

Підходи до врахування горизонтальних переміщень фундаментів в роботі дерев'яних армованих вант

Богдан Демчина¹, Андрій Кравз²

¹Національний університет «Львівська Політехніка»
вул. Карпінського 6, Львів, Україна, 79013,

bogdan195809@gmail.com, orcid.org/0000-0002-3498-1519

²Національна академія образотворчого мистецтва і архітектури
вул. Вознесенський узвіз, 20, Київ, Україна, 04053,

andriy.kravz@gmail.com, orcid.org/0000-0002-9585-1654

DOI: 10.32347/0475-1132.40.2020.91-103

Анотація. Досліджено роботу дерев'яної армованої ванти на дію рівномірно розподіленого по всій довжині ванти навантаження. Наведено аналіз результатів статичних випробувань дерев'яної армованої ванти серії ВД-3.1. Запропоновано критерій, за яким дерев'яну армовану ванту можна рахувати за теорією жорстких ниток.

Для забезпечення стійкості і геометричної незмінності конструкції, що утворені жорсткими нитками, важливу роль відіграє врахування податливості опор, які сприймають горизонтальні опорні реакції (розпір ванти). Деформація опор жорстких вант викликає появу значних згинальних моментів в тілі ванти, а також призводить до збільшення прогину конструкції. Тому дослідженню податливості опор, під час випробувань дерев'яних армованих вант на дію рівномірно розподіленого по довжині ванти навантаження, приділялась особлива увага.

Досліджено податливість опор під час експериментальних випробувань дерев'яних армованих вант. Проведено порівняння отриманих результатів з розрахунковим значенням податливості опор, обчисленого виходячи з деформативності установки для випробувань вантових конструкцій.

Перевірено методики розрахунку прогинів вант, які враховують податливість опор. Визначено вплив податливості опор на прогин ванти.

На рівні з податливістю опор, на деформативність ванти впливала податливість вузлових з'єднань дерев'яних елементів ванти. Виходячи з цього було досліджено деформативність з'єднань дерев'яних елементів ванти на металозубчатих пластинах та її вплив на прогин ванти. Введено коефіцієнт деформативності з'єднань, що враховував нелінійну залежність деформації



Богдан Демчина
професор кафедри
будівельних конструкцій
д.т.н., проф.



Андрій Кравз
старший викладач кафедри
будівельних конструкцій

з'єднань дерев'яних елементів ванти від прикладеного навантаження.

У зв'язку з необхідністю врахування спільної роботи дерев'яного тіла ванти та сталюого канату було обчислено розрахункові характеристики приведенного поперечного перерізу дерев'яної ванти, армованої сталюим канатом.

Проведено статичний розрахунок дерев'яної армованої ванти за теорією жорстких ниток та співставлено результати обчислень з експериментальними даними.

Ключові слова: всіячі покриття, дерев'яні ванти, жорсткі нитки, податливість опор, статичний розрахунок, навантаження, з'єднання дерев'яних елементів, металозубчаті пластини.

ВСТУП

Всіячі покриття знайшли широке застосування при спорудженні концертних і виставкових залів, цирків, ринків, спортивних

споруд, а також промислових будівель. Багатий досвід будівництва висячих систем як в Україні так і в інших країнах, та результати наукових теоретичних і експериментальних досліджень дають підставу стверджувати, що даний вид покриттів є перспективним та цікавим з точки зору його ефективності (малої ваги, а відповідно – незначної ціни) та архітектурної привабливості.

Висячі конструкції є одними з найбільш економічних видів покриттів, завдяки тому, що від зовнішнього навантаження його несучі конструкції працюють переважно на розтяг. Це дозволяє максимально ефективно використовувати міцнісні характеристики різних видів сталей на розтяг. Це особливо важливо при використанні високоміцних матеріалів, таких як сталь, базальт, карбон. Тому висячі покриття є однією з найбільш перспективних конструктивних форм для застосування відносно дешевших високоміцних сучасних матеріалів [1].

Повне використання несучої здатності високоміцного матеріалу веде до зменшення власної ваги несучої конструкції і, як наслідок, дозволяє найбільш ефективно перекивати великі прольоти. Зі збільшенням прольоту переваги висячої великопрольотної конструктивної форми збільшується, що добре підтверджується практикою, де вже існують мости з прольотом 1000м і більше [2].

АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДАНИХ ТА ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Найбільш раціональним типом покриття для великопролітних виробничих та громадських споруд можна вважати використання висячих конструкцій, в яких основні несучі елементи працюють на розтяг, що дозволяє найбільш ефективно використовувати їхні високоміцні характеристики. Основним недоліком висячих покриттів є їх підвищена деформативність, що викликана появою в них кінематичних переміщень і пружних деформацій. Таким чином, ключовою проблемою застосування висячих систем є задача підвищення їх жорсткості. До числа перспективних напрямків по вирішенню даної

проблеми відносять розробку покриттів з використанням розтягнутих згинально-жорстких ниток. На сьогоднішній день найбільш широкого застосування знайшли жорсткі ванти виконані у вигляді зігнутих ферм та зварних або прокатних двотаврів із маловуглецевої або низьколегованої сталі. Проте використання маловуглецевої або низьколегованої сталі для вантових конструкцій в заміні високоміцних канатів знижує несучу здатність покриття, окрім того зростає власна вага покриття, що призводить до збільшення витрат матеріалів на усі опорні конструкції.

Для рішення цієї проблеми пропонується спільне застосування дерев'яних елементів та канатів, коли частину розтягуючих зусиль будуть нести сталеві канати, що мають великий розрахунковий опір на розтяг, а стабілізацію вант будуть забезпечувати дерев'яні елементи, з достатньо великою жорсткістю.

Попереднім аналізом літературних джерел, встановлено, що тема дерев'яних вант досліджувалась мало [3], хоча такий варіант збільшення жорсткості висячих конструкцій є досить ефективним, оскільки не значно збільшує власну вагу покриття через незначну об'ємну вагу деревини. Методика досліджень дерев'яних армованих вант подана в роботах [4,5]. Результати експериментальних досліджень публікувались в роботах [6,7].

МЕТА РОБОТИ

Метою даного дослідження був аналіз результатів статичних випробувань дерев'яної армованої ванти. Розрахунок критерію жорсткості для підбору методики розрахунку дерев'яної армованої ванти. Визначення податливості опор та деформативності з'єднань в залежності від розпору ванти.

ОСНОВНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ

В теорії висячих систем [8] стержень з провисом підвішений до двох нерухомих опор і навантажений певним навантаженням називають ниткою. Так як будь-який

матеріальний стержень має ту чи іншу жорсткість, то абсолютно гнучких ниток не існує. Тим не менше існує можливість розрахувати нитку як гнучку. Методи розрахунку гнучких ниток дещо відрізняються від методів розрахунку жорстких ниток. Для того щоб визначити, який метод розрахунку краще підходить для досліджуваної конструкції, був використаний критерій жорсткості φ , який визначався як відношення напруження згину (σ_m) до напруження розтягу (σ_t), що виникали в середині прольоту ванти від рівномірно розподіленого навантаження q .

$$\varphi = \frac{\sigma_m}{\sigma_t} \leq 5\%, \quad (1)$$

Отримане співвідношення дозволило провести межу (умовну) між гнучкими і жорсткими нитками. Якщо знехтувати помилкою в $\alpha = 5\%$, то нитка, яку можна вважати гнучкою, характеризується нерівністю (1).

Для визначення розтягуючих і згинальних напружень, була розглянута балка на дох опорах (рис. 1). Під дією рівномірно розподіленого навантаження q в середині прольоту балки виникав «згинальний» момент, що рівний:

$$M_b = \frac{ql^2}{8}, \quad (2)$$

При цьому прогин в середині прольоту балки визначався, як:

$$w_b = \frac{5ql^4}{384EI}, \quad (3)$$

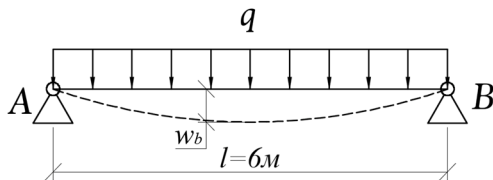


Рис.1. Розрахункова схема балки.

Fig.1. Beam calculation scheme.

Величина згинального моменту в балці була пропорційна величині її прогину. Тому, якщо який небудь стержень (наприклад жорстка нитка) при всіх інших рівних з

балкою параметрах мав прогин f (рис. 2.), згинальний момент в середині прольоту цього стержня M_m набув вигляду:

$$M_m = M_b \frac{f}{w_b}, \quad (4)$$

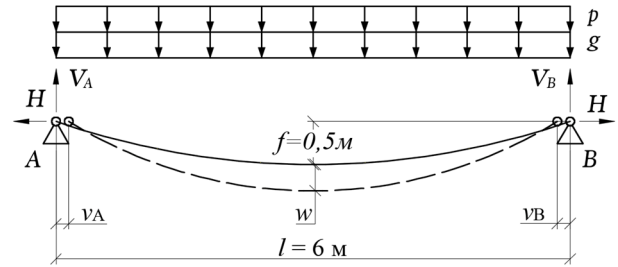


Рис.2. Розрахункова схема ванти.

Fig.2. Stress ribbon structures calculation scheme.

Розрахувавши рівняння (2) і (3), отримали:

$$M_m = \frac{48EIf}{5l^2}, \quad (5)$$

Рівняння (4) і (5) записані виходячи з того що початково жорстка нитка була прямолінійною, а отриманий прогин f викликав згинальний момент M_m . Натомість, конструкцію дерев'яної армованої ванти ми розглядали як нитку, в якій не виникало згинальних моментів від початкового навантаження g , оскільки її обрис був заданий по рівнянню квадратної параболи, що відповідав цьому навантаженню. Додаткове рівномірно розподілене навантаження p призвело до появи прогину w . Тоді згинальний момент в середині прольоту приблизно визначався за рівнянням (5), тільки замість f підставлявся w . [1]

$$M_m = \frac{48EIw}{5l^2}, \quad (6)$$

Натяг абсолютно гнучкої нитки, навантаженої рівномірно розподіленим навантаженням p , визначався, як:

$$H = \frac{M_b}{f} = \frac{pl^2}{8f}, \quad (7)$$

Так як в жорсткій нитці балочний момент M_b частково сприймався як балкою (M_m), натяг жорсткої нитки при навантаженні p був:

$$H = \frac{M_b - M_m}{f} = \frac{pl^2}{8f} - \frac{48EIw}{5l^2f}, \quad (8)$$

Маючи формули (6) і (8), були знайдені напруження в середині прольоту від згину (σ_m) і від розтягу (σ_t)

$$\sigma_m = \frac{M_m}{W} = \frac{48EIw}{5l^2W} = \frac{48Ehw}{10l^2}, \quad (9)$$

де h – висота перетину нитки (перетин симетричний)

$$\sigma_t = \frac{H}{A} = \frac{pl^2}{8fA} - \frac{48EIw}{5l^2Af}, \quad (10)$$

Для подальших обчислень розраховувались характеристики перерізу дерев'яної армованої ванти:

Приведена жорсткість перерізу при розтягу обчислювалась як сума розтягувальних жорсткостей дерев'яного тіла ванти і тросу:

$$EA = E_w A_w + E_c A_c = 0,905 \cdot 10^7 \cdot 4,64 \cdot 10^{-3} + 15 \cdot 10^7 \cdot 1,52 \cdot 10^{-5} = 44272 \text{кН}$$

Для визначення приведеної жорсткості перерізу при згині визначався центр ваги перерізу та використовувались формули переносу осей з врахуванням модулів пружності елементів [9].

$$I_{wz_1} = \frac{bh^3}{12} = \frac{0,032 \cdot 0,145^3}{12} = 8,13 \cdot 10^{-6} \text{м}^4$$

$$I_{cz_2} = \frac{\pi d^4}{32} = \frac{\pi \cdot (5,8 \cdot 10^{-3})^4}{32} = 1,11 \cdot 10^{-10} \text{м}^4$$

Положення центру ваги визначалося з рівняння:

$$y_c = \frac{y_{c_1} A_w + y_{c_2} \alpha A_c}{A_w + \alpha A_c}$$

$$y_c = \frac{0,464 \cdot 10^{-3} - 84,5 \cdot 10^{-3} \cdot 16,57 \cdot 1,51 \cdot 10^{-5}}{4,64 \cdot 10^{-3} + 16,57 \cdot 1,51 \cdot 10^{-5}}$$

$$y_c = -4,3 \cdot 10^{-3} \text{м}$$

де α - співвідношення модулів пружності тросу та дерева:

$$\alpha = \frac{E_c}{E_w} = \frac{15 \cdot 10^7}{0,905 \cdot 10^7} = 16,57$$

Моменти інерції елементів відносно центру ваги перерізу визначались за допомогою формул переносу осей:

$$I_{wz_c} = I_w + a_1^2 A_w = 8,13 \cdot 10^{-6} + (4,3 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 4,64 \cdot 10^{-3} = 8,22 \cdot 10^{-6} \text{м}^4$$

$$I_{cz_c} = I_c + a_2^2 A_c = 1,11 \cdot 10^{-10} + (80,2 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 1,51 \cdot 10^{-5} = 9,72 \cdot 10^{-8} \text{м}^4$$

Приведена жорсткість перерізу дерев'яної армованої ванти при згині:

$$EI = E_w I_{wz_c} + E_c I_{cz_c} = 0,905 \cdot 10^7 \cdot 8,22 \cdot 10^{-6} + 15 \cdot 10^7 \cdot 9,72 \cdot 10^{-8} = 88,97 \text{кН/м}$$

Табл.1. Схема та характеристики поперечного перерізу дерев'яної армованої ванти.

Table 1. Scheme and features of cross section of stress ribbon timber structures.

Схема	Характеристика	Позн.	Дерева w	Тросу c	Приведена	Од. вим.
	Ширина	b	0,032	–	–	м
	Висота	h	0,145	–	–	м
	Діаметр	d	–	$5,8 \cdot 10^{-3}$	–	м
	Площа	A	$4,64 \cdot 10^{-3}$	$1,52 \cdot 10^{-5}$	$4,89 \cdot 10^{-3}$	м ²
	Момент інерції	I	$8,13 \cdot 10^{-6}$	$1,11 \cdot 10^{-10}$	$9,83 \cdot 10^{-6}$	м ⁴
	Момент опору	W	$1,12 \cdot 10^{-4}$	–	–	м ³
	Модуль пружності	E	$0,905 \cdot 10^7$	$15 \cdot 10^7$	–	кН/м ²
	Жорсткість при згині	EI	73,57	0,017	88,97	кН/м ²
	Жорсткість при розтягу	EA	41992	2280	44272	кН

Для роботи жорстких ниток велике значення має податливість опор. На відміну від гнучких ниток, деформація опор під навантаженням суттєво змінює напружений стан жорстких ниток, сильно збільшуючи розрахунковий згинальний момент в них. Відповідно також сильно збільшується розрахунковий прогин.

Зближення опор A та B (рис. 3) визначалось як сума горизонтального переміщення опори A (v_A) та опори B (v_B):

$$v = v_A + v_B$$

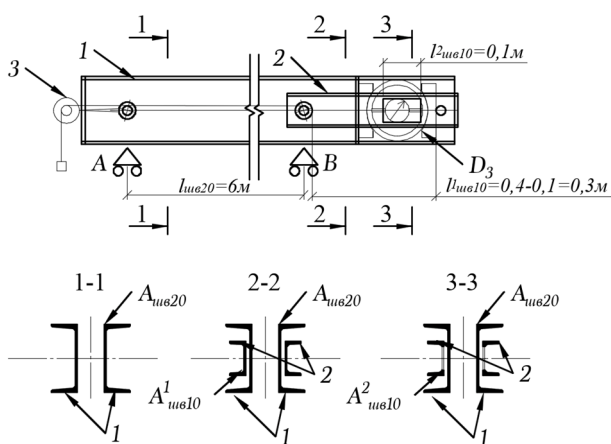


Рис.3. Схема стенду для заміру і обчислення податливості опор.

Fig.3. Scheme of the test bench for measuring and calculating the pliability of supports.

Розрахункове значення податливості опор визначалося як сума деформації елементів установки для випробування від зусилля розпору $H = 1$ кН:

$$v^{theor} = \Delta l_{шв20} + \Delta l_{D3} + \Delta l_{шв10}^1 + \Delta l_{шв10}^2$$

де $\Delta l_{шв20} = \frac{Hl_{шв20}}{EA_{шв20}} = \frac{1 \cdot 6}{21 \cdot 10^7 \cdot 2,234 \cdot 10^{-3}} = 6,1 \cdot 10^{-6} \frac{м}{кН}$ – зменшення довжини балки стенду 1 (рис. 1) від зусилля розпору $H = 1$ кН;

$\Delta l_{D3} = 10^{-5} \frac{м}{кН}$ – деформація кільцевого динамометра D_3 від зусилля розпору $H = 1$ кН;

$\Delta l_{шв10}^1 = \frac{Hl_{шв10}^1}{EA_{шв10}^1} = \frac{1 \cdot 0,3}{21 \cdot 10^7 \cdot 2,109 \cdot 10^{-3}} = 6,6 \cdot 10^{-7} \frac{м}{кН}$ – збільшення довжини відтяжок 2,

що передавали розпір на динамометр D_3 , в перерізі 2-2 від зусилля розпору $H = 1$ кН;

$$\Delta l_{шв10}^2 = \frac{Hl_{шв10}^2}{EA_{шв10}^2} = \frac{1 \cdot 0,1}{21 \cdot 10^7 \cdot 2,078 \cdot 10^{-3}} = 3,1 \cdot 10^{-7} \frac{м}{кН}$$

– збільшення довжини відтяжок 2, що передавали розпір на динамометр D_3 , в перерізі 3-3 від зусилля розпору $H = 1$ кН;

$$v^{theor} = 6,1 \cdot 10^{-6} + 10^{-5} + 6,6 \cdot 10^{-7} + 3,1 \cdot 10^{-7} = 1,71 \cdot 10^{-5} \frac{м}{кН}$$

Експериментальні значення податливості опор визначалися як середні значення податливості опор AB по всіх етапах завантаження.

$$v^{exp} = \frac{\sum_{i=1}^n v_i^{exp}}{n}$$

де n – кількість етапів завантаження;

$$v_{1...n}^{exp} = \frac{\Delta AB}{\Delta D_3}$$

де ΔAB , м – зближення опор за один етап завантаження. Визначалось за показами прогиномірів БПАО (3) (рис. 3), закріплених на металевому стержні опорного вузла ванти на опорі A . Інша точка була закріплена на металевому стержні опорного вузла ванти на опорі B ;

ΔD_3 , кН – збільшення розпору ванти за один етап завантаження, визначений як різниця показів динамометра D_3 .

Табл.2. Зближення опор A та B

Table 2. Convergence of supports A and B

v^{exp6} , м/кН	6,19E-05
v^{exp8} , м/кН	7,52E-05
v^{exp10} , м/кН	6,37E-05
v^{exp11} , м/кН	6,94E-05
$v^{exp(aver)}$, м/кН	6,75E-05
v^{theor} , м/кН	1,71E-05
$\Delta v = v^{exp(сep)} - v^{teor}$, м/кН	5,04E-05
Стандартне відхилення S , м/кН	0,60E-05
Коефіцієнт варіації C , %	8,89%

$v^{exp6}, v^{exp8}, v^{exp10}, v^{exp11}$ – зближення опор для відповідних випробувань (№6, №8, №10, №11). Як бачимо з даних, наведених в таблиці 2, в усіх випробуваннях експериментальне значення зближення опор було суттєво більшим ніж розрахункове. Проте коефіцієнт варіації значення зближення опор в експериментах $C = 8,89\% < 10\%$, що свідчить про достовірність результатів експериментальних досліджень податливості опор дерев'яних армованих вант. Для подальших розрахунків було прийнято середнє значення експериментального зближення опор A та B :

$$v^{exp(aver)} = 6,75 \cdot 10^{-5}, \text{ м/кН.}$$

Прогин дерев'яної армованої ванти в середині прольоту (w) від додаткового навантаження ($p=6\text{кН/м}$) обчислювався згідно методики, описаної в [6].

Перша методика розрахунку прогину. Прогин дерев'яної армованої ванти в середині прольоту (w^{theor1}) від додаткового навантаження ($p=6\text{кН/м}$) обчислювався виходячи з величини видовження самої ванти [8].

$$w^{theor1} = \Delta L_{пр} \frac{3}{16} \frac{l}{f_0}, \quad (11)$$

$$\Delta L_{пр} = \Delta L + vH + \mu N, \quad (12)$$

$\Delta L = \frac{NL}{EA}$ – видовження ванти від навантаження;

$L = l + \frac{8}{3} \cdot \frac{f_0^2}{l} = 6 + \frac{8}{3} \cdot \frac{0,5^2}{6} = 6,1111\text{м}$ – початкова довжина ванти;

$N = \sqrt{H^2 + V^2}$ – поздовжнє зусилля, що виникає у ванті від додаткового навантаження (p , кН/м);

$V = \frac{pl}{2} = \frac{6 \cdot 6}{2} = 18, \text{ кН}$ – вертикальна опорна реакція;

$l = 6\text{м}$ – проліт ванти;

$f_0 = 0,5\text{м}$ – початкова стріла провису в середині прольоту від постійного навантаження g , що не викликало появи згинального моменту ванти;

$v = v_A + v_B = 6,75 \cdot 10^{-5}, \text{ м/кН}$ – експериментальне значення зближення опор A та B від $\Delta H = 1\text{кН}$;

$\mu = 2\mu_S + 4\mu_C$ – податливість з'єднань дерев'яних елементів ванти від $\Delta N = 1\text{кН}$;

де $\mu_S = 10^{-6}\text{м/кН}$ – експериментальне значення податливості опорного вузла дерев'яної ванти від $\Delta N = 1\text{кН}$;

μ_C – податливість одного з'єднання дерев'яних елементів ванти від $\Delta N = 1\text{кН}$, визначена за результатами експериментальних досліджень на розтяг з'єднань дерев'яних елементів на металозубчастих пластинах (МЗП) (рис. 4):

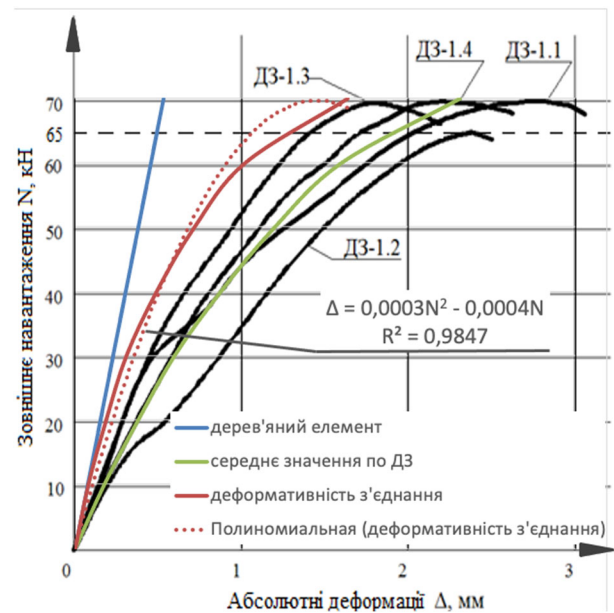


Рис.4. Деформація з'єднання на МЗП.

Fig.4. Deformation of the connection on punched metal plate fasteners.

Абсолютні деформації з'єднання (Δ) визначались за квадратичною залежністю від розтягуючого зусилля N , з графіка деформації дослідних зразків ДЗ-1.1 – ДЗ-1.4. [7].

$$\Delta = 0,0003N^2 - 0,0004N, \text{ мм}$$

Відповідно, податливість з'єднання дерев'яних елементів ванти від $\Delta N = 1\text{кН}$ визначалась:

$$\mu_c = \frac{\Delta}{N} = 3 \cdot 10^{-7} \cdot N - 4 \cdot 10^{-7} \text{м/кН}$$

Для обчислення видовження нитки (ΔL) розраховувався в *першому* наближенні розпір дерев'яної армованої ванти (H), як для гнучкої нитки за рівнянням:

$$H_1 = \frac{pl^2}{8f} = \frac{6 \cdot 6^2}{8 \cdot 0,5} = 54\text{кН/м}$$

$$N_1 = \sqrt{H_1^2 + V^2} = \sqrt{54^2 + 18^2} = 56,92\text{кН}$$

$$\Delta L_1 = \frac{N_1 L}{EA} = \frac{56,92 \cdot 6,1111}{44272} = 7,86 \cdot 10^{-3} \text{м}$$

$$\Delta L_{\text{пр1}} = \Delta L_1 + \nu H_1 + \mu N_1 = 7,86 \cdot 10^{-3} + 6,75 \cdot 10^{-5} \cdot 54 + (2 \cdot 10^{-6} + 4 \cdot (3 \cdot 10^{-7} \cdot 56,92 - 4 \cdot 10^{-7})) \cdot 56,92 = 0,0154 \text{м}$$

$$w_1^{\text{theor1}} = 0,0154 \cdot \frac{3}{16} \cdot \frac{6}{0,5} = 0,0347 \text{м} \\ = 34,7 \text{мм};$$

Розпір конструкції в *другому* наближенні обчислювався за рівнянням (8), з врахуванням, що $f = f_0 + w$:

$$H_2 = \frac{pl^2}{8f} - \frac{48Elw}{5l^2f} = \frac{6 \cdot 6^2}{8 \cdot (0,5 + 0,0347)} - \frac{48 \cdot 88,97 \cdot 0,0347}{5 \cdot 6^2 \cdot (0,5 + 0,0347)} = 48,96 \text{кН/м}$$

$$N_2 = \sqrt{H_2^2 + V^2} = \sqrt{48,96^2 + 18^2} \\ = 52,16 \text{кН}$$

$$\Delta L_2 = \frac{N_2 L}{EA} = \frac{52,16 \cdot 6,1111}{44272} = 7,20 \cdot 10^{-3} \text{м}$$

$$\Delta L_{\text{пр2}} = \Delta L_2 + \nu H_2 + \mu N_2 = 7,20 \cdot 10^{-3} + 6,75 \cdot 10^{-5} \cdot 48,96 + (2 \cdot 10^{-6} + 4 \cdot (3 \cdot 10^{-7} \cdot 52,16 - 4 \cdot 10^{-7})) \cdot 52,16 = 0,0138 \text{м}$$

$$w_2^{\text{theor1}} = 0,0138 \cdot \frac{3}{16} \cdot \frac{6}{0,5} = 0,0310 \text{м} \\ = 31,0 \text{мм};$$

Розпір конструкції в *третьому* наближенні:

$$H_3 = \frac{pl^2}{8f} - \frac{48Elw}{5l^2f} = \frac{6 \cdot 6^2}{8 \cdot (0,5 + 0,031)} - \frac{48 \cdot 88,97 \cdot 0,031}{5 \cdot 6^2 \cdot (0,5 + 0,031)} = 49,46 \text{кН/м}$$

$$N_3 = \sqrt{H_3^2 + V^2} = \sqrt{49,46^2 + 18^2} \\ = 52,63 \text{кН}$$

$$\Delta L_3 = \frac{N_3 L}{EA} = \frac{52,63 \cdot 6,1111}{44272} = 7,27 \cdot 10^{-3} \text{м}$$

$$\Delta L_{\text{пр3}} = \Delta L_3 + \nu H_3 + \mu N_3 = 7,27 \cdot 10^{-3} + 6,75 \cdot 10^{-5} \cdot 49,46 + (2 \cdot 10^{-6} + 4 \cdot (3 \cdot 10^{-7} \cdot 52,63 - 4 \cdot 10^{-7})) \cdot 52,63 = 0,0142 \text{м}$$

$$w_3^{\text{theor1}} = 0,0142 \cdot \frac{3}{16} \cdot \frac{6}{0,5} = 0,0320 \text{м} \\ = 32,0 \text{мм};$$

Наведений варіант розрахунку прогину не дуже зручний, оскільки знаходився через розпір ванти H , який також був невідомий. Відповідно, необхідно було виконувати обчислення декілька разів.

Друга методика розрахунку прогину. Розрахункові значення прогинів визначались за [8], методика Веденикова Г.С. – Телояна А.Л. із кубічного рівняння:

$$A_n w^3 + B_n w^2 + C_n w + D_n = 0.$$

Для приблизного розрахунку кубічним ($A_n w^3$) і квадратним ($B_n w^2$) членом рівняння нехтувалося. Тоді отримали лінійну формулу для визначення прогину

$$w^{\text{theor2}} = \frac{\Gamma_n}{B_n}, \quad (13)$$

$$\Gamma_n = \frac{1}{80} \frac{pl^4}{EI}, \quad (14)$$

$$B_n = \frac{8}{15} \frac{kA}{mI} f_0^2 + \frac{1}{80} \frac{gl^4}{EI f_0} + 1, \quad (15)$$

де $g=0.024\text{кН/м}$ – погонне навантаження від власної ваги конструкції;

m – коефіцієнт довжини нитки:

$$m = 1 + \frac{\Phi_1}{l} = 1 + \frac{0,2222}{6} = 1,037, \quad (16)$$

де Φ_1 - характеристика початкового обрису нитки:

$$\Phi_1 = \frac{16f_0^2}{3l} = \frac{16 \cdot 0,5^2}{3 \cdot 6} = 0,222\text{м}, \quad (17)$$

$$k = \frac{\cos^3 \beta}{1 \pm \frac{EA}{mI} \left(\nu + \mu + \frac{\rho t l}{H - H_0} \right)}; \quad - \text{ коефіцієнт, який}$$

враховує рівень розташування опор деформативність опор, податливість з'єднань дерев'яних елементів і зміну температури;

$\cos^3 \beta = 1$, оскільки опори розташовані на одному рівні;

$\nu = \nu_A + \nu_B = 6,75 \cdot 10^{-5} \text{м/кН}$ - експериментальне значення зближення опор A та B від $\Delta H = 1\text{кН}$;

$\mu = 2\mu_S + 4\mu_C = 2 \cdot 10^{-6} + 12 \cdot 10^{-7}$.
 $N = 16 \cdot 10^{-7} \text{м/кН}$, - податливість з'єднань дерев'яних елементів ванти від $\Delta N = 1\text{кН}$.
 Оскільки деформативність з'єднань дерев'яних елементів ванти має нелінійну залежність від розтягуючого зусилля у ванті, для уникнення повторних розрахунків, значення N , приймалися з попередньої методики розрахунку прогину:

$$\mu = 2 \cdot 10^{-6} + 12 \cdot 10^{-7} \cdot 52,63 - 16 \cdot 10^{-7} = 6,35 \cdot 10^{-5} \text{м/кН};$$

$\rho t l = 0$ – температурні деформації ванти (приймались рівні нулю, оскільки випробування проводились при постійній температурі).

$$k = \frac{1}{1 + \frac{44272}{1,037 \cdot 6} (6,75 \cdot 10^{-5} + 6,35 \cdot 10^{-5})} = 0,518$$

$$B_n = \frac{8}{15} \frac{0,518 \cdot 4,89 \cdot 10^{-3}}{1,037 \cdot 9,83 \cdot 10^{-6}} \cdot 0,5^2 + \frac{1}{80} \cdot \frac{0,024 \cdot 6^4}{88,97 \cdot 0,5} + 1 = 33,94$$

$$\Gamma_n = \frac{1}{80} \cdot \frac{6 \cdot 6^4}{88,97} = 1,093\text{м}$$

$$w^{theor2} = \frac{1,093}{33,94} = 0,0322\text{м} = 32,2\text{мм}$$

Для розуміння важливості врахування податливості опор та деформативності з'єднань дерев'яних елементів, на графік прогинів були нанесені теоретичні значення прогинів дерев'яної ванти при умові, що опори були абсолютно нерухомі $w^{\nu=0}$, що ванта була виготовлена з цільної деревини, без з'єднань $w^{\mu=0}$, а також з врахуванням цих двох умов одночасно $w^{\nu, \mu=0}$ (рис. 5).

Для аналізу результатів експериментальних досліджень прогину дерев'яної армованої ванти значення прогинів від рівномірно розподіленого додаткового навантаження $p = 3\text{кН/м}$ та 6кН/м були записані в таблицю 3.

Табл.3. Порівняння розрахункових та експериментальних значень прогинів ванти
 Table 3. Comparison of calculated and experimental values of cable deflections

Навантаження $p = 3\text{кН}$			
Прогин	w^{theor1}	w	Δ
w^{theor2}	14,4	14,3	1,1%
ВД-3.1.0		16,4	-13,7%
ВД-3.1.1		14,5	-0,5%
ВД-3.1.2		14,6	-1,1%
$w^{\nu=0}$		10,5	27,1%
$w^{\mu=0}$		12,4	14,1%
$w^{\nu, \mu=0}$		8,3	42,7%
Навантаження $p = 6\text{кН}$			
w^{theor2}	32,0	32,2	-0,4%
ВД-3.1.0		34,7	-8,3%
ВД-3.1.1		32,2	-0,4%
ВД-3.1.2		29,8	7,1%
$w^{\nu=0}$		24,4	23,9%
$w^{\mu=0}$		24,3	24,3%
$w^{\nu, \mu=0}$		15,8	50,6%

Порівняння прогинів вант виконувалось відносно значення прогинів w^{teor1} розрахованих за першою методикою розрахунку [8]. Прогини обчислені за другою методикою розрахунку w^{teor2} , з точністю до 2% відповідають значенням обчислених по першій методиці. Максимальне відхилення експериментальних прогинів від теоретичних значень було в межах 13,7%, що не перевищувало допустимого значення 15%. Хороша збіжність експериментальних і теоретичних прогинів свідчила про придатність обох методик розрахунку та

введеного коефіцієнту податливості з'єднань дерев'яних елементів вант. Прогини вант, при розрахунку яких не враховувались зближення опор та/або деформації з'єднань дерев'яних елементів, суттєво відрізнялися від прогинів визначених в ході експериментальних випробувань та теоретичних значень, обчислених по наведених методиках. Розбіжність складала до 50,6%. Що свідчило про необхідність врахування податливості опор та з'єднань дерев'яних елементів вант.

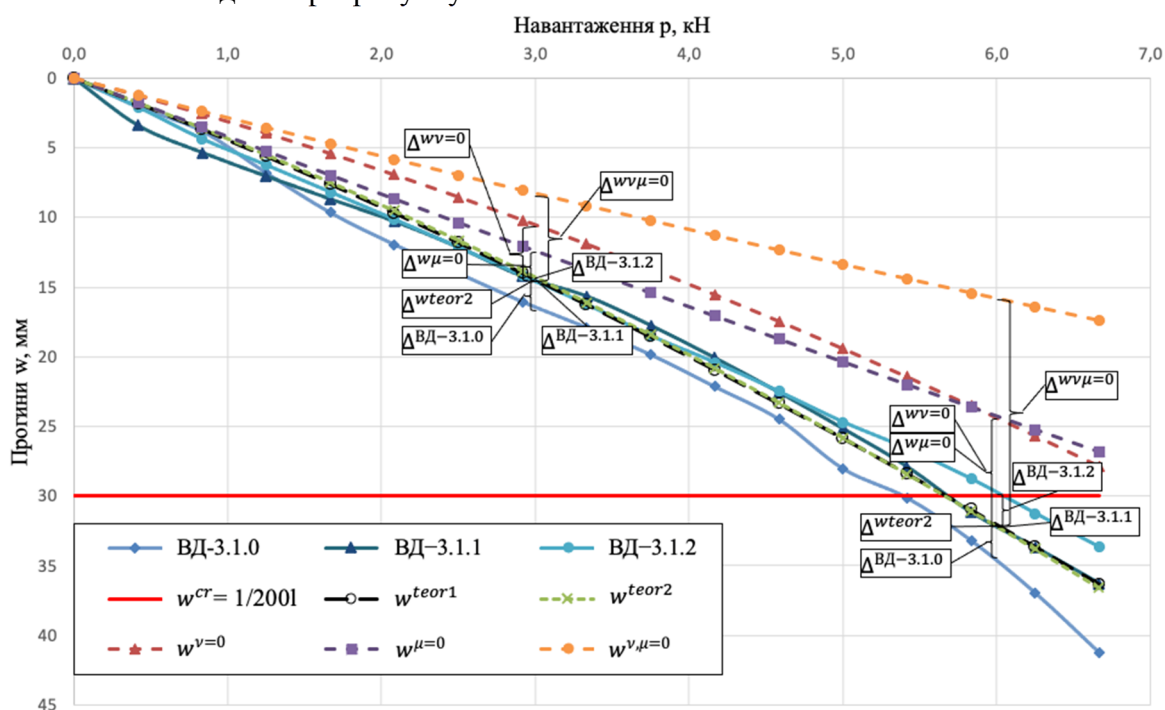


Рис. 5. Графік наростання прогинів вант в середині прольоту від додаткового навантаження p .
Fig. 5. Graph of increasing cable deflections in the middle of the span from additional load p .

Підставивши значення прогину і розпору обчислювалися згинальні і розтягуючі напруження в поперечному перерізі ванти:

$$\sigma_m = \frac{48}{10} \cdot \frac{0,905 \cdot 10^7 \cdot 0,145 \cdot 0,032}{6^2} = 5598 \text{кН/м}^2$$

$$\sigma_t = \frac{49,46}{4,89 \cdot 10^{-3}} = 10115 \text{кН/м}^2$$

$$\varphi = \frac{\sigma_m}{\sigma_t} = \frac{5598}{10115} \cdot 100\% = 55,35\% > \alpha = 5\%$$

Отже, досліджувану дерев'яну ванту вважали жорсткою ниткою. Подальший розрахунок ванти проводили як для жорсткої нитки.

Використовуючи теорію розрахунку жорстких ниток, був визначений розпір (H^{theor}) в дерев'яній армованій ванті від рівномірно розподіленого додаткового навантаження $p = 3\text{кН/м}$ та 6кН/м (табл.4).

$$H^{theor} = \frac{pl^2}{8f} - \frac{48Elw}{5l^2f}$$

Розрахункове значення вертикальної опорної реакції (V^{theor}) було обчислено за формулою:

$$V^{theor} = \frac{pl}{2}$$

Табл. 4. Розрахункові та експериментальні значення опорних реакцій ванти
Table 4. Calculated and experimental values of the support reactions of the cable

Розпір (горизонтальна реакція)			
p , кН	H^{theor} , кН	H^{exp} , кН	ΔH , %
3	25,69	25,04	2,6
6	50,15	49,88	0,6

Вертикальні реакції					
p , кН	V^{theor} , кН	V_A^{exp} , кН	V_B^{exp} , кН	ΔV_A , %	ΔV_B , %
3	9,00	8,66	9,04	3,9	-0,4
6	18,00	17,58	18,22	2,4	-1,2

Експериментальні значення реакцій опор для ванти марки ВД-3.1.2 були визначені за показами встановлених на опорах динамометрів D_1 , D_2 (вертикальні реакції V_A^{exp} , V_B^{exp}) та D_3 (розпір конструкції H^{exp}) (рис.6).

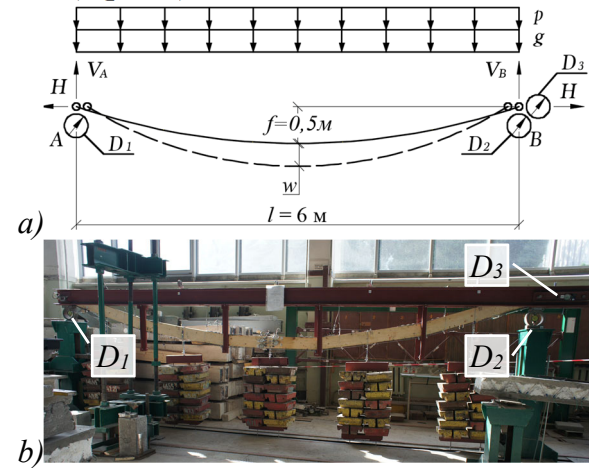


Рис. 6. Розташування динамометрів на стенді для випробувань.

a) схема b) вигляд підчас експерименту
Fig. 6. Location of dynamometers on the test bench.

a) scheme b) view during the experiment

Аналізуючи розрахункові (H^{theor}) та експериментальні дані значення розпору (H^{exp}) досліджуваної дерев'яної ванти (табл. 4.) (рис. 7) був зроблений висновок про високу збіжність розрахункових та експериментальних результатів (до 3,9%), а це засвідчило про придатність вказаної методики розрахунку жорстких ниток для досліджуваних дерев'яних армованих вант.

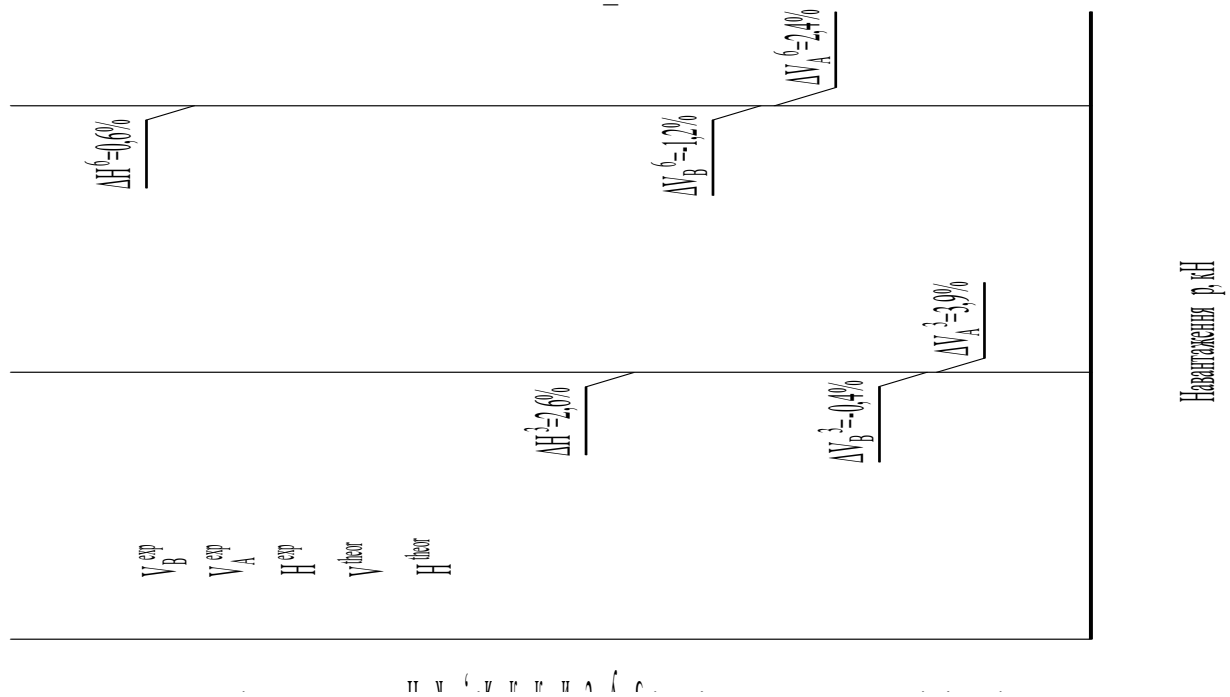


Рис. 7. Розрахункові та експериментальні значення опорних реакцій.
Fig. 7. Calculated and experimental values of the support reactions.

ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ

1) Для розрахунку досліджуваних дерев'яних армованих вант можна використовувати критерій жорсткості $\varphi = 55,35\%$, за яким вони відносяться до жорстких ниток. Тому їх розрахунок необхідно проводити за теорією розрахунку жорстких ниток.

2) Висока збіжність розрахункових і експериментальних значень опорних реакцій свідчить про придатність методики розрахунку дерев'яної армованої ванти, як жорсткої нитки.

3) Застосування в тілі ванти дерев'яних елементів для забезпечення жорсткості вант є доцільним.

4) Обидві методики розрахунку прогинів, що розглядалися в роботі є придатними для розрахунку прогинів дерев'яних армованих вант.

5) На роботу жорстких ниток, якими є досліджувані дерев'яні армовані ванти сильно впливають податливість опор та з'єднань елементів дерев'яних вант.

ЛІТЕРАТУРА

1. Krishna, P. (2015). *Cable-suspended roofs, second edition*. McGraw-Hill Education LLC.
2. Chen, Wai-Fah / Duan, Lian (1999): *Bridge Engineering Handbook*. CRC Press, Boca Raton (USA).
3. Hofverberg, S. (2016). *Long-span tensile timber roof structures* (Master's thesis, Chalmers University of Technology, Division of Structural Engineering).
4. Кравз А.Р. Методика експериментальних досліджень дерев'яних вант армованих сталевим канатом зі з'єднанням окремих дерев'яних елементів металозубчатыми пластинами / А.Р. Кравз // Перспективні напрями інноваційного розвитку будівництва і підготовки інженерних кадрів: Збірник наукових статей XIX Міжнародного науково-методического семінара; Брест, 23-25 жовтня 2014 року. - Брест: БрГТУ, 2014. - Ч.1. - С.100-106.
5. Кравз А.Р. Методика експериментальних досліджень дерев'яних вант армованих сталевим канатом зі з'єднанням окремих дерев'яних елементів вклеєними стержнями [Текст] / А.Р. Кравз, Б.Г. Демчина // Збірник наукових праць НУК №2 2013.– С. 38-42.
6. Кравз А.Р. Експериментальне дослідження дерев'яних вант армованих сталевим

канатом зі з'єднанням на вклеєних стержнях [Текст] / А.Р. Кравз, Б.Г. Демчина // Науково-технічні проблеми сучасного залізобетону. Впуск 78. Книга 2. К. ДП НДІБК 2013.– С. 235-242.

7. Демчина Б.Г. Дослідження на розтяг з'єднань дерев'яних елементів на металозубчастих пластинах (МЗП). с. 34-40 [Текст] / Демчина Б.Г., Кравз А.Р., Шидловський Я. Яремко І. // Вісник Львівського національного аграрного університету. Серія : Архітектура і сільськогосподарське будівництво. - 2014. - № 15.
8. Качурин В. К. Теория висячих систем / В. К. Качурин – М. : Госстройиздат, 1962. - 224 с.
9. Писаренко Г.С. та ін. Опір матеріалів: Підручник / Г.С. Писаренко, О.Л. Квітка, Е.С. Уманський; За ред. Г.С. Писаренка. – 2-ге вид., допов. І переробл. – К.: Вища шк., 2004. – 655 с.:іл.
10. Ведеников Г. С. Нелинейный метод расчета изгибно-жестких вант / Г. С. Ведеников, А. Л. Телоян. // Строительная механика и расчет сооружений. – 1977. - №6 – С. 47–50.

REFERENCES

1. Krishna, P. (2015). *Cable-suspended roofs, second edition*. McGraw-Hill Education LLC.
2. Chen, Wai-Fah / Duan, Lian (1999): *Bridge Engineering Handbook*. CRC Press, Boca Raton (USA).
3. Hofverberg, S. (2016). *Long-span tensile timber roof structures* (Master's thesis, Chalmers University of Technology, Division of Structural Engineering).
4. Kravz A.R. (2014). *Metodyka eksperymental'nykh doslidzhen' derev'yanykh vant armovanykh stalevym kanatom zi z'yednannyam okremykh derev'yanykh elementiv metalorozdrukiv plastykamy* [Methods of experimental research of wooden stress ribbon structures reinforced with steel rope with the connection of individual wooden elements with punched metal plate]. *Perspektivnyye napravleniya innovatsionnogo razvitiya stroitel'stva i podgotovki inzhenernykh kadrov: Sbornik nauchnykh statey XIX Mezhdunarodnogo nauchno-metodicheskogo seminaru; Brest 23-25.10.2014. - Brest: BrSTU, 2014. - Part 1. 100-106. (in Ukrainian).*
5. Kravz A.R., Demchyna B.G. (2013).

Metodyka eksperymental'nykh doslidzhen' derev'yanykh vant armovanykh stal'nym kanatom zi z'yednannyam okremykh derev'yanykh elementiv vkleyenymy sterzhnyamy [Methods of experimental research of wooden stress ribbon structures reinforced with steel rope with the connection of individual wooden elements with glued rods]. *Zbirnyk naukovykh prats' NUK 2*, 38-42 (in Ukrainian).

6. Kravz A.R., Demchyna B.G. (2013). *Ekspyrymental'ne doslidzhennya derev'yanykh vant armovanykh stal'nym kanatom zi z'yednannyam na vkleyeniykh sterzhnyakh* [Experimental research of wooden stress ribbon structures reinforced with steel rope with connection on glued rods]. *Naukovo-tekhnichni problemy suchasnoho zalizobetonu. Vpusk 78. Knyha 2. K. DP NDIBK*, 235-242 (in Ukrainian).
7. Demchyna B.G., Kravz A.R., Shidlovsky J., Yaremko I. (2014). *Doslidzhennya na roztyah z'yednan' derev'yanykh elementiv na metalozubchastykh plastynakh (MZP)* [Tensile tests of joints of wooden elements on punched metal plate]. *Visnyk L'vivs'koho natsional'noho ahrarnoho universytetu. Seriya : Arkhitektura i sil's'kohospodars'ke budivnytstvo. - 15. 34-40 (in Ukrainian).*
8. Kachurin V.K. (1962). *Teoryya vysyachykh system* [Theory of hanging systems]. Moskva: Strojizdat, 224 (in Russian).
9. Pysarenko H.S., Kvitka O.L., Umans'kyi E.S. (2004) *Opir materialiv: Pidruchnyk* [Resistance of materials: Textbook]. Kyiv: Vyscha shkola, 655 (in Ukrainian).
10. Vedenikov G.S., Teloyan A. L. (1977). *Nelineyny metod rascheta izgibno-zhestkikh vant* [Nonlinear method for calculating bending-rigid cables]. *Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzheniy. 6*, 47–50 (in Russian).

Approaches to taking into account horizontal movements of foundations in the work of wooden reinforced cables

Bohdan Demchyna,
Andriy Kravz

Summary. The behavior of a wooden stress ribbon structures reinforced with steel rope under the action of a load evenly distributed along the entire length of the cable was investigated. The analysis of the results of static tests of the wooden

reinforced cable of the VD-3.1 series is given. A criterion is proposed according to which a wooden stress ribbon structures reinforced with steel rope can be considered according to the theory of rigid threads.

To ensure the stability and geometric invariance of the structures formed by rigid threads, an important role is played by taking into account the pliability of the supports that perceive the horizontal support reactions (spacing of the cable). Deformation of the supports of rigid cables causes the appearance of significant bending moments in the body of the cable, and also leads to an increase in the deflection of the structure. Therefore, special attention was paid to the study of the pliability of supports during the tests of wooden stress ribbon structures reinforced with steel rope to the action of a load evenly distributed along the length of the cable.

The pliability of supports during experimental tests of wooden stress ribbon structures reinforced with steel rope was investigated. The obtained results are compared with the calculated value of the pliability of the supports, calculated based on the deformability of the installation for testing cable structures.

The methods of calculating the deflections of the cables, which take into account the pliability of the supports, were tested. The influence of the

pliability of the supports on the deflection of the cable is determined.

At the level of the pliability of the supports, the deformability of the cable was influenced by the pliability of the nodal joints of the wooden elements of the cable. Based on this, the deformability of the joints of the wooden elements of the cable on the punched metal plate fasteners and its effect on the deflection of the cable were investigated. The coefficient of deformability of joints was suggested, which took into account the nonlinear dependence of the deformation of joints of wooden elements of the cable on the applied load.

Due to the need to take into account the joint work of the wooden body of the cable and the steel rope, the calculated characteristics of the reduced cross section of the wooden cable reinforced with steel rope were calculated.

A static calculation of a wooden stress ribbon structures reinforced with steel rope according to the theory of rigid threads is performed and the results of calculations are compared with experimental data.

Keywords: Suspension roof, wooden structures, rigid threads, stress ribbon, pliability of supports, static calculation, load, punched metal plate fasteners, connection of wooden elements.