

ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНОЇ КРИВИЗНИ ПРУЖНО ДЕФОРМОВАНИХ ВАНТ ПОСЕРЕДИНИ ПРОЛЬОТУ У ВСИЯЧОМУ ПОКРИТТІ ЗА ДОПОМОГОЮ КОМП'ЮТЕРНОЇ СИСТЕМИ MATHCAD

¹Янін О.Є., к.т.н., доцент,

yanin_a@ukr.net, ORCID: 0000-0003-0230-8669

¹Новікова С.М., старший викладач,

novikova_svetla@ukr.net, ORCID: 0000-0003-0012-521X

¹Херсонський державний аграрно-економічний університет
вул. Стрітенська, 23, Херсон, 73006, Україна

Анотація. У роботі представлені теоретичні результати вдосконалення та уточнення загальної методики розрахунку гнучкої пружної нитки для вантового покриття завдяки використанню можливостей комп'ютерних програм. Розглядається всяке покриття будівлі, що складається з паралельно розташованих гнучких ниток-вант. На них укладені елементи покриття. Припускається, що постійне і тимчасове навантаження рівномірно розподілені по криволінійній поверхні покриття. При рівномірному розподіленні навантаження уздовж довжини нитки, крива провисання прийнята у вигляді ланцюгової лінії. Запропонована методика знаходження оптимальної кривизни вант посередині прольоту шляхом складання цільової функції вартості вант і покриття та визначення її мінімуму.

Ключові слова: вантове покриття, пружна деформація, кривизна, крива провисання, комп'ютерна програма, оптимізація.

Вступ. Відомо, що для створення архітектурної виразності будівель і споруд використовуються всячі вантові покриття. Вони можуть мати різну форму, яка залежить від призначення об'єкту. Широке застосування вантових конструкцій в останній час обумовлено тим, що вони дозволяють створити будівельні об'єкти оригінальних просторових форм у відповідності з архітектурними вимогами. У той же час, монтаж всячих покриттів не потребує використання складних монтажних механізмів. Вони ефективні при проектуванні легких унікальних споруд. Сучасні досягнення в галузі теорії розрахунку вантових покриттів а також практика зведення і експлуатації відповідних споруд підтверджують високу надійність та економічну ефективність таких покриттів. Перевагою вантового покриття є те, що при збільшенні прольоту зростає економічність конструкції оскільки її маса залишається відносно невеликою. У всячих конструкціях зовнішнє навантаження сприймають сталеві канати, які працюють тільки на розтяг. Завдяки використанню ефекту гнучкої розтягнутої нитки, виникає можливість перекривати великі прольоти до 100-150м, що є важливим при будівництві видовищних споруд, арен, стадіонів тощо. У зв'язку з цим виникає необхідність зменшення вартості споруди завдяки оптимізації форми та розмірів вантового покриття.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Вирішенням проблеми оптимізації конструкції вантового покриття займалися багато видатних вчених [1-9]. Особливо слід відзначити праці Качуріна В.К., який займався вдосконаленням методів розрахунку всячих мостів. Було запропоновано використання приблизних методів розрахунку при визначенні основних розмірів всячих покриттів. Це дозволило значно спростити проектування вантових статично невизначених систем і отримати певний економічний ефект [1, 2]. Групою вчених під керівництвом Качуріна В.К. запропоновано оригінальне рішення мостів без балок жорсткості. Це відкрило можливість значно вдосконалити і здешевити опорну частину конструкції [1]. Проблеми практичного проектування комбінованих арочно-вантових конструкцій розглянуті в працях Киселева Д.Б. Використання моделі покриття у вигляді двох арочно-вантових ферм дозволило дослідити деякі важливі особливості роботи конструкції. Це дало змогу запропонувати методику розрахунку такої конструкції з достатньою для

інженерних розрахунків точністю. Цифрове моделювання з використанням стандартних обчислювальних комплексів відкрило можливість виконати розрахунки в геометрично-нелінійній постановці з урахуванням етапів монтажу і завантаження [3]. Основи розрахунку вантових покриттів за допомогою комп'ютерних програм викладені в роботах Сича С.В.. Використання функціональних можливостей програмного комплексу Autodesk Robot Structural Analysis Professional Cadmaster відкрило шлях для використання вантових елементів як складової частини розрахункових схем просторових рам і оболонок [4]. Задачі проектування вантових покриттів при різних вихідних умовах вирішені у працях [5-9]. В цілому існує певний брак публікацій на тему оптимізації покриття з використанням пружно деформованих вант.

Постановка проблеми. При розрахунку вантових висячих покриттів приблизно приймають, що навантаження на несучу нитку рівномірно розподілене за довжиною її проекції на горизонтальну вісь. Таке припущення дозволяє значно спростити проектування покриття. У дійсності навантаження на нитку від елементів покриття рівномірно розподілене уздовж кривої провисання. Розроблені за останні роки комп'ютерні технології дозволяють виконувати розрахунок і оптимізацію висячих покриттів при дійсному розподіленні навантаження. При цьому також з'явилась можливість точного урахування пружних деформацій ниток-вант.

Мета та завдання роботи:

1. Вдосконалення та уточнення загальної методики підбору поперечного перерізу гнучкої пружної нитки для вантового покриття завдяки використанню можливостей комп'ютерних програм.

2. Знаходження оптимальної кривизни ванти посередині прольоту шляхом складання цільової функції вартості вант і покриття та визначення її мінімуму.

Матеріали та методика досліджень. Для оптимізації вантового покриття визначається така оптимальна кривизна посередині прольоту, при якій сумарна вартість вант і елементів покриття буде мінімальною. Для цього складена цільова функція вартості вант і покриття, що приходить на цю ванту.

Для визначення оптимальної кривизни пропонується задатись рядом значень цієї кривизни з деяким кроком у певному діапазоні. При кожному значенні кривизни обчислюється значення цільової функції. З використанням комп'ютерної системи MathCAD пропонується побудувати графік цільової функції і знайти значення оптимальної кривизни, при якому ця функція має мінімум. Після цього пропонується знайти відповідну оптимальну стрілу провисання.

Результати досліджень. Розглянемо висяче покриття будинку, що складається з паралельно розташованих гнучких ниток-вант (рис. 1). На них укладені елементи покриття. Припустимо, що постійне і тимчасове навантаження рівномірно розподілені по криволінійній поверхні покриття.

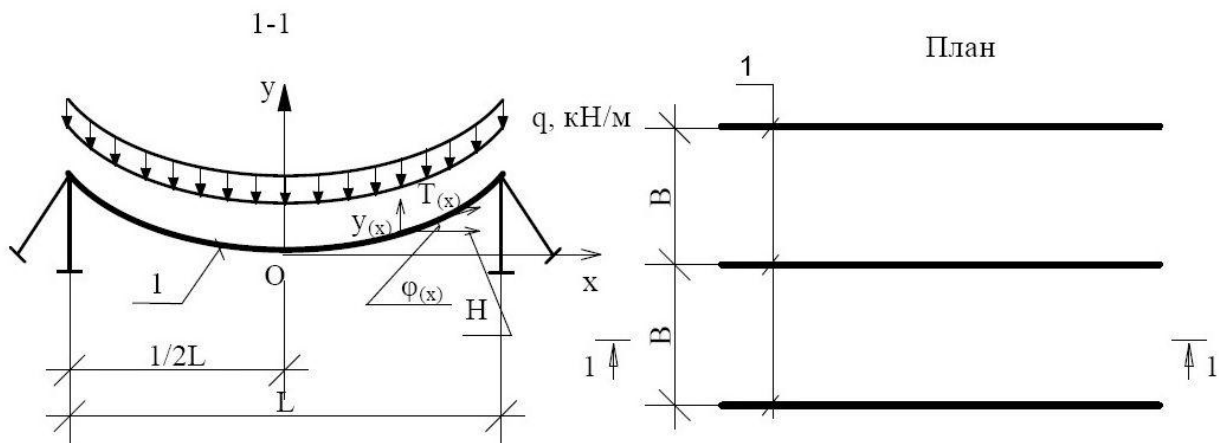


Рис. 1. Схема вантового покриття:
1 – гнучка нитка-ванта

Оберемо систему координат, у якій будемо описувати криву провисання нитки $y(x)$. Початок координат сумістимо із самою низькою точкою провисання посередині прольоту нитки, вісь x направимо горизонтально зліва направо, а вісь y – вертикально знизу уверх (рис. 1). При рівномірному розподіленні навантаження q уздовж довжини нитки, крива провисання буде мати вигляд ланцюгової лінії, яка описується таким рівнянням [10, 11]:

$$y(x) = -\frac{1}{c} + \frac{1}{c} \cdot ch(cx) = \frac{1}{c} \cdot [ch(cx) - 1]. \quad (1)$$

де $c=q/H$ – кривизна кривої провисання у початку координат (у точці O);
 H – розпір.

При розрахунку розглядають два стани нитки (рис. 2) [12].

У першому стані вона завантажена рівномірно розподіленим за її довжиною лінійним навантаженням від власної ваги g_0 , має довжину L_0 , кривизну у початку координат c_0 , стрілу провисання f_0 , та розпір H_0 . У другому стані нитка завантажена повним розрахунковим рівномірно розподіленим за її довжиною лінійним навантаженням q , має довжину L , кривизну у початку координат c , стрілу провисання f , та розпір H . При переході від першого стану до другого навантаження зростає від g_0 до q , нитка подовжується ($L > L_0$) і кривизна у початку координат збільшується ($c > c_0$).

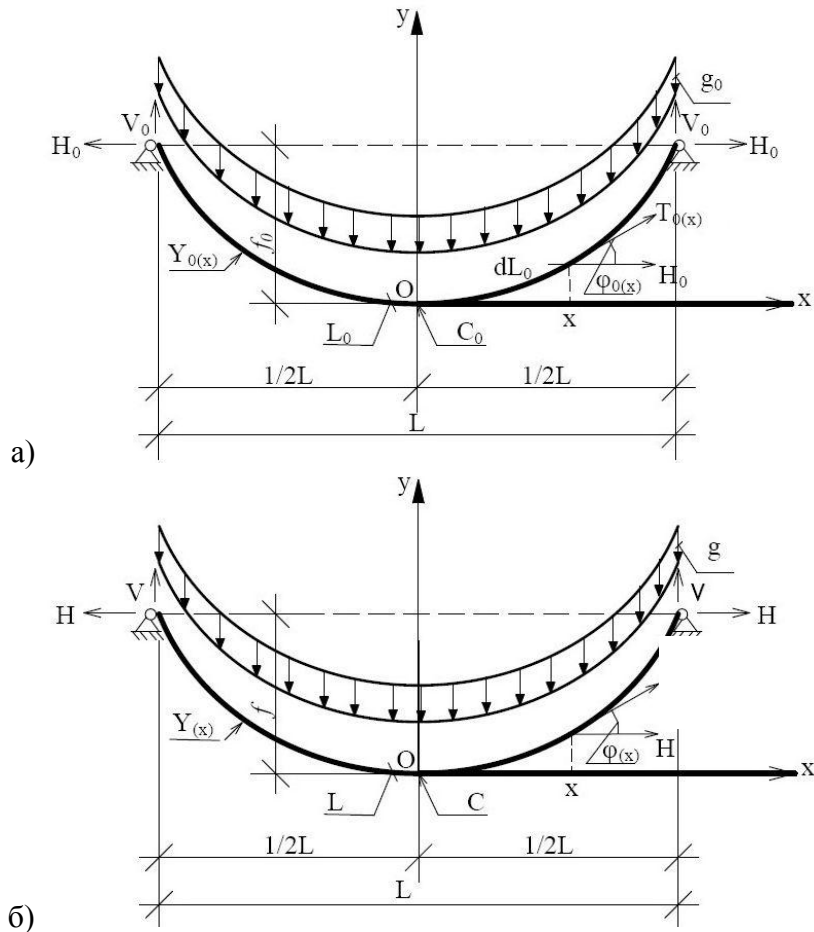


Рис. 2. Два стани нитки:
 а – перший стан; б – другий стан

При проектуванні попередньо задаються стрілою провисання f_0 у першому стані. З рівняння (1) для цього стану при $x=0.5l$ отримаємо:

$$f_0 = y_{0(0.5l)} = \frac{1}{c_0} \cdot [ch(0,5c_0l) - 1]. \quad (2)$$

При відомих значеннях f_o і l , розв'язавши останнє рівняння, можна знайти c_o . Можна також попередньо задаватися не f_o , а c_o .

Щоб підібрати поперечний переріз нитки необхідно знати виникаюче в ній максимальне поздовжнє зусилля у другому стані, яке залежить від кривизни c у початку координат. Цю кривизну можна знайти виходячи з того, що різниця $L-L_o$ дорівнює пружному подовженню нитки за законом Гука.

Довжина нитки у першому стані [1]:

$$\begin{aligned} L_o &= 2 \int_0^{0,5l} \sqrt{1 + (y'_{o(x)})^2} \cdot dx = 2 \int_0^{0,5l} \sqrt{1 + sh^2(c_o x)} \cdot dx = 2 \int_0^{0,5l} ch(c_o x) \cdot dx = \\ &= \frac{2}{c_o} sh(c_o x) \Big|_0^{0,5l} = \frac{2}{c_o} sh\left(\frac{c_o l}{2}\right). \end{aligned} \quad (3)$$

Довжина нитки у другому стані:

$$\begin{aligned} L &= 2 \int_0^{0,5l} \sqrt{1 + (y'_{(x)})^2} \cdot dx = 2 \int_0^{0,5l} \sqrt{1 + sh^2(cx)} \cdot dx = 2 \int_0^{0,5l} ch(cx) \cdot dx = \\ &= \frac{2}{c} sh(cx) \Big|_0^{0,5l} = \frac{2}{c} sh\left(\frac{cl}{2}\right). \end{aligned} \quad (4)$$

Виділимо елементарний нескінченно малий фрагмент нитки, довжиною dL_o у точці з координатою x (рис. 2). Його пружне подовження за законом Гука при переході з першого стану до другого:

$$\Delta dL_o = \frac{T_{(x)} - T_{o(x)}}{EA} dL_o, \quad (5)$$

де E – модуль пружності сталі;

A – площа поперечного перерізу нитки;

$T_{o(x)}$ і $T_{(x)}$ – відповідно поздовжні розтягуючі сили у нитці на відстані x від лівої опори у першому і другому станах.

З урахуванням того, що $c_o = g_o/H_o$ і $c = q/H$ отримаємо:

$$\begin{aligned} T_{o(x)} &= \frac{H_o}{\cos \phi_{o(x)}} = H_o \sqrt{1 + (tg \phi_{o(x)})^2} = H_o \sqrt{1 + (y'_{o(x)})^2} = \\ &= H_o \sqrt{1 + (sh(c_o x))^2} = H_o ch(c_o x) = \frac{g_o}{c_o} ch(c_o x); \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} T_{(x)} &= \frac{H}{\cos \phi_{(x)}} = H \sqrt{1 + (tg \phi_{(x)})^2} = H \sqrt{1 + (y'_{(x)})^2} = \\ &= H \sqrt{1 + (sh(cx))^2} = H \cdot ch(cx) = \frac{q}{c} ch(cx); \end{aligned} \quad (7)$$

де $\phi_{o(x)}$ і $\phi_{(x)}$ – відповідно кут між вектором поздовжньої сили у нитці і віссю X для першого і другого станів (рис. 2).

Довжина фрагмента нитки до деформації, тобто у першому стані:

$$dL_o = \sqrt{dx^2 + dy_o^2} = \sqrt{1 + (y'_{o(x)})^2} dx = \sqrt{1 + (sh(c_o x))^2} dx = ch(c_o x) dx. \quad (8)$$

За формулою (5) з урахуванням формул (6)-(8):

$$\Delta dL_o = \frac{\frac{q}{c} ch(cx) - \frac{g_o}{c_o} ch(c_o x)}{EA} ch(c_o x) dx \approx \frac{\frac{q}{c} ch^2(cx) - \frac{g_o}{c_o} ch^2(c_o x)}{EA} dx. \quad (9)$$

Пружне подовження усієї нитки:

$$\begin{aligned} \Delta L = L - L_o &= \int_{-0,5l}^{0,5l} \Delta dL_o = \frac{q}{cEA} \int_{-0,5l}^{0,5l} ch^2(cx)dx - \frac{g_0}{c_0EA} \int_{-0,5l}^{0,5l} ch^2(c_0x)dx = \\ &= \frac{q}{cEA} \left[\frac{l}{2} + \frac{1}{2c} sh(cl) \right] - \frac{g_0}{c_0EA} \left[\frac{l}{2} + \frac{1}{2c_0} sh(c_0l) \right]. \end{aligned} \quad (10)$$

З формули (10) з урахуванням формул (3) і (4) отримаємо:

$$\frac{2}{c} sh\left(\frac{cl}{2}\right) - \frac{2}{c_0} sh\left(\frac{c_0l}{2}\right) = \frac{q}{cEA} \left[\frac{l}{2} + \frac{sh(cl)}{2c} \right] - \frac{g_0}{c_0EA} \left[\frac{l}{2} + \frac{sh(c_0l)}{2c_0} \right]. \quad (11)$$

У цьому рівнянні невідомими є c і A . Тому для їх знаходження необхідне ще одне рівняння. Підбір поперечного перерізу нитки виконується за максимальним розтяжним зусиллям на опорі T_{max} . З формули (7) при $x=0,5l$:

$$T_{(0,5l)} = T_{max} = \frac{q}{c} ch\left(\frac{cl}{2}\right). \quad (12)$$

Потрібна площа поперечного перерізу нитки [13]:

$$A = \frac{T_{max}}{R_s} = \frac{q}{cR_s} ch\left(\frac{cl}{2}\right), \quad (13)$$

де R_s – розрахунковий опір сталі, з якої виконана нитка.

Розв'язавши систему рівнянь (11) і (13) можна знайти c і A . За допомогою звичайних алгебраїчних методів рішення системи являє собою достатньо складну задачу [14]. Тому її доцільно розв'язувати за допомогою комп'ютерної системи MathCAD.

Площу поперечного перерізу нитки A на підставі формули (13) можна представити як функцію кривизни c :

$$A_{(c)} = \frac{q}{cR_s} ch\left(\frac{cl}{2}\right). \quad (14)$$

Тоді рішення системи рівнянь (11) і (13) зводиться до розв'язання рівняння:

$$\frac{2}{c} sh\left(\frac{cl}{2}\right) - \frac{2}{c_0} sh\left(\frac{c_0l}{2}\right) = \frac{q}{cEA_{(c)}} \left[\frac{l}{2} + \frac{1}{2c} sh(cl) \right] - \frac{g_0}{c_0EA_{(c)}} \left[\frac{l}{2} + \frac{1}{2c_0} sh(c_0l) \right]. \quad (15)$$

Знайдене з останнього рівняння значення c треба підставити у формулу (13) і знайти потрібну площу поперечного перерізу нитки. Після цього за сортаментом підбирається відповідний канат.

Вирішення задачі оптимізації. Для оптимізації вантового покриття треба знайти таку оптимальну кривизну $c_o = c_{o,опт}$ (m^{-1}) посередині прольоту у першому стані, при якій сумарна вартість вант і елементів покриття буде мінімальною. Для цього складемо цільову функцію вартості вант і покриття, що приходиться на цю ванту:

$$S = S_{ванти} + S_{покриття}. \quad (16)$$

де $S_{ванти}$ – вартість вант;

$S_{покриття}$ – вартість покриття у межах відстані між вантами B (кроку вант);

$$S_{ванти} = A \cdot L_o \cdot \rho_{ст} \cdot \Pi_{ст}, \quad (17)$$

де $\rho_{ст}$, kg/m^3 – щільність сталі;

$\Pi_{ст}$, $гр/кг$ – ціна 1кг сталі;

$$S_{покриття} = L \cdot B \cdot \Pi_p, \quad (18)$$

де Π_p , $гр/m^2$ – ціна $1m^2$ покриття.

Для визначення оптимальної кривизни $c_{o,опт}$ треба задатися рядом значень c_o з деяким кроком у певному діапазоні. При кожному значенні c_o треба розв'язати рівняння (15) відносно c , знайти потрібну площу поперечного перерізу нитки A за формулою (13),

обчислити довжини нитки в обох станах L_o і L за формулами (3) і (4) та визначити відповідне значення цільової функції S . У цьому випадку усі перераховані параметри (c ; A ; L_o ; L ; S) треба задавати як функції, що залежать від c_o . Тоді цільова функція буде мати вигляд:

$$S_{(c_o)} = A_{(c_o)} \cdot L_{o(c_o)} \cdot \rho_{cm} \cdot U_{cm} + L_{(c_o)} \cdot B \cdot U_n. \quad (19)$$

З використанням комп'ютерної системи MathCAD можна побудувати графік функції $S(c_o)$, і знайти значення $c_o=c_{o,опт}$ при якому вона має мінімум. Після цього за формулою (2) можна знайти відповідну оптимальну стрілу провисання $f_o=f_{o,опт}$.

Задача оптимізації була розв'язана при таких контрольних вихідних даних:

$q=10\text{кН/м}$; $g_o=0,15\text{кН/м}$; $l=60\text{м}$; $U_{п}=10000\text{гр/м}^2$; $B=6\text{м}$; $\rho_{ст}=7850\text{кг/м}^3$; $R_s=800\text{МПа}$; $U_{ст}=700\text{гр/кг}$; $E=1,47 \cdot 10^5\text{МПа}$.

Був отриманий графік функції $S(c_o)$ (гр), який має мінімум при $c_o=c_{o,опт}=0,0135\text{м}^{-1}$ (рис. 3). Оптимальна стріла провисання $f_{o,опт}$ та її відношення до прольоту l склали: $f_{o,опт}=6,158\text{м}$;

$$\frac{f_{o,опт}}{l} = 0,103.$$

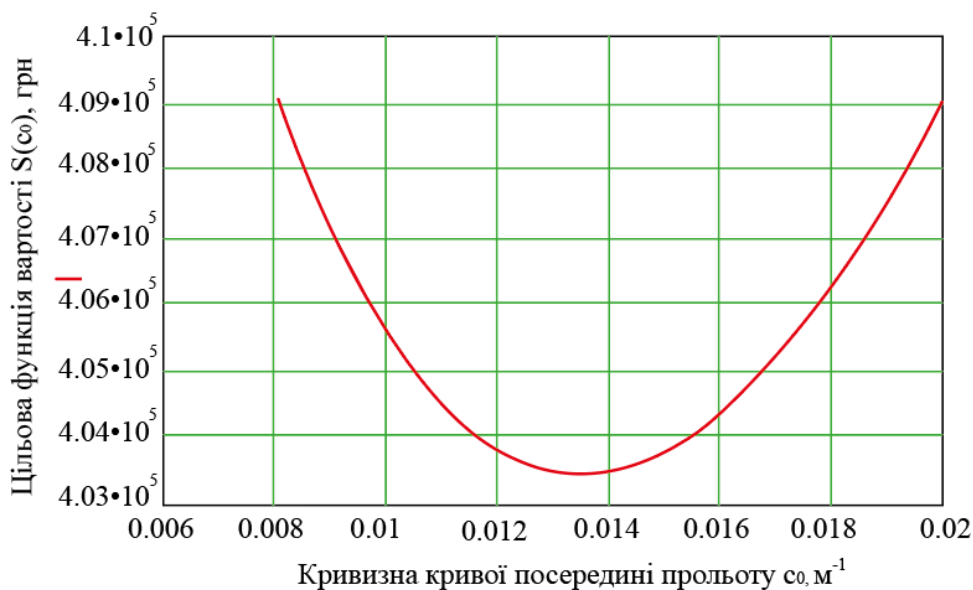


Рис. 3. Графік функції $S(c_o)$, і визначення $c_{o,опт}$

Висновки. Запропонований метод дозволяє визначити оптимальну кривизну вант посередині прольоту всячого покриття при паралельно розташованих вантах виходячи з мінімальної вартості, а також розраховувати потрібні параметри поперечного перерізу гнучкої нитки-вант із умови міцності. У подальших дослідженнях доцільно розглянути нерівномірне розподілення навантаження уздовж вант внаслідок переносу снігу по покриттю.

Література

1. Качурин В.К., Брагин А.В., Ерунов Б.Г. Проектирование висячих и вантовых мостов. М.: Транспорт, 1971. 280 с.
2. Качурин В.К. Теория висячих систем. Статический расчет. Л.: Госстройиздат, 1962. 224с.
3. Киселев Д.Б. Арочно-вантовые комбинированные конструкции. Численные и экспериментальные исследования. *Современное промышленное и гражданское строительство*, 2006. Том. 2. № 1. С. 17-27.
4. Сыч С. Проектирование вантовых конструкций в Autodesk Robot Structural Analysis Professional. Cadmaster, 2012. № 6. С. 84-86.

5. Федулов В.К., Суладзе М.Д., Артемова Л.Ю. Вантовые покрытия: Учебное пособие. М.: МАДИ, 2014. 48 с.
6. Luigi Zordan, Renato Morganti. Large roofs, large spaces. Suspended cable roofing in Italy 1948-1970. *Proc. of the First Int. Congress on Construction History*. Madrid, 2003, pp. 2139-2148.
7. Vintage British high tech, *Carnegie Mellon University School of Architecture*, 2013. URL: <https://cmuarch2013.wordpress.com/2009/07/09/vintage-british-high-tech/>.
8. L.A. Kloiber, D.E. Eckmann, Th.R. Meyer, St.J. Hautzinger. Design considerations in cable-stayed roof structures. *North American Steel Construction: Conference: Modern Steel Construction 2004*, p. 7.
9. Hennig Wanda. The man who built Durban's Moses Mabhida Stadium. 2012. URL: <http://www.wandahennig.com/2012/10/the-man-who-built-durbans-moses-mabhida-stadium/>
10. Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов. М.: ОГИЗ, 1945. 556 с.
11. Беленя Е.И., Стрелецкий Н.Н., Ведеников Г.С. и др. Металлические конструкции: Спец. курс: Учеб. пособие для вузов, 2-е изд., перераб. и доп. М.: Стройиздат, 1982. 472 с.
12. ДБН В.2.6-163:2010. Сталеві конструкції. Норми проектування, виготовлення і монтажу. К.: Міністерство регіонального розвитку та будівництва України. 2011. 202 с.
13. Беляев Н.М. Сопротивление материалов, 15-е изд., перераб. М.: Наука, 1976. 608 с.
14. Mechyslav Chekanovych, Svetlana Romanenko, Yanina Andriievskva. Stress-Strain State of Reinforced Anisotropic Elements of Round and Annulus Section. *International Conference «Actual problems of engineering mechanics»*. Trans Tech Publications Ltd. Materials Science Forum, Zurich, Switzerland, 2019, 968, pp. 309-316.

Referances

- [1] V.K. Kachurin, A.V. Bragin, B.G. Yerunov, *Proyektirovaniye visyachikh i vantovykh mostov*. Izd-vo «Transport», 1971.
- [2] V.K. Kachurin, *Teoriya visyachikh sistem. Sticheskiy raschet*. L.: Gosstroyizdat, 1962.
- [3] D.B. Kiselev, "Arochno-vantovyye kombinirovannyye konstruksii. Chislennyye i eksperimental'nyye issledovaniya", *Sovremennoye promyshlennoye i grazhdanskoye stroitel'stvo*, Tom. 2, no. 1, pp. 17-27, 2006.
- [4] S. Sych, "Proyektirovaniye vantovykh konstruksiy v Autodesk Robot Structural Analysis Professional", *Cadmaster*, no. 6, pp. 84-86, 2012.
- [5] V.K. Fedulov, M.D. Suladze, L.YU. Artemova, *Vantovyye pokrytiya: Uchebnoye posobiye*. Moskva: Moskovskiy avtomobil'no-dorozhnyy institut, 2014.
- [6] Luigi Zordan, Renato Morganti, "Large roofs, large spaces. Suspended cable roofing in Italy 1948-1970", *Proc. of the First Int. Congress on Construction History*, Madrid, 2003, pp. 2139-2148.
- [7] "Vintage British high tech", *Carnegie Mellon University School of Architecture*, 2013. [Online]. Available: <https://cmuarch2013.wordpress.com/2009/07/09/vintage-british-high-tech/>.
- [8] L.A. Kloiber, D.E. Eckmann, Th.R. Meyer, St.J. Hautzinger, "Design considerations in cable-stayed roof structures", *North American Steel Construction: Conference: Modern Steel Construction*, 2004, p. 7.
- [9] Hennig Wanda, *The man who built Durban's Moses Mabhida Stadium*. 2012. [Online]. Available: <http://www.wandahennig.com/2012/10/the-man-who-built-durbans-moses-mabhida-stadium/>
- [10] I.N. Bronshteyn, K.A. Semendyayev, *Spravochnik po matematike dlya inzhenerov i uchaschchikhsya vtuzov*. Moskva: Ob'yedineniye gosudarstvennykh knizhno-zhurnal'nykh izdatel'stv (OGIZ), 1945.

- [11] Ye.I. Belenya, N.N. Streletskiy, G.S. Vedenikov i dr., *Metallicheskiye konstruktсии: Spets. kurs. 2-ye izd., pererab. i dop.* Moskva: Stroyizdat, 1982.
- [12] DBN V.2.6-163:2010. Stalevi konstruktсии. Normy proektuvannya, vyhotovlennya i montazhu. K.: Ministerstvo rehional'noho rozvytku ta budivnytstva Ukrainy. 2011.
- [13] N.M. Belyayev, *Soprotivleniye materialov*, 15-ye izd., pererab. Moskva: Nauka, 1976.
- [14] Mechyslav Chekanovych, Svetlana Romanenko, Yanina Andriievaska, "Stress-Strain State of Reinforced Anisotropic Elements of Round and Annulus Section", *International Conference «Actual problems of engineering mechanics» Trans Tech Publications Ltd, Materials Science Forum*, 968, 2019, pp. 309-316.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОЙ КРИВИЗНЫ УПРУГО ДЕФОРМИРОВАННЫХ ВАНТ ПОСРЕДИНЕ ПРОЛЕТА В ВСЯЧЕМ ПОКРЫТИИ С ПОМОЩЬЮ КОМПЬЮТЕРНОЙ СИСТЕМЫ MATHCAD

¹Янин А.Е., к.т.н., доцент,

yanin_a@ukr.net, ORCID: 0000-0003-0230-8669

¹Новикова С.Н., старший преподаватель,

novikova_svetla@ukr.net, ORCID: 0000-0003-0012-521X

¹Херсонский государственный аграрно-экономический университет
ул. Сретенская, 23, Херсон, 73006, Украина

Аннотация. В работе представлены теоретические результаты усовершенствования и уточнения общей методики подбора поперечного сечения гибкой упругой нити для вантового покрытия при использовании возможностей компьютерных программ. Предложена методика нахождения оптимальной кривизны ванты посередине пролета путем составления целевой функции стоимости вант и покрытия и определения ее минимума.

Рассматривается всячье покрытие здания, состоящее из параллельно расположенных гибких нитей-вант. На них уложены элементы покрытия. Предполагается, что нагрузка равномерно распределена по криволинейной поверхности покрытия. При таком приложении нагрузки, кривая провисания принята в виде цепной линии.

В расчете рассматривают два состояния нити. В первом состоянии она загружена равномерно распределенной по ее длине линейной нагрузкой от собственного веса. Во втором состоянии нить загружена полной расчетной равномерно распределенной по ее длине линейной нагрузкой. Для подбора поперечного сечения нити определяется возникающее в ней максимальное продольное усилие во втором состоянии, которое зависит от кривизны посередине пролета. Эта кривизна определяется исходя из того, что разница между длинами нити в первом и втором состояниях равна упругому удлинению по закону Гука.

С помощью обычных алгебраических методов решение задачи является достаточно сложным. Поэтому ее предложено решать с помощью компьютерной системы MathCAD.

При найденном значении кривизны посередине пролета рассчитывается необходимая площадь поперечного сечения нити. После этого по сортаменту подбирается соответствующий канат. Для оптимизации вантового покрытия определяется оптимальная кривизна посередине пролета в первом состоянии, при которой суммарная стоимость вант и элементов покрытия будет минимальной. Для этого составлена целевая функция стоимости ванты и покрытия, которое приходится на эту ванту.

Для определения оптимальной кривизны предлагается задаться рядом значений этой кривизны с некоторым шагом в определенном диапазоне. При каждой кривизне вычисляется значение целевой функции. С использованием компьютерной системы MathCAD предлагается построить график целевой функции и найти значение оптимальной кривизны, при котором эта функция имеет минимум. После этого предлагается найти соответствующую оптимальную стрелу провисания.

Предложенный метод позволяет определить оптимальные параметры висячего покрытия при параллельно расположенных вантах исходя из минимальной стоимости, а также рассчитывать необходимые параметры поперечного сечения гибкой нити-ванты из условия прочности.

Ключевые слова: вантовое покрытие, упругая деформация, кривизна, кривая провисания, компьютерная программа, оптимизация.

DETERMINATION OF THE OPTIMAL CURVATURE OF ELASTIC DEFORMED CABLES IN THE MIDDLE OF THE SPAN IN A HANGING COATING BY USING THE MATHCAD COMPUTER SYSTEM

¹**Yanin O.E.**, Ph.D., Assistant Professor,
yanin_a@ukr.net, ORCID: 0000-0003-0230-8669

¹**Novikova S.M.**, senior lecturer,
novikova_svetla@ukr.net, ORCID: 0000-0003-0012-521X
¹*Kherson State Agrarian and Economic University*
23, Sretenskaya str., Kherson, 73006, Ukraine

Abstract. The paper presents the theoretical results of improving and refining the general methodology for selecting the cross section of a flexible elastic thread for cable-stayed using the capabilities of computer programs. A technique is proposed for finding the optimal curvature of the cable in the middle of the span by compiling the target function of the cable cost and coverage and determining its minimum.

The hanging coating of the building is considered, consisting of parallel-located flexible cables. Coating elements are laid on them. It is assumed that the load is evenly distributed over the curved surface of the coating. With this application of load, the sag curve is adopted as a chain line.

In the calculation, two states of the thread are considered. In the first state, it is loaded with a linear load uniformly distributed along its length from its own weight. In the second state, the thread is loaded with the total calculated linear load evenly distributed along its length. To select the cross section of the thread, the maximum longitudinal force arising in it in the second state is determined, which depends on the curvature in the middle of the span. This curvature is determined on the basis that the difference between the lengths of the thread in the first and second states is equal to the elastic elongation according to Hooke's law.

Using ordinary algebraic methods, solving the problem is quite complicated. Therefore, it was proposed to solve it using the MathCAD computer system.

With the found value of the curvature in the middle of the span, the required cross-sectional area of the thread is calculated. After that, the appropriate rope is selected according to the assortment. To optimize the cable-stayed coating, the optimal curvature in the middle of the span is determined in the first state, at which the total cost of cable-stayed and coating will be minimal. For this purpose, the objective function of the cost of the cable and the coverage that lies on this cable has been compiled.

To determine the optimal curvature, it is proposed to accept a series of values of this curvature with some step in a certain range. For each curvature, the value of the objective function is calculated. Using the MathCAD computer system, it is proposed to build the graph of the objective function and find the value of the optimal curvature at which this function has a minimum. After that, it is proposed to find the corresponding optimal sagging arrow.

The proposed method allows us to determine the optimal parameters of the hanging coating with parallel cables on the basis of the minimum cost, as well as to calculate the necessary cross-sectional parameters of the flexible cable from the strength condition.

Keywords: cable-stayed coating, elastic deformation, curvature, sag curve, computer program, optimization.

Стаття надійшла до редакції 7.12.2020