

DOI: 10.31319/2519-2884.40.2022.5

УДК 622.673

**І.В. Бельмас**, д.т.н., професор, belmas09@meta.ua

**О.І. Білоус**, к.т.н., доцент, bilouselena66@gmail.com

**Г.І. Танцура**, к.т.н., доцент, hannaivan71@gmail.com

**А.В. Швачка**, аспірант, a.shvachka@ukr.net

**О.В. Сай**, аспірант, alexcdsay@gmail.com

**Ю.Ю. Гупало**, аспірант, uliana.gupalo@gmail.com

Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське

## ПОРИВ ТРОСА ВАНТОВОГО КАНАТУ

*Побудова алгоритму визначення впливу поривів окремих тросів вантового гумотросового канату на його напружений стан. Розробка та розв'язання моделі напружено-деформованого стану вантового гумотросового канату з урахуванням впливу розривів тросової основи. Врахування геометричних параметрів каната, механічні характеристики матеріалу еластичної оболонки та її форми. Оцінка впливу вказаних параметрів на працездатність головного гумотросового вантового каната. Характер та механізм впливу поривів суцільності троса вантового гумотросового канату на його напружено-деформований стан. Алгоритм дозволяє враховувати вплив поривів тросів на напружений стан гумотросового вантового канату довільної конструкції. Його застосування дозволить обґрунтовано визначити мінімальні запаси міцності за умови безпечного використання гумотросового канату у разі розриву окремих тросів.*

**Ключові слова:** вантовий канат; змінний поперечний переріз; сили навантаження; переміщення тросів, гумотросові тягові органи.

*Construction of an algorithm for determining the influence of pulses of individual cables of a cable rubber cable on its stress state. Development and solution of the model of stress-strain state of the cable rubber rope taking into account the impact of breaks in the cable base. Taking into account the geometric parameters of the rope, the mechanical characteristics of the elastic shell material and its shape. Assessment of the impact of these parameters on the performance of the main humorous rope. The nature and mechanism of the influence of the pulse continuity pulses of the cable rope on its stress-strain state. The algorithm allows to take into account the influence of cable breaks on the stress state of the humorous rope of any design. Its application will allow to reasonably determine the minimum margins of strength under the condition of safe use of the rubber cable in case of rupture of individual cables.*

**Keywords:** cable-stayed rope; winter transverse overriding; power supply; relocation of cables, gumotrosovo traction organ.

### Постановка проблеми

Одним з напрямів розвитку сучасного будівництва, зокрема вантових мостів, є зменшення вартості споруди та термінів спорудження. Застосовуються і менш помітні технічні рішення, такі як сталеві-залізобетонні конструкції. Останні, за значних розмірів у плані, мають зменшену масу [1]. У таких конструкціях залізобетонні плити з'єднані вантами. Однією з проблем впровадження таких конструкцій є забезпечення їх надійності протягом всього терміну експлуатації споруди.

Вантовий гумотросовий канат складається з паралельних тросів, розташованих в паралельних шарах та з'єднаних в єдиний виріб еластичною оболонкою, яка захищає троси канату від агресивного впливу довкілля. Троси, як елементи системи з паралельним з'єднанням елементів та не повним резервуванням, суттєво збільшують надійність системи вантового канату.

Чинником, що впливає на надійність канату, є розрив суцільності одного з тросів канату. Зменшення надійності канату в разі розриву троса має бути враховане в процесі проекту-

вання канату за умовою забезпечення заданого рівня неповного резервування. Розрив троса змінює напружено-деформований стан (НДС) канату, внаслідок чого зростають внутрішні сили навантаження тросів. Методика визначення напруженого стану канату з комплексним урахуванням його механічних характеристик, конструкції, пориву довільного тросу відсутня. Розробка методики визначення напружено-деформованого стану вантового багатотросового канату дозволить розв'язати актуальну науково-технічну задачу підвищення безпеки експлуатації капітальних споруд, що містять ванти.

#### Аналіз останніх досліджень та публікацій

Гумотросовий вантовий канат є композитним за своєю побудовою. Вплив розривів елементів армування композитних плоских гумотросових канатів (стрічок) розглянуто декількома дослідниками [2—7]. Питанню відновлення тягової спроможності гумотросових органів з ушкодженими ділянками присвячено роботи [8, 9]. У роботі [10] досліджено напружений стан з'єднаних кінців конвеєрних стрічок. Проте виконані дослідження не дозволяють визначати зміну напружено-деформованого стану багатотросового (вантового) канату, викликаний розривом троса.

Не завжди через розрив тросів може втрачатися тягова спроможність каната. В окремих випадках терміновий підйом може бути здійснений канатом з ушкодженими тросами. Можливість такого підйому має бути з'ясована. Доведення має врахувати різноманітні чинники, що впливають на напружений стан каната. У виконаних раніше дослідженнях до основних чинників, що пов'язані з розподілом напружень в плоскому гумотросовому канаті, віднесено технічний стан підйомної машини, характер взаємодії плоского тягового органа, його конструкція та наявність розривів тросів. Слід зауважити, що розриви тросів викликають зміну конструкції канату, в перерізі їхнього ушкодження зменшується кількість тросів.

Розриви тросів у канатах та вплив розподілу сил різних умов розглядалося в багатьох роботах [11—13]. Але дослідниками не піднімалося питання впливу пошкоджень тягових елементів та конструктивних параметрів підйомно-транспортної машини. Для визначення рівня втрати спроможності каната, зумовленого розривами суцільності тросів, математичні залежності відсутні.

Виходячи з викладеного, актуальною є розробка методу аналітичного визначення напружено-деформованого стану (НДС) гумотросового канату, який дозволить оцінювати втрати тягової спроможності даного елемента з урахуванням його конструктивних особливостей.

#### Формулювання мети дослідження

Канат, з умов експлуатації, складено з довільної парної кількості тросів, які з метою мінімізації маси канату, укладені регулярно, з технічно обумовленими кроком. Розподіл навантажень між тросами залежить від конструкції канату та властивостей еластичної оболонки, характеру навантаження.

На підставі особливостей конструкції вантового канату, умов його експлуатації приймемо ряд спрощень. Вантовий канат навантажено лише силами розтягу. Жорсткість тросів на розтяг перевищує жорсткість еластичної оболонки, розташованої поміж тросами. Приймемо, що еластична оболонка поміж тросами передає лише напруження зсуву. Троси канату навантажені силами в межах лінійного їх деформування. Задачу розподілу сил поміж тросами будемо розв'язувати як лінійну.

#### Виклад основного матеріалу

Кількість шарів тросів у канаті позначимо  $N$ . Кількість тросів в шарах  $M$ . Місце розташування тросів визначатимемо їх номерами  $j$  ( $1 \leq j \leq N$ ) та  $i$  ( $1 \leq i \leq M$ ). Віднесемо канат до осі  $x$  йому паралельній.

Сформулюємо умову рівноваги вирізаного з канату троса малої довжини  $dx$ .

$$dP_{i,j} + (\tau_{1,i,j-1} - \tau_{1,i,j} + \tau_{2,i-1,j} - \tau_{2,i,j}) b dx = 0, \quad (1)$$

де  $\tau$  — усереднені значення напруження зсуву в матеріалі еластичної оболонки, розташованої поміж тросами;  $b$  — крок розташування шарів тросів та тросів в шарах.

Дотичне напруження за законом Гука

$$\tau_{1,i,j} = \frac{GkG}{b-a} (u_{i,j} - u_{i,j-1}); \quad (2)$$

$$\tau_{2,i,j} = \frac{Gk_G}{b-d} (u_{i,j} - u_{i-1,j}). \quad (3)$$

де  $G$  — модуль зсуву матеріалу еластичної оболонки вантового канату;  $k_G$  — коефіцієнт що враховує вплив форми еластичної оболонки, розташованої поміж тросами на її жорсткість на зсув;  $d$  — діаметр тросів канату.

Підставимо (2), (3) до (1). Отримаємо

$$\frac{dP_{i,j}}{dx} + \frac{Gk_G}{h} b (u_{i,j-1} - 4u_{i,j} + u_{i,j+1} + u_{i-1,j} + u_{i+1,j}) = 0. \quad (4)$$

Закон Гука для поздовжнього деформування троса

$$P_{i,j} = EF \frac{du_{i,j}}{dx}, \quad (5)$$

де  $E, F$  — модуль пружності та площа поперечного перерізу троса.

Врахуємо (5). Запишемо (4) в наступній формі

$$\frac{d^2 u_{i,j}}{dx^2} + \frac{Gbk_G}{EF(b-d)} (u_{i,j-1} - 4u_{i,j} + u_{i,j+1} + u_{i-1,j} + u_{i+1,j}) = 0. \quad (6)$$

Систему однорідних рівнянь складено для довільного троса. Умова рівноваги крайніх тросів відмінна:

$$\frac{d^2 u_{1,j}}{dx^2} + \frac{Gbk_G}{EF(b-d)} (u_{1,j-1} - 3u_{1,j} + u_{1,j+1} + u_{2,j}) = 0; \quad (7)$$

$$\frac{d^2 u_{M,j}}{dx^2} + \frac{Gbk_G}{EF(b-d)} (u_{M,j-1} - 3u_{M,j} + u_{M,j+1} + u_{M-1,j}) = 0; \quad (8)$$

$$\frac{d^2 u_{i,1}}{dx^2} + \frac{Gbk_G}{EF(b-d)} (-3u_{i,1} + u_{i,2} + u_{i-1,1} + u_{i+1,1}) = 0; \quad (9)$$

$$\frac{d^2 u_{i,N}}{dx^2} + \frac{Gbk_G}{EF(b-d)} (u_{i,N-1} - 3u_{i,N} + u_{i-1,N} + u_{i+1,N}) = 0. \quad (10)$$

Вирази (6) — (10) становлять  $N \cdot M$  однорідних систем рівнянь. Їх розв'язок, відносно перемішень будемо шукати у формі добутків функцій, залежних від місця розташування тросів в перерізі канату та функцій координати  $x$ .

$$u_{i,j} = e^{\beta x + \gamma - \mu(i + \nu - 1) \chi_j}. \quad (11)$$

Значення характеристичних показників з уявним множником приймемо з умови задовільнення систем однорідних рівнянь (7) — (10).

$$\mu_m = \frac{\pi m}{M}, \chi_n = \frac{\pi n}{N}. \quad (12)$$

Підставимо значення прийнятих складових характеристичних показників у (6). Визначимо інші характеристичні показники:

$$\beta_{m,n} = \pm \sqrt{2 \frac{Gb}{hEF} (2 - \cos(\mu_m) - \cos(\chi_n))}; \beta_{m,m} = \pm \sqrt{2 \frac{Gb}{hEF} (1 - \cos(\mu_m))};$$

$$\beta_{n,n} = \pm \sqrt{2 \frac{Gb}{hEF} (1 - \cos(\chi_n))}; (1 \leq m \leq M), (1 \leq n \leq N). \quad (13)$$

Шукані переміщення тросів

$$u_{i,j} = \left( \begin{aligned} & \sum_{m=1}^{M-1} \sum_{n=1}^{N-1} (A_{m,n} e^{\beta_{m,n} x} + B_{m,n} e^{-\beta_{m,n} x}) \beta_{m,n} \times \\ & \times \cos(\mu_m (i - 0,5)) \cos(\chi_n (j - 0,5)) + \\ & + \sum_{m=1}^{M-1} (A_{m,m} e^{\beta_{m,m} x} + B_{m,m} e^{-\beta_{m,m} x}) \beta_{m,m} \cos(\mu_m (i - 0,5)) + \\ & + \sum_{n=1}^{N-1} (A_{n,n} e^{\beta_{n,n} x} + B_{n,n} e^{-\beta_{n,n} x}) \beta_{n,n} \cos(\chi_n (j - 0,5)) \end{aligned} \right) + \frac{Fx}{EF} + \delta, \quad (14)$$

де  $A_{m,n}, B_{m,n}, A_{m,m}, B_{m,m}, A_{n,n}, B_{n,n}, \delta$  — невідомі сталі величини.

Скористаємося законом Гука (5). Отримаємо вираз для визначення внутрішніх сил навантаження тросів канату

$$p_{i,j} = EF \left( \begin{aligned} & \sum_{m=1}^{M-1} \sum_{n=1}^{N-1} (A_{m,n} e^{\beta_{m,n} x} - B_{m,n} e^{-\beta_{m,n} x}) \beta_{m,n} \times \\ & \times \cos(\mu_m(t-0,5)) \cos(\chi_n(j-0,5)) + \\ & + \sum_{m=1}^{M-1} (A_{m,m} e^{\beta_{m,m} x} - B_{m,m,k} e^{-\beta_{m,m} x}) \beta_{m,m} \times + \\ & \times \cos(\mu_m(t-0,5)) \\ & \sum_{n=1}^{N-1} (A_{n,n} e^{\beta_{n,n} x} - B_{n,n} e^{-\beta_{n,n} x}) \beta_{n,n} \cos(\chi_n(j-0,5)) \end{aligned} \right) + P. \quad (15)$$

Сформульовані закономірності розподілу переміщень та внутрішніх сил навантаження тросів канату (14), (15), за відомих значень невідомих сталих, величини дозволяють визначати НДС вантового гумотросового канату. Значення невідомих сталих мають визначатися з умов стану та навантаження канату.

Розглянемо задачу визначення НДС канату з ушкодженим тросом. Нехай довжина канату  $L$ . Канат кінцями приєднано до споруди. Початок осі координат сумістимо з одним кінцем канату. В перерізі  $x = l$  ушкоджено  $I, J$ -тий трос. Він в перерізі порушує конструкцію канату, в нашому випадку умову нерозривності його тросів. Рішення (14) та (15) побудовані для канату без розривів тросів тому вони не прийнятні для такого випадку. З метою розв'язання поставленої задачі умовно розріжемо канат на дві частини поперечним перерізом розриву троса. В кожній частині троси суцільні. Для них прийнятні рішення (14), (15). Частинам надамо номери один та два. Номери запишемо в індекси величин, що до них відносяться. В перерізах ( $x = 0$ ) та ( $x = L$ ) канат жорстко приєднаний до споруди.

$$\begin{aligned} A_{1,m,n} &= -B_{1,m,n}; A_{m1,m} = -B_{m1,m}; A_{n1,n} = -B_{n1,n}; \\ A_{2,m,n} &= -B_{2,m,n} e^{-2\beta_{m,n} L}; A_{m2,m} = -B_{m2,m} e^{-2\beta_{m,m} L}; A_{n2,n} = -B_{n2,n} e^{-2\beta_{n,n} L}. \end{aligned} \quad (16)$$

Внутрішні сили навантаження тросів та їх переміщення набудуть наступних виглядів:

$$p_{1,i,j} = EF \left( \begin{aligned} & \sum_{m=1}^{M-1} \sum_{n=1}^{N-1} B_{1,m,n} (e^{\beta_{m,n} x} + e^{-\beta_{m,n} x}) \beta_{m,n} \times \\ & \times \cos(\mu_m(t-0,5)) \cos(\chi_n(j-0,5)) + \\ & + \sum_{m=1}^{M-1} B_{m1,\eta,m,k} (e^{\beta_{m,m} x} + e^{-\beta_{m,m} x}) \beta_{m,m} \cos(\mu_m(t-0,5)) + \\ & \sum_{n=1}^{N-1} B_{n1,\eta,n,k} (e^{\beta_{n,n} x} + e^{-\beta_{n,n} x}) \beta_{n,n} \cos(\chi_n(j-0,5)) \end{aligned} \right) + P; \quad (17)$$

$$\begin{aligned} u_{1,i,j} &= \sum_{m=1}^{M-1} \sum_{n=1}^{N-1} B_{1,m,n} (e^{\beta_{m,n} x} - e^{-\beta_{m,n} x}) \times \\ & \times \cos(\mu_m(t-0,5)) \cos(\chi_n(j-0,5)) + \\ & \sum_{m=1}^{M-1} B_{m1,m,k} (e^{\beta_{m,m} x} - e^{-\beta_{m,m} x}) \cos(\mu_m(t-0,5)) + \\ & \sum_{n=1}^{N-1} B_{n1,n,k} (e^{\beta_{n,n} x} - e^{-\beta_{n,n} x}) \cos(\chi_n(j-0,5)) + \frac{P}{E} x + \delta_1; \end{aligned} \quad (18)$$

$$p_{2,i,j} = -EF \left( \begin{aligned} & \sum_{m=1}^{M-1} \sum_{n=1}^{N-1} B_{2,m,n} (e^{-\beta_{m,n} x} + e^{\beta_{m,n}(x-2L)}) \beta_{m,n} \times \\ & \times \cos(\mu_m(t-0,5)) \cos(\chi_n(j-0,5)) + \\ & + \sum_{m=1}^{M-1} B_{m2,m,k} (e^{-\beta_{m,m} x} + e^{\beta_{m,m}(x-2L)}) \beta_{m,m} \cos(\mu_m(t-0,5)) + \\ & \sum_{n=1}^{N-1} B_{n2,n,k} (e^{-\beta_{n,n} x} + e^{\beta_{n,n}(x-2L)}) \beta_{n,n} \cos(\chi_n(j-0,5)) \end{aligned} \right) + P; \quad (19)$$

$$\begin{aligned}
 u_{2,i,j} = & \sum_{m=1}^{M-1} \sum_{n=1}^{N-1} B_{2,m,n} (e^{-\beta_{m,n}x} - e^{\beta_{m,n}(x-2L)}) \times \\
 & \times \cos(\mu_m(i-0,5)) \cos(\chi_n(j-0,5)) + \\
 & + \sum_{m=1}^{M-1} Bm_{2,m,k} (e^{-\beta_{m,k}x} - e^{\beta_{m,k}(x-2L)}) \cos(\mu_m(i-0,5)) + \\
 & \sum_{n=1}^{N-1} Bn_{2,m,k} (e^{-\beta_{n,k}x} - e^{\beta_{n,k}(x-2L)}) \cos(\chi_n(j-0,5)) + \frac{P}{E} x + \delta_2.
 \end{aligned} \tag{20}$$

Врахуємо сумісність деформування частин у перерізі  $x = l$ . Введемо умову рівності сил навантаження тросів.

$$P_{1,i,j} = P_{2,i,j}. \tag{21}$$

З умови (21) знайдемо співвідношення невідомих сталих величин:

$$\begin{aligned}
 B_{1,m,n,k} &= B_{2,m,n,k} \frac{e^{-\beta_{m,n,k}l} + e^{\beta_{m,n,k}(l-2L)}}{e^{-\beta_{m,n,k}l} + e^{\beta_{m,n,k}l}}; \\
 Bm_{1,m,k} &= Bm_{2,m,k} \frac{e^{-\beta_{m,k}l} + e^{\beta_{m,k}(l-2L)}}{e^{-\beta_{m,k}l} + e^{\beta_{m,k}l}}; \\
 Bn_{1,m,k} &= Bn_{2,m,k} \frac{e^{-\beta_{n,k}l} + e^{\beta_{n,k}(l-2L)}}{e^{-\beta_{n,k}l} + e^{\beta_{n,k}l}}.
 \end{aligned} \tag{22}$$

Переміщення з урахуванням співвідношень (22):

$$\begin{aligned}
 u_{1,i,j} = & \sum_{m=1}^{M-1} \sum_{n=1}^{N-1} B_{2,m,n} \frac{e^{-\beta_{m,n}l} + e^{\beta_{m,n}(l-2L)}}{e^{-\beta_{m,n}l} + e^{\beta_{m,n}l}} (e^{\beta_{m,n}x} - e^{-\beta_{m,n}x}) \times \\
 & \times \cos(\mu_m(i-0,5)) \cos(\chi_n(j-0,5)) + \\
 & + \sum_{m=1}^{M-1} Bm_{2,m} \frac{e^{-\beta_{m,k}l} + e^{\beta_{m,k}(l-2L)}}{e^{-\beta_{m,k}l} + e^{\beta_{m,k}l}} (e^{\beta_{m,k}x} - e^{-\beta_{m,k}x}) \times \\
 & \times \cos(\mu_m(i-0,5)) + \\
 & \sum_{n=1}^{N-1} Bn_{2,m} \frac{e^{-\beta_{n,k}l} + e^{\beta_{n,k}(l-2L)}}{e^{-\beta_{n,k}l} + e^{\beta_{n,k}l}} (e^{\beta_{n,k}x} - e^{-\beta_{n,k}x}) \times \\
 & \times \cos(\chi_n(j-0,5)) + \frac{P}{E} l + \delta_1;
 \end{aligned} \tag{23}$$

$$u_{2,i,j} = \sum_{k=0}^K C_k \cos(\alpha_k t) \left[ \sum_{m=1}^{M-1} \sum_{n=1}^{N-1} B_{2,m,n,k} (e^{\beta_{m,n,k}x} - e^{-\beta_{m,n,k}x}) \times \right. \\
 \left. \times \cos(\mu_m(i-0,5)) \cos(\chi_n(j-0,5)) + \sum_{m=1}^{M-1} Bm_{2,m,k} (e^{\beta_{m,k}x} - e^{-\beta_{m,k}x}) \cos(\mu_m(i-0,5)) + \right. \\
 \left. \sum_{n=1}^{N-1} Bn_{2,m,k} (e^{\beta_{n,k}x} - e^{-\beta_{n,k}x}) \cos(\chi_n(j-0,5)) + \frac{P+b}{EF} c + \frac{\rho}{F} l + \delta_2. \right] \tag{24}$$

Внаслідок розриву троса поміж його кінцями утворюється зазор невідомої величини  $U_0$ . Сформулюємо умову різниці переміщень тросів у перерізі  $x = l$  з урахуванням утворення зазору поміж кінцями ушкодженого троса.

$$u_{1,i,j} - u_{2,i,j} = U_0 \sum_{k=0}^K C_k \cos(\alpha_k t) \begin{cases} 1 & i = I \wedge j = J \\ 0 & i \neq I \vee j \neq J \end{cases} \tag{25}$$

Різницю переміщень у виразі (25) розкладемо в ряд Фур'є. Визначимо значення сталих за невідомого зазору поміж кінцями ушкодженого троса

$$B_{2,m,n} = U_0 \frac{4e^{\beta_{m,n}l} \cos(\mu_m(l-0,5)) \cos(\chi_n(j-0,5))}{MN \left( -\frac{1+e^{2\beta_{m,n}(l-L)}}{\operatorname{th}(\beta_{m,n}l)} + e^{2\beta_{m,n}(l-L)} - 1 \right)}; \tag{26}$$

$$Bm_{2,m} = U_0 \frac{2\cos(\mu_m(I-0,5))}{MN \left( \frac{1+e^{2\beta m_m(I-L)}}{\operatorname{ch}(\beta m_m I)} + e^{2\beta m_m(I-L)} - 1 \right)}; \quad (27)$$

$$Bn_{2,n} = U_0 \frac{2\cos(\mu_n(I-0,5))}{MN \left( \frac{1+e^{2\beta n_n(I-L)}}{\operatorname{ch}(\beta n_n I)} + e^{2\beta n_n(I-L)} - 1 \right)}; \quad (28)$$

$$\delta_2 = \delta_1 - \frac{U_0}{MN}. \quad (29)$$

Перша частин канату, за прийнятих умов, зафіксована. Тому  $\delta_1 = 0$ . Кінці ушкодженого троса в перерізі  $x = l$  не навантажені. З цієї умови, з урахуванням знайдених невідомих сталих та їх відношення, величина зазору в перерізі розриву троса.

$$U_0(t) = \frac{PMN}{2EF} \left( \begin{aligned} & 2 \sum_{m=1}^{M-1} \sum_{n=1}^{N-1} \frac{\cos^2(\mu_m(I-0,5)) \times \cos^2(\mu_n(I-0,5)) \beta m_n}{e^{-\beta m_n l} e^{\beta m_n(I-L)} e^{\beta m_n l} - e^{-\beta m_n l} + e^{-\beta m_n l} e^{\beta m_n(I-L)} e^{\beta m_n l} - e^{-\beta m_n l}} \\ & + \sum_{m=1}^{M-1} \frac{\cos^2(\mu_m(I-0,5)) \beta m_m}{e^{-\beta m_m l} e^{\beta m_m(I-L)} e^{\beta m_m l} - e^{-\beta m_m l} + e^{-\beta m_m l} e^{\beta m_m(I-L)} e^{\beta m_m l} - e^{-\beta m_m l}} \\ & + \sum_{n=1}^{N-1} \frac{\cos^2(\mu_n(I-0,5)) \beta n_n}{e^{-\beta n_n l} e^{\beta n_n(I-L)} e^{\beta n_n l} - e^{-\beta n_n l} + e^{-\beta n_n l} e^{\beta n_n(I-L)} e^{\beta n_n l} - e^{-\beta n_n l}} \end{aligned} \right) \quad (30)$$

Знайдені величини дозволяють визначити НДС вантового канату з довільним ушкодженням троса. Послідовність їх застосування становить шуканий алгоритм розрахунку НДС канату з ушкодженим тросом.

Розглянемо вантовий канат на основі тросів діаметром 8,25 мм. Довжина канату 5 м. Крок укладення тросів  $b = 1,2 d$ . Троси розташовані в чотири ряди по п'ять тросів. Модуль зсуву матеріалу еластичної оболонки  $G = 5$  МПа. Модуль пружності тросів  $10^5$  МПа. Коефіцієнт форми матеріалу еластичної оболонки  $k_G = 1$ . Ушкоджено кутовий трос у перерізі  $x = 1$  м. Середнє навантаження на трос канату 5 кПа. Наведемо результати розрахунку на рис. 1.

Згідно рисунку, різниця переміщень кінців тросів (зазор між кінцями троса) в перерізі розриву сягає 2 мм. Переміщення кінця тросу другої частини перевищує відповідний показник для першого, що є наслідком більшої відстані перерізу пориву від точки закріплення другої частини канату. Основним чинником впливу пориву на надійність канату є відхилення навантаження окремих тросів від середнього (рис. 2).

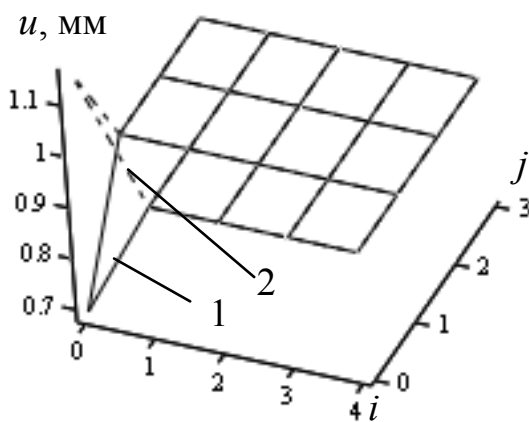


Рис. 1. Переміщення тросів з номерами  $i$ , в шарах  $j$  в перерізі  $x = l$ : 1 — перша частина; 2 — друга частина

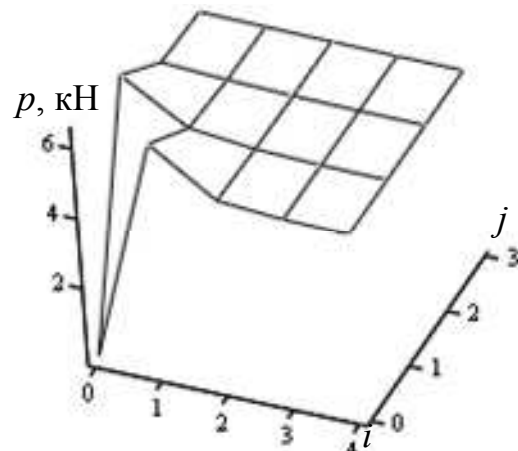


Рис. 2. Розподіли внутрішніх сил поміж тросів з номерами  $i$ , в шарах  $j$  в перерізі  $x = l$

Відповідно до отриманого розподілу внутрішніх сил, порив тросу призводить до зростання внутрішніх сил розтягу лише тросів суміжних з ушкодженим. Їх значення, внаслідок пориву зросло на 29 %, що має бути враховано при визначенні рівня резервування тросів як складової системи — вантовий канат. Загалом характер збуреного поривом троса напружено деформованого стану канату. Локалізується він і за довжиною, і за шириною, і за товщиною. Взаємодія тросів відбувається за рахунок дотичних напружень, що виникають в еластичній оболонці у разі взаємного зсуву суміжних тросів.

#### Висновки

1. На підставі проведених досліджень отримані аналітичні вирази, які дозволяють визначати внутрішні сили навантаження тросів каната, максимальні значення коефіцієнтів концентрації напружень у тросах каната, що знаходиться під впливом зовнішніх чинників.

2. Встановлено, що розрив троса призводить до зростання навантажень суміжних тросів. Розроблений алгоритм дозволяє визначати показники напружено-деформованого стану канату з ушкодженим тросом та прогнозувати спроможність останнього до подальшої експлуатації.

#### Список використаної літератури

1. Стороженко Л.І. Нові сталезалізобетонні структурно-вантові конструкції /Л.І. Стороженко, Г.М. Гасій, С.А. Гапченко // *Збірник наукових праць. Сер.: Галузеве машинобудування, будівництво*. Полтава: ПолтНТУ, 2014. Вип. 1. С. 91–96.
2. І.В.Бельмас, Д.Л.Колосов, Т.О.Чечель, О.М.Воробйова, О.М.Черниш. Вплив зміни в часі механічних властивостей гуми на напружений стан гумотросового тягового органа з ушкодженим тросом. *Збірник наукових праць національного гірничого університету* 2020 №61. С. 149–155.
3. Belmas I., Kolosov D., Kolosov O. , Onvshchenko S. Stress-strain state of a conveyor belt with cables of different rigidity and their breakages (Напружено-деформований стан конвеєрної стрічки з тросами різної жорсткості та з ушкодженнями). *Fundamental and applied researches in practice of leading scientific schools*. Vol. 26, №2, 2018. p. 231–236.
4. Ропай В.А. Шахтные уравновешивающие канаты: монография /Днепропетровск: Национальный горный университет, 2016. 263 с.
5. Belmas I., Kolosov D. The stress-strain state of the stepped rubber-rope cable in bobbin of winding. *Technical and Geoinformationel Sitems in Mining*. Taylor & Francis Group, London, UK 2011. С. 211–214.
6. Волоховский В.Ю., Радин В.П., Рудяк М.Б. Концентрация усилий в тросах и несущая способность резинотросовых конвейерных лент с повреждениями. *Вестник МЭИ* №5, 2010, С. 5–12.
7. Бельмас И.В. Напряженное состояние резинотросовой ленты при произвольном повреждении тросов. *Проблемы прочности и надежности машин*. 1993, №6. С. 45–48.
8. Колосов Д.Л., Білоус О.І., Гуров. І.А. Міцність відновленої гумотросової стрічки. Математичні проблеми технічної механіки та прикладної математики. Міжнародна наукова конференція. Матеріали конференції. Дніпро, Кам'янське. 2019. С. 126–127.
9. Belmas I., Kolosov D. , Onyshchenk S., Bobylova I. Partial restoration of tractive ability of rubber-cable tractive element with damaged cable base (Часткове відновлення тягової здатності гумотросового тягового елемента з пошкодженою тросовою основою). *Збірник наукових праць національного гірничого університету*. 2020. №60. С. 196–206.
10. Танцура Г.І. Гнучкі тягові органи. Стикові з'єднання конвеєрних стрічок. – Дніпродзержинськ: ДДТУ, 2010. 127 с.
11. Бельмас, И.В., Колосов, Д.Л., Танцура, А.И., Конох, Ю.В. (2009). Исследование влияния порыва тросовой основы на прочность каната ступенчатой конструкции. Необратимые процессы в природе и технике: Материалы науч. конф. Москва: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009. №2, 255–257.



12. Kolosov, D., Dolgov, O., Bilous, O., & Kolosov, A. (2015). The stress-strain state of the belt in the operating changes of the burdening conveyor parameters. *Theoretical and Practical Solutions of Mineral Resources Mining*, P. 585–590.
13. Коханенко, Ю.В., Ясінський, В.В., & Царипа, І.М. Дослідження залежності протяжності крайового ефекту в шаруватому композиті з трансверсально-ізотропним наповнювачем від механічних характеристик. *Проблеми прочності*. 2021. №4, P. 127–137.

### **BREAK OF A CABLE OF A CABLE ROPE**

**Belmas I., Bilous O., Tantsura G., Shvachka A., Say O.**

#### **Abstract**

Establishing the influence of changes in time properties of rubber on the stress state of the rubber-traction body with a damaged cable. The method of research consists in the analytical solution of the model of the humorous traction body taking into account the rupture of the continuity of the cable and the change in the properties of the rubber. The dependences of the change of the stress state of the traction body of the humotross with the broken structure due to the rheology of the rubber shell are established. An algorithm for determining the stress state of a rubber traction body in case of a broken one is formulated. Structure and manifestations of rubber shell rheology. It is shown that the loads on the cables caused by the discontinuity of one of them lead to a local redistribution of forces almost only between two cables - damaged and adjacent; in case of damage non-extreme cable forces change almost only in three cables - damaged and two related to it. At the same time there are no extreme values of internal efforts of loading of cables depend on the change in the shear modulus of the rubber material over time. Significant rubber shifts were detected occur between the damaged rope and adjacent to the length of the rope; shear angles the rubber between other cables is much smaller relative to the displacements in the local redistribution zone forces and stresses and change slightly due to the aging of the rubber over time. The mechanism of influence of changes of properties of rubber on pressure is established the condition of the traction body, taking into account the rupture of the continuity of the cable and changes in the properties of the rubber. Taking into account the dependence of the stress-strain state of the rope with local violations of the cable base from changes in the mechanical properties of rubber provides the ability to predict the stress state of the rope to improve safety and reliability the use of rubber traction bodies that have a significant service life. Further research should focus on the development of a method of continuous automatic control of rope damage in the rope.

#### **References**

- [1] Storozhenko, L.I., & Gasiy, G.M., & Gapchenko S.A. (2014). Novi stalezalizobetonni struktur-no-vantovi konstruktsii [New steel-cast-concrete structural and cable-stayed structures]. *Zbirnyk naukovykh prats* Collection of scientific works. Ser.: Galuzeve machine-building, life. Poltava: PoltNTU, Issue 1, P. 91–96 [in Ukrainian].
- [2] Belmas, I.V., & Kolosov, D.L., & Chechel, T.O., & Vorobyova, O.M., & Chernish, O.M. (2020). Vpliv zmini v chasi mekhanichnih vlastivostej gumi na napruzhenij stan gumotrosovogo tyagovogo organa z ushkodzhenim trosom. [Injecting changes in the hours of the mechanical power of the gumi on the stresses of the camp of the humic cable traction body with the eyelet cable]. *Zbirnik naukovih prac' nacional'nogo girnichogo universtitetu – Collection of scientific practices of the national hospitality university*, Issue 61, P. 149–155 [in Ukrainian].
- [3] Belmas, I., Kolosov, D., Kolosov, O., Onvshchenko, S. (2018). Napruzhenno-deformovaniy stan konveernoi strichki z trosami riznoi zhorstkosti ta z ushkodzhennyami. [Stress-strain state of a conveyor belt with cables of different rigidity and their breakages] *Fundamental and applied researches in practice of leading scientific schools*, Issue 26, P. 231–236.



- [4] Ropay, V.A. Shahtnye uravnoveshivayushchie kanaty. [Mine balancing ropes]. Dnepropetrovsk: National Mining University, P. 263 [in Ukrainian].
- [5] Belmas, I., Kolosov, D. (2011). The stress-strain state of the stepped rubber-rope cable in bobbin of winding. *Technical and Geoinformation Systems in Mining*. Taylor & Francis Group, London, P.211-214 [in United Kindom].
- [6] Volokhovskiy, V.Yu., Radin, V.P., Rudyak, M.B. (2010). Koncentraciya usilij v trosah i nesushchaya sposobnost' rezinotrosovyh konvejernyh lent s povrezhdeniyami. [The concentration of efforts in the cables and the bearing capacity of rubber-cable conveyor belts with damage]. *Vestnik MPEI - Messenger MPEI*, Issue 5, P. 5–12 [in Russian].
- [7] Belmas, I.V. (1993). Napryazhennoe sostoyanie rezinotrosovoj lenty pri proizvol'nom povrezhdenii trosov [The stressed state of the rubber-cable tape in case of arbitrary damage to the cables]. *Problemy prochnosti i nadezhnosi mashin – Problems of Strength and Reliability of Machines*, Issue 6, P. 45–48 [in Ukrainian].
- [8] Kolosov, D.L., Bilous, O.I., Gurov, I.A. (2019) Mineralization of the reinforced gum line. Mathematical problems of technical mechanics and applied mathematics. International scientific conference. Conference materials. Dnipro, Kam'yansk, [in Ukrainian].
- [9] Belmas, I., Kolosov, D., Onyshchenk, S., Bobylova, I. (2020). Chastkove vidnovlennya tyagovoї zdatnosti gumotrosovogo tyagovogo elementa z poshkodzenoyu trosovoyu osnovoyu. [Partial restoration of tractive ability of rubber-cable tractive element with damaged cable base]. *Zbirnik naukovih prac' nacional'nogo girnichogo universitetu – Collection of scientific practices of the national catering university*, Issue 60, P. 196–200 [in Ukrainian].
- [10] Tantsura, G.I. (2017). Gnuchki tyagovi organi. Stikovi z'ednannya konveernih strichok. [Flexible traction organs. Butt joints of conveyor belts]. Dniprodzerzhynsk: DDTU, P. 127 [in Ukrainian].
- [11] Belmas, I.V., Kolosov, D.L., Tantsura, A.I., Konokh, Yu.V. (2009). Issledovanie vliyaniya poryva trosovoj osnovy na prochnost' kanata stupenchatoj konstrukcii. Neobratimye processy v prirode i tekhnike. [Investigation of the influence of a gust of a cable warp on the strength of a stepped rope. Irreversible processes in nature and technology]. *Materialy nauch. konf. Moskva: MGTU im. N.E. Baumana – Proc. conf. Moscow: MSTU im. N.E. Bauman*, Issue 2, P. 255–257. [in Russian].
- [12] Kolosov, D., Dolgov, O., Bilous, O., Kolosov, A. (2015). The stress-strain state of the belt in the operating changes of the burdening conveyor parameters. *Theoretical and Practical Solutions of Mineral Resources Mining*.
- [13] Kokhanenko, Yu.V., Yasinsky, V.V., Tsaripa, I.M. (2001). Doslidzhennya zalezhnosti protyazhnosti krajovogo efektu v sharuvatomu kompoziti z transversal'no-izotropnim napovnyuvachem vid mekhanichnih harakteristik. [Investigation of the longevity of the marginal effect in a spherical composite with a transversely isotropic resurfacing of mechanical characteristics]. *Problemy prochnosti – Strength Problems*, Issue. 4, P. 127–137. [in Ukrainian].