (4). При цьому  $A_{i.i.r}$  набуває по черзі наступних значень:

$$A_{i.i.r} = \sum_{i=1}^n [-N_{ri} / \varphi_r R_{yk} - M_{ri} / \rho_r R_{yk}] X_{i.i.i};$$

$$A_{i.i.r} = \sum_{i=1}^n [N_{ri} / R_{yk} - M_{ri} / \rho_r R_{yk}] X_{i.i.i};$$

$$A_{i.i.r} = \sum_{i=1}^n [-N_{ri} / \varphi_r R_{yk} + M_{ri} / \rho_r R_{yk}] X_{i.i.i};$$

$$A_{i.i.r} = \sum_{i=1}^n [N_{ri} / R_{yk} + M_{ri} / \rho_r R_{yk}] X_{i.i.i};$$

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  $\mathbf{B}$ ,  $\varphi_r$  і  $\rho_r$  – коефіцієнт поздовжнього згину елемента, якому належить  $r$ -ий переріз і мінімальна ядрова відстань цього перерізу – відношення моменту опору до площі перерізу  $\rho_r = W_r / A_r$ ,  $R_{yk}$  – розрахунковий опір  $R_y$  матеріалу з  $k$ -им типом перерізу. Аналогічно записуються площі  $A_{qr}$ ,  $A_{ir}$  і  $(A_{\bar{n}.i.r})_{\max}$ , для якої з матриці  $\mathbf{S}_{\bar{n}.i}$  беруться зусилля  $N_{\bar{n}.i.r}$  і  $M_{\bar{n}.i.r}$ , що відповідають одній комбінації навантажень і які забезпечують максимальне значення  $A_{\bar{n}.i.r}$ .

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

Третя група обмежень – привантажувачі не мають бути негативними:

$$Q_s \geq 0. \quad (5)$$

Четверта група обмежень – конструктивні вимоги. У разі вимоги уніфікації, складаються обмеження типу:

$$A_i = A_k, \quad (6)$$

де  $k$  – номер групи елементів з однаковим типом перерізу.

8. Складається рівняння цільової функції. Проведені дослідження [4, 5] 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. У разі відсутності для гнучких елементів обмежень (6), для зменшення розмірів масиву обмежень, площі перерізів гнучких елементів доцільніше виразити через зусилля:

$$A_j = \left( \sum_{i=1}^n S_{ji} X_{i.i.i} + \sum_{s=1}^u S_{js} Q_s + S_{ij} + (S_{\bar{n}.i.j})_{\max} \right) / R_{yj}, \quad (7)$$

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

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

$$Z = \sum_{k=1}^m A_k I_k + \sum_{j=1}^p \left( \sum_{i=1}^n S_{ji} X_{i.i.i} / R_{yj} + \sum_{s=1}^u S_{js} Q_s / R_{ys} \right), \quad (8)$$

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 (8) при обмеженнях (3)–(6). Для знаходження мінімуму, в правій частині функції (8) знаки усіх членів міняються на протилежні. Знаходиться  $Z_{\min}$ , матриця оптимальних зусиль попереднього напруження  $\mathbf{X}_{i.i.} = \|x_{i.i.}\|_{n \times 1}$ , матриця привантажувачів  $\mathbf{Q} = \|q\|_{u \times 1}$  і площі перерізів жорстких  $A_k$  і гнучких  $A_a$  або тільки жорстких елементів.

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

$$\mathbf{B}_q = \bar{\mathbf{B}}_q \mathbf{Q}; \quad (9)$$

$$\mathbf{S}_{i.i.} = \mathbf{B} \mathbf{X}_{i.i.}. \quad (10)$$

11. Визначаються контрольовані зусилля попереднього напруження:

$$\mathbf{S}_{\hat{e}} = \mathbf{B}_i + \mathbf{S}_{i.i.} + \mathbf{B}_q. \quad (11)$$

12. Визначаються повні зусилля в розрахункових перерізах системи:

$$S_{ij} = S_{\hat{n}.ij} + S_{\hat{e}i}, \quad (12)$$

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  $A_j$ ,  $A_k$ ,  $I_k$ ,  $\rho_k$ ,  $\varphi_r$ , 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  $\mathbf{P}^i$  и  $\mathbf{P}_i^i$ .

16. Визначаються переміщення по напрямках прикладених зовнішніх сил:

$$\mathbf{W} = \bar{\mathbf{B}}_p^{0'} \mathbf{F} \bar{\mathbf{S}}_{\bar{n}.i} \mathbf{P}^i ; \quad (13)$$

$$\mathbf{W}_i = \bar{\mathbf{B}}_p^{0'} \mathbf{F} \bar{\mathbf{B}}_i \mathbf{P}_i^i ; \quad (14)$$

$$\mathbf{W}_q = \bar{\mathbf{B}}_p^{0'} \mathbf{F} \bar{\mathbf{B}}_q \mathbf{Q} ; \quad (15)$$

$$\mathbf{W}_{i.i.} = \bar{\mathbf{B}}_p^{0'} \mathbf{F} \mathbf{B} \mathbf{X}_{i.i.}, \quad (16)$$

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.

Якщо в результаті розрахунку встановлено, що для оптимального розподілу зусиль потрібні значні привантажувачі, то рекомендується розглянути конструкцію з іншим варіантом постійного навантаження.

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].

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) дійсна маса визначалася за формулою:

$$G_e = \sum_{i=1}^n G_{i.i} \psi_{\bar{n}.i}, \quad (17)$$

де  $G_{i.i}$  и  $\psi_{\bar{n}.i}$  – маса і будівельний коефіцієнт маси  $i$ -ої основної деталі;  $n$  – кількість основних деталей. Для балки жорсткості і пілонів  $\psi_{\bar{n}.i}$  приймався,

на підставі вивчення літературних джерел і проведеного дослідного проектування, постійним: для балки жорсткості із зварних двотаврових балок – таким, що дорівнює 1,16, для пілонів із зварних двотаврових профілів – 1,08, для пілонів із двох прокатних швелерів – 1,11, а для визначення  $\psi_{\bar{n},i}$  вант побудовані графіки залежності  $\psi_{\bar{n},i}$  від довжини вант, з використанням робочих креслень анкерних конструкцій масового виробництва. Оскільки немає якої-небудь впорядкованої залежності  $\psi_{\bar{n},i}$  від діаметру каната, графіки побудовані для кожного каната окремо.

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 прогонів на 1,0 % – 1,5 %, але при цьому виникають значні згинальні моменти в стояках і пілонах. Тому більш доцільні шарнірні сполучення цих елементів.

Для безрозпірних і розпірних комбінованих вантових систем досліджувалася правомочність розрахунку за недеформованою схемою. У розглянутому діапазоні навантажень, фізичних і геометричних параметрів конструкції розбіжності між переміщеннями і зусиллями, отриманими при розрахунку 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.

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

Детальніше досліджувалися комбіновані вантові системи розпірних покриттів ангарів прогонами 60, 85 і 105 метрів із кроком рам 12 м, що найбільш відповідають технологічним вимогам, розрахункова схема яких показана на рис. 1. Як основна статично визначна система прийнята система з шарнірами у вузлах кріплення вант, а за зайві невідомі – опорні моменти в цих вузлах.



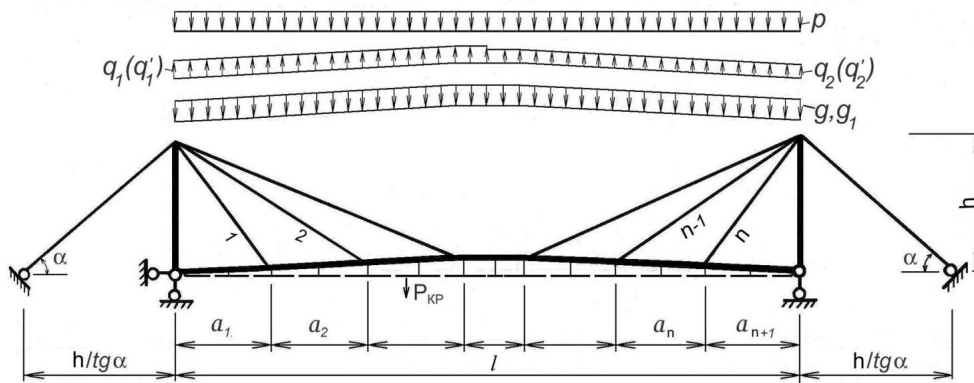


Рис. 1. Схема досліджуваних конструкцій і навантажень, які діють на них

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

Досліджено вплив розрахункового опору матеріалу вант  $R_{yа}$ . Найбільш різке пониження маси конструкції спостерігається до  $R_{yа} = 600 \div 700$  Н/мм<sup>2</sup>. Для подальших досліджень прийняте  $R_{yа} = 600$  Н/мм<sup>2</sup>. Найдоцільніше застосовувати закриті несучі канати з розрахунковим розривним зусиллям 1180 Н/мм<sup>2</sup>, 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 у кожній ділянці між вантами одна з нерівностей (4) перетвориться 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  $n = 6 - 0,1485, 0,1658, 0,1372, 0,0970, 0,1372, 0,1658, 0,1485$ ;  
при  $n = 8 - 0,1248, 0,1438, 0,1153, 0,0856, 0,1153, 0,1438, 0,1248$ .

Оптимізація розбиття на панелі тягне в порівнянні з рівномірним розбиттям зменшення дійсної маси і збільшення максимальних прогонів 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 % та 9,7 %, при  $n = 8$  – на 13,2 % і 12,8 %. Досліджений вплив кількості вант підвіски. 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 прогін збільшився на 30 %, 50 % і 66 %. Тобто ефект від додавання кожної нової пари вант підвіски значно зменшується. Рекомендується приймати 4 вант підвіски при прогонах до 100 м і 6 – при прогонах більше 100 м.

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. 2 показаний вплив на масу і деформативність конструкції кількості вант підвіски  $n$  і висоти пілонів  $h$  при  $l = 105$  м.

Дослідження кута нахилу відтяжок  $\alpha$  показали, що оптимальним відносно маси і вартості матеріалу є кут нахилу відтяжок  $\alpha = 35^\circ$ , а оптимальним відносно деформативності  $\alpha = 30^\circ \div 45^\circ$ . 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.

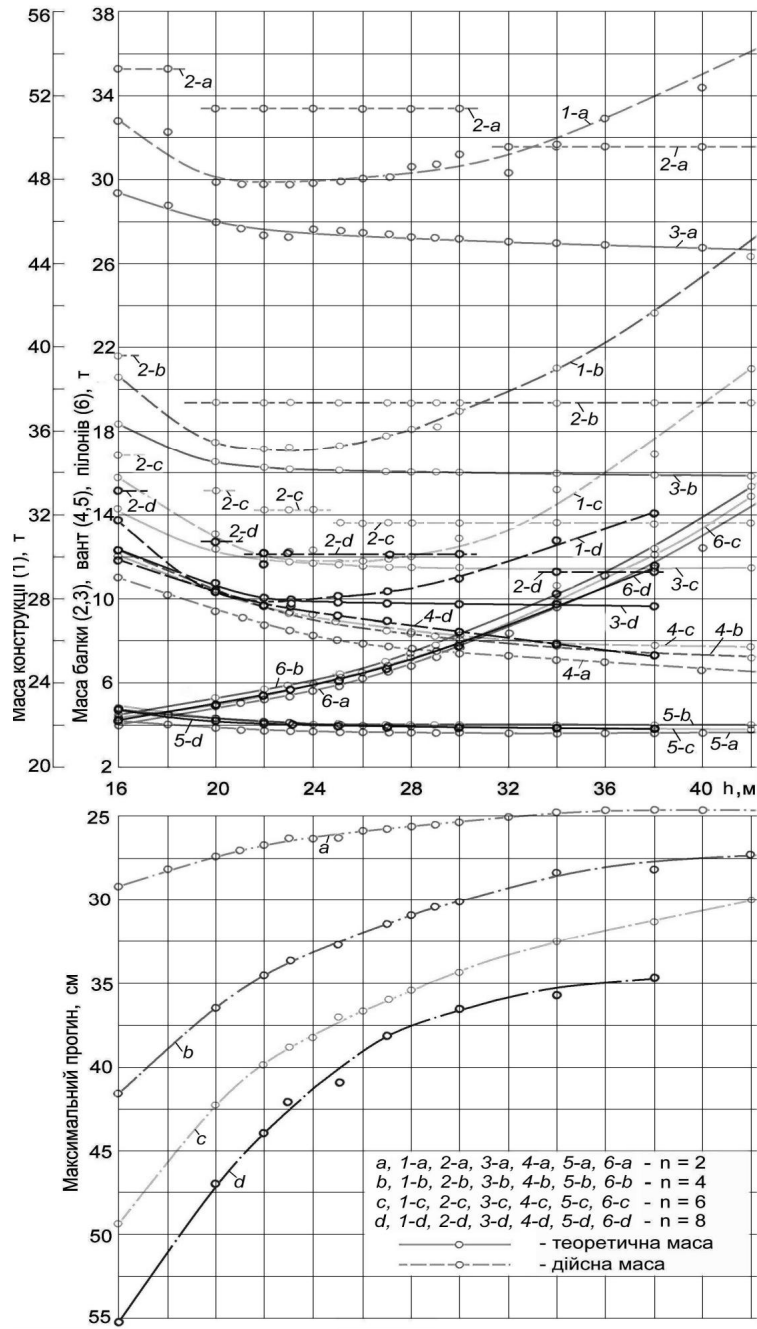


Рис. 2. Вплив на масу і деформативність конструкції кількості вант підвіски

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/мм<sup>2</sup> до  $1,28 \cdot 10^5$  Н/мм<sup>2</sup> призводить до збільшення максимальних деформацій на 30 % – 50 %. Непередбачене зменшення  $E_a$  в одній з вант на 10 % призводить до збільшення зусиль у 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 величина. 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.

### **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.

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

### **Література**

- [1] Трофимович В. В. Проектирование предварительно напряженных вантовых систем / В. В. Трофимович, В. А. Пермяков – Киев : «Будівельник», 1970. – 139 с.
- [2] Трофимович В. В. Алгоритм расчета предварительно напряженных комбинированных вантово-стержневых систем на многие загрузки / В. В. Трофимович, В. П. Фурса // Эффективные металлические и пластмассовые конструкции ; под ред. М. М. Жербина. – Киев : «Будівельник», 1975. – С. 3–12.
- [3] Фурса В. П. Оптимальное проектирование несущих конструкций ангара / В. П. Фурса // Строительство и архитектура : изв. вузов. – 1976. – № 5. – С. 20–25.
- [4] Фурса В. П. Выбор целевой функции при оптимизации распределения усилий и материала в металлической предварительно-напряженной

конструкції / В. П. Фурса // *Строительство и архитектура* : изв. вузов. 1984. – № 1. – С. 8–13.

- [5] Фурса В. П. Предварительно напряженные металлические комбинированные вантовые системы в покрытиях промышленных зданий : автореф. дисс. на соискание науч. степ. канд. техн. наук : спец. 05.23.01 / Фурса В. П. ; Киевский инж.-строит. ин-т. – Киев, 1977. – 23 с.

**Влияние различных факторов на массу  
и деформативность предварительно напряженных  
металлических комбинированных вантовых систем  
с подвесным транспортным оборудованием**

Фурса В. П., канд. техн. наук, Украина

**Аннотация.** Исследованы предварительно напряженные металлические комбинированные вантовые системы с подвесным транспортным оборудованием, рассчитанные с оптимизацией распределения усилий и материала по предложенным автором методике и алгоритму. Оптимизация выполнена с использованием линейного программирования. С помощью созданной автором компьютерной программы проведены расчеты металлических конструкций комбинированных вантовых покрытий промышленных зданий с пролетами 60, 85 и 105 метров на воздействие допустимых комбинаций постоянной, снеговой, ветровой и подвесной крановой нагрузок. Сравнение результатов расчетов велось по максимальным деформациям и действительной массе конструкции, с использованием построенных автором графиков зависимости строительных коэффициентов массы вант от их длины. Даны рекомендации по расчету подобных конструкций по недеформированной схеме, по разбивке балки жесткости на панели, способу сопряжения балки жесткости, пилонов и стоек, по количеству вант подвески, высоте пилонов, углу наклона оттяжек, выбору материала вант, контролю модуля упругости материала вант.

**Ключевые слова:** предварительное напряжение, оптимизация, алгоритм расчета, металлические стержневые конструкции, вантовые системы.

**Action of various factors on mass and deformation  
of pre-stressed metal combined cable-stayed systems with  
overhead transferring equipment**

V. Fursa, Cand. Sc. (Eng.), Ukraine

**Abstract.** Pre-stressed metallic combined cable-stayed systems with overhead transferring 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 executed using linear programming. Calculations of the action of permissible combinations of permanent load, snow, wind and underslung crane loads on metal structures of combined cable coverings of industrial buildings with 60, 85, and 105 meter spans have been made by means of the computer program created by the author. 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. The following recommendations were given for calculating similar structures by a non-deformation scheme; for dividing the stiffening girder on the panels; for the method of joining the stiffening girder, pylons and pillars; for the number of suspension cables, pylon height, the angle of the cable stay inclination, the choice of the material for the cable, the control of the elastic modulus of the cable material.

**Keywords:** pre-stressing, optimization, calculation algorithm, metal bar structures, cable-stayed systems.

*Надійшла до редколегії 28.12.2017 р.*