

УДК 624.014

**Скрєбнєва С.М.<sup>14</sup>**, к.т.н., доц.

*svetaskreb@ukr.net, \_ORCID 0000-0003-4082-5181,*

**Омельченко К.В.**, к.т.н., доц.

*Kateomelchenko1980@gmail.com, \_ORCID 0000-0001-5211-3662,*

**Машков І.Л.**, доцент,

*iigor61@ukr.net*

**Глушаниця А.І.**, к.т.н., асистент,

*annamashkova06091990@gmail.com*

*Національний авіаційний університет, м.Київ, Україна*

## **АНАЛІЗ РОБОТИ ПРОСТОРОВИХ ВСИЯЧИХ ПОКРИТТІВ**

*Проаналізовані проблеми, пов'язані з дослідженням напружено-деформованого стану комбінованого всіячого покриття. Показано розподіл напружень і деформацій у нитці кінцевої жорсткості в зоні дії зосередженого навантаження.*

*Ключові слова: комбіноване покриття, напружено-деформований стан, метод кінцевих елементів, нить скінченної жорсткості, пружно-пластична робота.*

**Постановка проблеми.** Розвиток промислового виробництва, використання гнучких технологічних ліній та перехід до багатофункціонального призначення будівель викликає необхідність будівництва з довільним плануванням внутрішнього простору та відповідно із збільшеними прогонами.

Найбільш доцільним для великопрогонових виробничих будівель можна вважати використання всіячих комбінованих конструкцій, в яких основні несучі елементи (гнучкі нитки) працюють на розтяг, що дозволяє найбільш ефективно використовувати їх міцнісні властивості. Закордонний та вітчизняний досвід будівництва із використанням всіячих систем підтвердив їх високу ефективність та перспективність.

---

<sup>14</sup> © Скрєбнєва С.М., Омельченко К.В., Машков І.Л., Глушаниця А.І.

Основним недоліком висячих покриттів є їх підвищена деформативність, що є наслідком появи кінематичних переміщень та пружних подовжень. Тому основною проблемою при застосуванні висячих систем є задача підвищення жорсткості таких конструкцій. Перспективним напрямком по вирішенню цієї проблеми стає розробка просторових стрижньових покриттів.

На разі найбільш поширене застосування мають два типи висячих просторових покриттів: покриття, що складається з плоских висячих поперечників, що об'єднані у просторову систему через систему перехресних балок (перерозподіл навантажень відбувається по нижньому поясу висячих комбінованих конструкцій) та покриття з перехресними несучими нитями (перерозподіл навантаження відбувається по верхньому поясу висячих комбінованих конструкцій). Перераховані конструкції мають високі експлуатаційні властивості при сприйнятті розподілених навантажень. Однак при зосереджених впливах, що характерно для виробничих та багатофункціональних будівель, в таких системах виникають значні кінематичні переміщення. Таким чином, для поширення області застосування висячих покриттів необхідна розробка конструктивних просторових систем, що ефективно сприймають як розподіленні, так і зосереджені експлуатаційні впливи. Для досягнення цієї мети необхідно розглянути принципи формоутворення висячих стрижньових покриттів, проводити дослідження закономірностей зміни напружено-деформованого стану елементів просторових висячих покриттів при різних видах розрахункових впливів.

**Основна частина.** Виходячи з аналізу існуючих висячих стрижньових покриттів, покриття складаються з наступних груп елементів: основна несуча конструкція покриття, що складається з несучих нитей, балок та підвісів; повздовжня похила конструкція; торцева конструкція та анкерна (розпірна) конструкція. До просторових висячих покриттів, що розглядаються висувають наступні конструктивні вимоги:

- для покриття будівель найбільш характерне покриття прямокутного плану;

- формою розташування несучих нитей є циліндрична поверхня;
- для сприйняття експлуатаційних навантажень застосовується система балок, що розташована в горизонтальній площині;
- загальна робота системи несучих нитей та балочної системи забезпечується системою підвісів.

На основі запропонованих принципів формоутворення сконструйовані нові типи висячих конструкцій. Різноманіття конструктивних схем висячих покриттів, які можуть бути отримані з використанням наведених принципів формоутворення дає змогу стверджувати про створення нового класу конструкцій. На рис.1 наведено висяче багатопрогонове покриття підвищеної жорсткості з використанням перехресних несучих нитей, похилих підвісів та надбалкових стійок [7]. Такий клас конструкцій має назву висячі комбіновані просторові стрижневі конструкції.

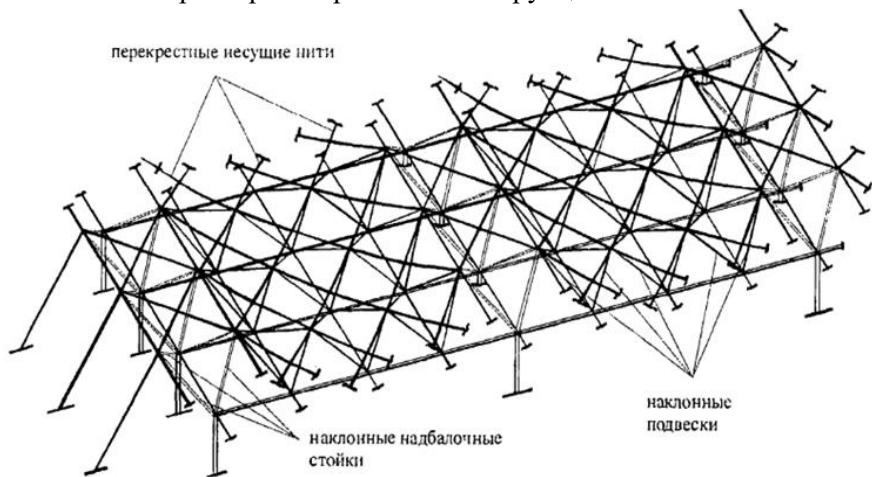


Рис.1. Висяче просторове стрижневе покриття підвищеної жорсткості

Основні положення розрахунку таких елементів конструкції викладені в роботах [1,2]. Гнучкі нитки, що називаються вантами, виконуються як правило, із сталевих спіральних канатів-тросів, пучків і прядей високоміцного дроту, арматурних стержнів. В якості

жорстких нитей зазвичай застосовуються прокатні профілі і складені перерізи. Якщо в покриття одночасно вмикаються гнучкі нитки і жорсткі елементи, здатні сприймати зусилля стискування або згину, то такі системи називаються комбінованими.

Проектування вантових покриттів вимагає удосконалення конструктивних рішень, методів розрахунку, врахування нелінійності при великих деформаціях і умовах роботи. Одинопоясні покриття з паралельними вантами використовуються для створення монолітних задалегідь-напружених оболонок. Як приклад покриття з паралельними вантами одного напрямку можна розглянути будівлю громадського призначення пролетом 80 м, довжиною 144 м та висотою 19 м (рис.2)[6].

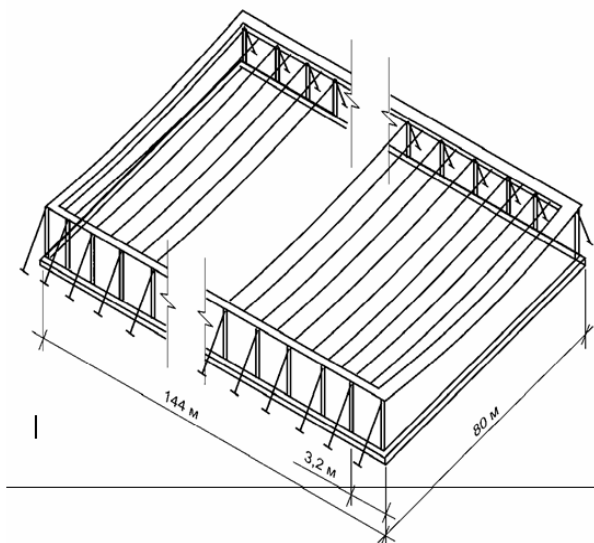


Рис.2. Схема комбінованого вантового покриття на пружноподатливому контурі

Ванти розташовані з кроком 1,6 м. Покриття виконане зі збірних залізобетонних плит. Стабілізація покриття досягається створенням монолітної залізобетонної оболонки. Збірно-монолітні елементи тонкої залізобетонної оболонки представлені у вигляді

плит із спареними трапецієвидними ребрами. Ванти прикріплюються до опорного трубобетонного контуру, встановленому на колони, розташовані з кроком 3,2 м. Розпір від пролітної частини сприймається контуром і відтяжками. Виконано чисельний аналіз напружено-деформованого стану (НДС) даної конструкції [6].

Розрахунок комбінованого вантового покриття на пружно податливому контурі є складним завданням. Для розрахунку таких конструкцій останнім часом разом з класичними аналітичними методами стали широко застосовуватися чисельні методи, орієнтовані на максимальне використання обчислювальної техніки [3]. До таких методів слід віднести метод кінцевих елементів (МКЕ) [5], метод сіток (метод кінцевих різниць) [3] та ін. МКЕ відрізняється своєю універсальністю, фізичною наочністю і високою алгоритмічністю. Основні співвідношення МКЕ отримані виходячи з першого принципу віртуальної роботи, який може бути представлений в загальних криволінійних координатах з використанням співвідношення нелінійної теорії пружності і теорії пластичної течії. В якості невідомих дискретної скінченно-елементної моделі виступають узагальнені вузлові переміщення КЕ в глобальній системі координат. Вводиться місцева нумерація вузлів по кожному напрямку, а також наскрізна нумерація. Відповідно до процедури МКЕ функції деформації і напруги розкладаються в ряд Макларена в центрі кінцевого елемента. Для вирішення системи отриманих нелінійних рівнянь використовується спеціальний алгоритм який побудований на комбінації методів продовження по параметру збудження і Ньютона-Конторовича. Виконано розрахунок багатопрогонового комбінованого покриття пологої циліндричної форми на пружноподатливому контурі. В якості основних параметрів напружено-деформованого стану розглядаються переміщення вузлових координат ванти в місцях прикріплення до опорного контуру, закріпленого на колоні, форма нитки в початковому і деформованому стані, напруження і зусилля у вантах, а також тангенціальні та поперечні згинальні моменти в опорному контурі.

На рис. 3 показані початкова і деформована форми вант при шарнірному і пружному спиранні. У разі шарнірно-нерухомого закріплення опор форма деформування має меншу стрілу провисання в порівнянні з пружноподатливим закріпленням.

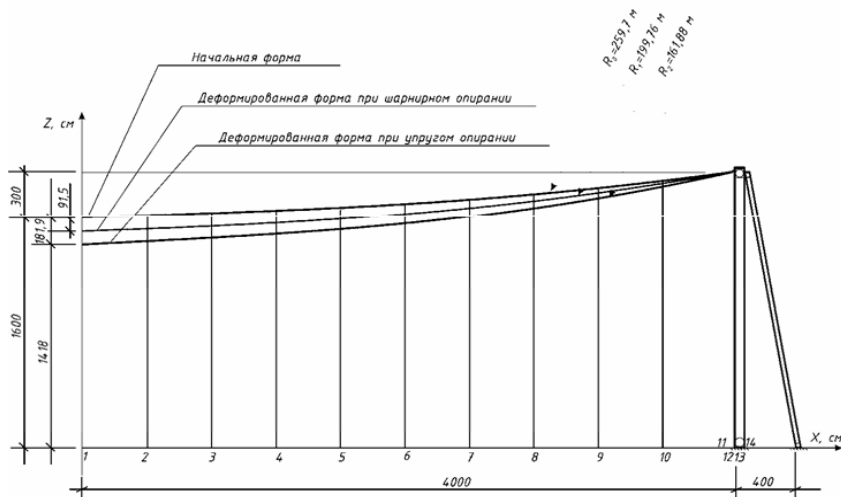


Рис.3. Форми деформування нитки

Для вантових конструкцій істотне значення має тимчасове зосереджене навантаження, яке викликає великі місцеві напруження. Даний вид навантаження є найбільш небезпечним ще й тому, що в зоні дії зосередженої сили можуть виникнути і розвинутися пластичні деформації. Тоді вже розрахунок конструкції слід вести за межею пружності, що не допускається нормативними документами для всяких систем. Однак таку ситуацію можна допустити при розрахунку елемента вантової конструкції – окремо взятій нитки [8].

Дослідження концентрації напружень в зоні прикладення зосередженої сили виконано на прикладі невагомої нитки, затисненої по кінцях і навантаженої в центрі прольоту зосередженою силою  $P$  (рис.4). Проліт нитки вважається великим у порівнянні з розглядаємою зоною. Величина зосередженої сили обиралася в залежності від розпору нитки з таким розрахунком, щоб пластичні

деформації не перевищували триразовий рівень максимальних пружних деформацій [8].

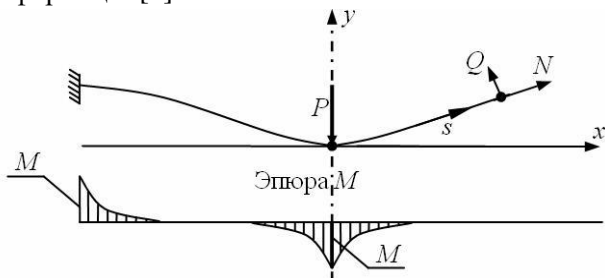


Рис.4. Схема досліджуваної нитки

Безрозмірна повздовжня сила і безрозмірний згинальний момент визначені формулами

$$\nu = \frac{N}{t \cdot h \cdot \sigma_T}, \quad \mu = \frac{4M}{t \cdot h^2 \cdot \sigma_T} \quad (1)$$

Епюра напружень нитки в умовах повної пластичності (рис.5).

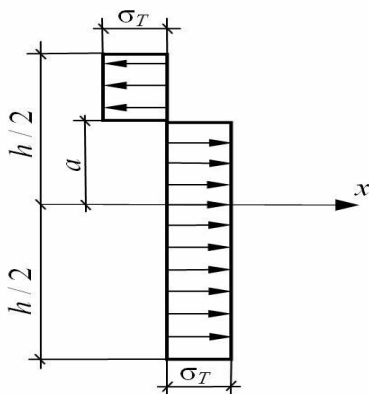


Рис.5. Епюра напружень нитки в умовах повної пластичності

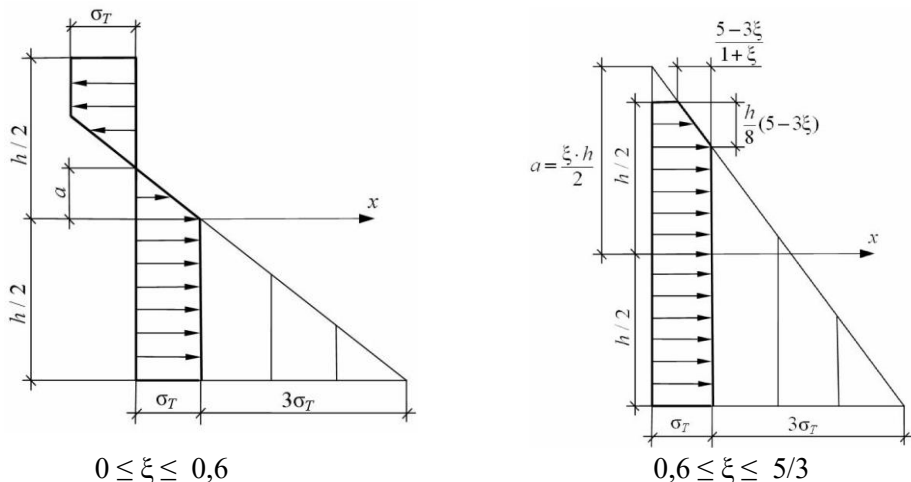
Формули для визначення повздовжньої сили і згинального моменту мають вигляд:

$$N = 2a \cdot t \cdot \sigma_T, \quad M = \left( \frac{h^2}{4} - a^2 \right) \cdot t \cdot \sigma_T \quad (2)$$

$$\nu = \xi, \quad \mu = 1 - \xi^2, \quad \xi = \frac{2a}{h} \quad (3)$$

Отримана область несучої здатності в графічному вигляді представлена на рис.7 суцільною лінією. По осі абсцис відкладена безрозмірна поздовжня сила, а по осі ординат - безрозмірний вигинаючий момент.

Епюри напружень нитки в момент, коли пластичні деформації в нижньому волокні досягають граничного рівня зображені на рис.6.



*Рис.6. Епюра напружень нитки при обмежених пластичних деформаціях*

Формули для визначення повздовжньої сили і згинального моменту при  $0 \leq \xi \leq 0,6$ :

$$N = 2at\sigma_T, \quad M = \left[ 1 - \left( \frac{2a}{h} \right)^2 + \frac{1}{48} \left( 1 + \frac{2a}{h} \right)^2 \right] \frac{t \cdot h^2 \sigma_T}{4} \quad (4)$$

$$\nu = \xi, \quad \mu = 1 - \xi^2 + \frac{(1 - \xi)^2}{48} \quad (5)$$

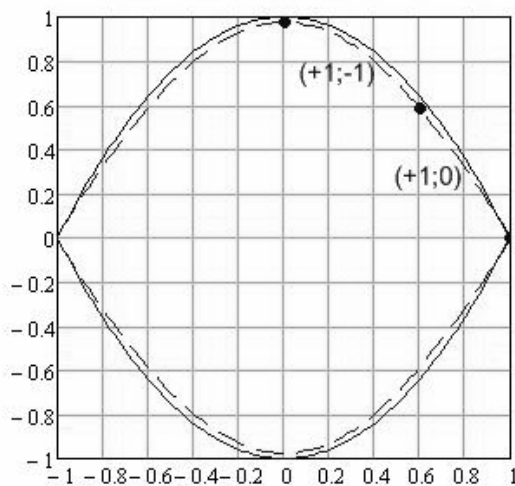


При  $0,6 \leq \xi \leq 5/3$ :

$$N = \left[ h - \frac{1}{16} \frac{(5h - 6a)^2}{h - 2a} \right] t \sigma_T, M = \left[ \frac{(6a - 5h)^2 (6a + 7h)}{(2a + h)} \right] \frac{t \sigma_T}{384} \quad (6)$$

$$\nu = 1 + \frac{(5 - 3\xi)^2}{1 + \xi} \frac{1}{16}, \mu = \frac{(3\xi - 5)^2 (3\xi + 7)}{96(\xi + 1)}. \quad (7)$$

Формули (5) і (7) визначають в параметричному вигляді дві ділянки границі області несучої здатності нитки при обмежених пластичних деформаціях (рис.7). Формули (5) визначають ділянку, позначену символами (+1; -1), а формули (7) - ділянку, позначену символами (+1; 0).



*Рис. 7. Область несучої здатності нитки:*

*----- в умовах повної пластичності;*

*- - - при обмежених пластичних деформаціях.*

Згинальний момент досягає максимального значення під зосередженою силою і швидко зменшується зі збільшенням координати  $s$ . На рис.8 наведені графіки зменшення згинального

моменту. По осі абсцис відкладено безрозмірна відстань від зосередженої сили, а по осі ординат – безрозмірний момент  $\mu$ . На рисунку показано дев'ять кривих для різних значень  $\nu$ .

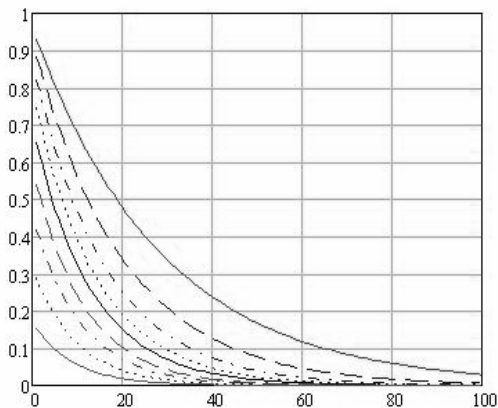


Рис.8. Графіки зменшення безрозмірного моменту:  
----- = 0,1; - - - - = 0,2; - - = 0,3; = 0,4; ----- = 0,5;  
- - - - = 0,6; - - = 0,7; = 0,8; ----- = 0,9.

Отже згинальні моменти швидко згасають у довжині нитки по експоненціальному закону.

### **Виконстана література:**

1. Качурин В. К. Теория всяких систем. М.: Госстройиздат, 1962.- 234с.
2. Шимановский В.Н., Соколов А.А. Расчет всяких конструкций за пределом упругости.-К.: Будівельник, 1975.-104 с.
3. Шимановский А.В., Лисицин Б.М. Моделирование строительных конструкций.-К.: Сталь, 2006.-724 с.
4. Лисицин Б.М., Машков И.Л. Развитие обобщенного проекционно-сеточного метода применительно к решению осесимметричных задач теории упругости // Сопротивление материалов и теория сооружений.–1988. Вып.52.–С.59-63.
5. Баженов В.А., Цихановський В.К., Кислокий В.М. Метод скінчених елементів у задачах нелінійного деформування тонких та м'яких оболонок.-К.: КНУБА, 2 000.-386 с.

6. Ленда А.В., Лисицин Б.М., Цыхановский В.К. Прочностной расчет большепролетного комбинированного вантового покрытия на упругоподатливом контуре. Збірник наукових праць Українського науково-дослідного та проектного інституту сталевих конструкцій імені В.М.Шимановського /Відп.ред. О.В.Шимановський. –К.: Вид-во «Сталь»,2009, вип.3.-С.85-94.

7. Свентиков А.А. Оптимизация компоновочных параметров висячих пространственных покрытий / А.А.Свентиков, А.М.Болдырев // Строительство и архитектура, научный вестник Воронежского архитектурно-строительного университета. Выпуск №1(9),2008.-С.44-49.

8. Гордеев В.Н., Ленда А.В. Упруго-пластическая работа нитей конечной жесткости в окрестности приложения сосредоточенных сил. Збірник наукових праць Українського науково-дослідного та проектного інституту сталевих конструкцій імені В.М.Шимановського /Відп.ред. О.В.Шимановський. –К.: Вид-во «Сталь»,2010, вип.5.-С.215-229.

#### *Анотация*

*Скебнева С., Омельченко К., Машков И., Глушаница А.*

#### **АНАЛИЗ РАБОТЫ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ВИСЯЧИХ ПОКРЫТИЙ**

*Проанализированы проблемы, связанные с исследованием напряженно-деформированного состояния комбинированного висячего покрытия. Показано распределение напряжений и деформаций в нити конечной жесткости в зоне действия сосредоточенной нагрузки.*

*Ключевые слова: комбинированное покрытие, напряженно-деформированное состояние, метод конечных элементов, нить конечной жесткости, упруго-пластическая работа.*

#### *Annotation*

*Skrebnieva S., Omelchenko K., Mashkov I., Hlushanytsia A.*

#### **ANALYSIS OF THE WORK OF SPATIAL HANGING COATINGS**

*The development of industrial production, the use of flexible technological lines and the transition to multifunctional purpose of buildings necessitates the construction with arbitrary layout of the interior space and in accordance with the increased runs.*

*The most appropriate for large-scale industrial buildings can be considered the use of hanging combined structures, in which the main load-bearing elements are tensile, which allows the most effective use of their strength properties.*

*At this time, the two most common applications are suspended surface coatings. The constructions listed in the article have high performance properties for the perception of distributed loads. However, in the case of concentrated impacts, which is characteristic of industrial and multifunctional buildings, significant kinematic displacements occur in such systems. Thus, the expansion of the scope of the hanging coatings requires the development of structural spatial systems that effectively perceive both the distribution and concentrated operational impacts.*

*Problems related to the study of the stress-strain state of the combined suspension coating are analyzed. A promising direction for solving this problem is the development of spatial core coatings. The principles of shaping of the hanging rod coatings are considered, the regularities of changing the stress-strain state of elements of the spatial hanging coatings under different types of computational effects are investigated. The distribution of stresses and strains in the thread of finite stiffness in the area of concentrated load is shown. The study of stress concentration in the area of application of the concentrated force is made on the example of a weightless thread, clamped at the ends and loaded in the center of the span with a concentrated force.*

*Keywords: combined coating, stress-strain state, finite element method, finite stiffness thread, elastic-plastic work.*

*Стаття надійшла до редакції у грудні 2019р.*