

DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2022-48-07>

УДК 622.673

Бельмас Іван Васильович, д.т.н., професор

<https://orcid.org/0000-0003-2112-0303>

Білоус Олена Іванівна, к.т.н., доцент

<https://orcid.org/0000-0001-6398-8843>

Танцура Ганна Іванівна, к.т.н., доцент

<https://orcid.org/0000-0002-8672-1153>

Сай Олександр Валерійович, аспірант

<https://orcid.org/0000-0002-5979-8737>

Гупало Юліана Юріївна, аспірант

<https://orcid.org/0000-0001-7906-5402>

Дніпровський державний технічний університет, м. Дніпро, Україна

ВПЛИВ ПОРИВУ ТРОСА НА НАПРУЖЕНИЙ СТАН ГУМОТРОСОВОГО ВАНТОВОГО КАНАТУ

Бельмас І.В., Білоус О.І., Танцура Г.І., Сай О.В., Гупало Ю.Ю. Вплив пориву троса на напружений стан гумотросового вантового канату. Мета. Встановлення характеру впливу сил інерції при деформуванні вантового гумотросового канату з розривом суцільності його довільного троса. Побудова алгоритму визначення показників його напруженого стану. Методика. Побудова, розв'язання методами механіки шаруватих композитних матеріалів моделі напружено-деформованого стану вантового гумотросового канату з урахуванням сил інерції та розриву суцільності довільного троса. Результати. Алгоритм визначення напружено-деформованого стану вантового гумотросового канату довільної конструкції з ушкодженим тросом, з урахуванням інерційних сил. Наукова новизна. Встановлення характеру та механізму впливу сил інерції та розриву суцільності троса вантового гумотросового канату на його напружено-деформований стан. Практична значущість. Алгоритм врахує вплив сил інерції на напружений стан вантового гумотросового канату довільної конструкції з розривом довільного тросу. Його застосування дозволить обґрунтовано визначити мінімальні запаси міцності за умови безпечного гумотросового канату використання включно і в особливих умовах та у разі аварійної ситуації.

Ключові слова: деформування вантового гумотросового канату, розрив довільного тросу, математична модель.

Belmas I., Bilous O., Tantsura H., Sai O., Gupalo J. Impact of rope gust on the stress state of a rubber-rope cable. Objective. Determination of the influence of inertial forces at deformation of a cable-stayed rope-rubber with breaking the continuity of its arbitrary rope. Construction of an algorithm for determining the indicators of its stressed state. Methodology. A model of the stress-strain state of a rubber-mesh cable with taking into account the inertia force and continuity discontinuity of an arbitrary rope is constructed by the methods of mechanics of layered composite materials. Results. An algorithm for determining the stress-strain state of a rubber-tether cable of an arbitrary structure with a damaged rope, taking into account the inertial forces. Scientific novelty. Determination of the nature and mechanism of the effect of inertial forces and continuity discontinuity in the cable of a rubber-tether rope on its stress-strain state. Practical Significance. The algorithm takes into account the effect of inertia forces on the stress-strain state of a rubber-tire rope of arbitrary construction with the breaking of an arbitrary rope. Its application will make it possible to reasonably determine the minimum reserves of strength under the condition of safe humotrope rope use inclusive and in special conditions and in case of emergency situation.

Key words: deformation of rubber-rope cable, arbitrary rope breaking, mathematical model.

Вступ. Вантовий канат утримує будівельну конструкцію. Його міцність, разом з іншими чинниками, впливає на рівень безпеки експлуатації споруди. Гумотросовий вантовий канат складено з тросів з'єднаних гумовою, або іншою еластичною оболонкою. Вона захищає троси канату від агресивного впливу довкілля. Її маса, разом з масою тросів, зумовлює появу сил інерції. Троси в процесі експлуатації вантових канатів можуть руйнуватися.

Методика визначення напруженого стану канату з урахуванням його механічних характеристик, конструкції, сил інерції, можливого пориву довільного тросу відсутня. Відсутність можливості визначити напружений стан канату з урахуванням комплексу перерахованих чинників обмежує їх використання вантових канатів в капітальних спорудах. Розробка методики визначення напруженого стану такого канату дозволить розв'язати актуальну задачу підвищення безпеки використання гумотросових канатів в якості вант капітальних споруд.

Аналіз стану питання. Вантовий гумотросовий канат композитний. Розриви суцільності його складових ведуть до зменшення його тягової спроможності. Вплив розривів елементів армування гумотросових стрічок розглянуто в роботах [1 - 8]. В процесі використання вироби руйнуються. Можливість часткового відновлення експлуатаційних характеристик гумотросових тягових органів з ушкодженими тросами, шляхом заміни частини ушкодженого троса,

обґрунтована в роботах [9, 10]. Запропонований гумотросовий плоский пас передачі з кінематичним зв'язком [11], як і гумотросовий канат з ушкодженнями має ділянки з локальними перерозподілами сил поміж тяговими елементами [12]. На конвеєрі кінці стрічки з'єднують. В з'єднаннях троси мають розриви неперервності відповідно до схеми з'єднання [13]. В [14] досліджено напружений стан з'єднання, обґрунтовано методику вибору його конструкції. Вплив параметрів гумотросового канату на крутильну жорсткість тіла намотки підйомної установки з бобінним органом досліджено в статті [15].

В загальному випадку канат може мати довільну кількість тросів. Розподіл навантажень поміж ними залежить від характеру їх взаємодії. Для розробки математичної моделі канату приймемо ряд спрощень. Елементи армування жорсткі на згин та зсув. Їхня жорсткість на розтяг значно перевищує відповідний показник матеріалу еластичної оболонки. Маса частини каната з одним тросом одиничної довжини включає масу троса та масу оболонки, що припадає на трос. Оболонка сприймає лише напруження зсуву в напрямку паралельному тросам канату. Напруження в елементах канату прямо пропорційні деформаціям.

Нехай канат складено з паралельних, регулярно розташованих в декількох шарах (загальною кількістю N) тросів по M в них. Довжину каната приймемо рівною L . Вздовж каната спрямуємо вісь x . В перерізі $x=0$ канат приєднано до елемента одного елемента споруди, в перерізі $x=L$ – до іншого. В довільному перерізі $x=l$ ($0 < l < L$) трос за номером I шару J має в розрив неперервності. Визначимо напружено-деформований стан канату з урахуванням впливу його розподіленої маси.

Наведені спрощення відповідають наступній розрахунковій схемі. Система з M паралельних, жорстких на згин пружних тросів довжиною L розташованих в N шарах взаємодіють через пружне неперервне середовище в якому виникають дотичні напруження. Деформування відбувається в межах лінійного закону. Один трос за номером I розташованим в шарі J має розрив неперервності на відстані l ($0 < l < L$) від перерізу нерухомого закріплення тросів. На кожен трос діє розподілена по довжині сила інерції змінної інтенсивності. На канат діє сила P .

Виріжмо з канату один трос малої довжини dx разом з еластичною оболонкою що його оточує. Розглянемо систему силових факторів що діють вирізану частину вантового гумотросового канату (рис. 1).

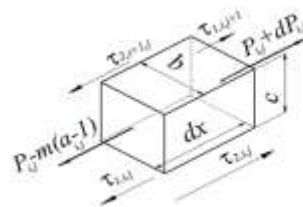


Рис. 1. Навантаження частини тросу канату малої довжини з гумовою оболонкою

Умова рівноваги тросу малої довжини dx

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

де P – сила розтягу троса; τ – усереднені дотичні напруження в гумі; b – крок розташування шарів в канат; c – крок розташування тросів в шарах; dm – маса частини тросу малої довжини з гумовою оболонкою; прискорення a .

Масу частини тросу малої довжини з оболонкою задамо наступним чином

$$dm = dx b c \rho, \quad (2)$$

де ρ – зведена питома маса тросу з гумовою оболонкою.

Дотичне напруження за законом Гука.

$$\tau_{1,i,j} = \frac{Gk_G}{h}(u_{i,j} - u_{i,j-1}), \quad (3)$$

$$\tau_{2,i,j} = \frac{Gk_G}{h} (u_{i,j} - u_{i-1,j}) \quad (4)$$

де G - модуль зсуву матеріалу гумової оболонки канату; k_G - коефіцієнт що враховує форму перерізу гумової оболонки h - мінімальна відстань поміж суміжними тросами шарів та в шарах канату.

Підставимо (2), (3), (4) в (1). Отримаємо.

$$\frac{dP_{i,j}}{dx} + b c \rho (a_i - 1) + \frac{G k_G}{h} (b(u_{i,j-1} - 2u_{i,j} + u_{i,j+1}) + c(u_{i-1,j} - 2u_{i,j} + u_{i+1,j})) = 0 \quad (5)$$

За законом Гука.

$$P_{i,j} = E F \frac{du_{i,j}}{dx}, \quad (6)$$

де E, F - зведений модуль пружності на розтяг матеріалу тросів та площа їх поперечного перерізу.

Прискорення i,j -того троса є другою похідною по часу t від переміщення.

$$a_{i,j} = \frac{d^2 u_{i,j}}{dt^2} \quad (7)$$

Врахуємо Наведене. Запишемо систему однорідних рівнянь рівноваги тросів канату (1) в наступній формі.

$$\frac{d^2 u_{i,j}}{dx^2} + \frac{b t \rho}{E F} \frac{d^2 u_{i,j}}{dt^2} + \frac{G}{E F h} ((b(u_{i,j-1} - 2u_{i,j} + u_{i,j+1}) + c(u_{i-1,j} - 2u_{i,j} + u_{i+1,j}))) = \frac{b c \rho}{E F} \quad (8)$$

Звернемо увагу. Рівняння системи (8) не прийнятні для крайніх тросів в шарах та шарів. Для них вони мають наступний вигляд.

$$\frac{d^2 u_1}{dx^2} + \frac{b t \rho}{E F} \frac{d^2 u_1}{dt^2} + \frac{b G}{E F h} (u_2 - u_1) = \frac{b c \rho}{E F} \quad (9)$$

$$\frac{d^2 u_M}{dx^2} + \frac{b t \rho}{E F} \frac{d^2 u_M}{dt^2} + \frac{b G}{h} (u_{M-1} - u_M) = \frac{b c \rho}{E F} \quad (10)$$

Будемо вважати що закон переміщення троса в часі може бути заданий сумою декількох (K) членів ряду Фур'є. Рішення системи рівнянь (8) - (10) в переміщеннях будемо шукати як суму рішення однорідного та окремого рішення. Рішення однорідної системи рівнянь (7) - (9).

$$u_{i,j}^* = \sum_{k=0}^K C_k \cos(\alpha_k t) \left[\sum_{m=1}^{M-1} \sum_{n=1}^{N-1} (A_{m,n,k} e^{\beta_{m,n,k} x} + B_{m,n,k} e^{-\beta_{m,n,k} x}) \times \right. \\ \left. + \sum_{m=1}^{M-1} (A_{m,k} e^{\beta_{m,k} x} + B_{m,k} e^{-\beta_{m,k} x}) \cos(\mu_m (i - 0,5)) + \sum_{n=1}^{N-1} (A_{n,k} e^{\beta_{n,k} x} - B_{n,k} e^{-\beta_{n,k} x}) \cos(\chi_n (j - 0,5)) \right] + \\ + \frac{P}{EF} x + \delta \quad (11)$$

де $A_{m,n,k}$, $B_{m,n,k}$, $A_{n,n,k}$, μ_m ; χ_n - невідомі величини; $\alpha_k = \frac{k\pi}{T}$, $k=1, 2, \dots; 2T$ - період зміни характеру навантаження канату; M - кількість тросів в канаті; P - сила навантаження канату віднесена до кількості тросів в ньому; δ - переміщення канату як жорсткого тіла.

$$\beta_{m,n,k} = \pm \sqrt{2 \frac{G b}{h E F} (2 - \cos(\mu_m) - \cos(\chi_n)) - \frac{b c \rho}{E F} \alpha_k^2}$$

$$\beta_{m,k} = \pm \sqrt{2 \frac{G b}{h E F} (1 - \cos(\mu_m)) - \frac{b c \rho}{E F} \alpha_k^2}, \quad \mu_m = \frac{\pi m}{M} \quad (1 \leq m \leq M)$$

$$\chi_n = \frac{\pi n}{N} \quad (1 \leq n \leq N) \quad \beta_{n,k} = \pm \sqrt{2 \frac{G b}{h E F} (1 - \cos(\chi_n)) - \frac{b c \rho}{E F} \alpha_k^2}$$

Відзначимо, урахування прискорення призводить до зменшення абсолютних значень характеристичних показників $\beta_{m,n,k}$, $\beta_{m,k}$, $\beta_{n,k}$. Вказане призводить до зростання вздовж канату зон локального збурення напруженого стану тому що добуток характеристичних показників є аргументом експонент у виразі переміщень тросів (11). Наслідком останнього є і те що зона збурення напружено-деформованого стану багатотросового гумотросового канату, зумовлена включно і поривом його троса, пропорційна корню квадратному з відношення жорсткостей троса канату на розтяг та гумових поміжтросових прошарків на зсув.

Окреме рішення системи (7) - (9) не залежить від номера троса.

$$u^{**} = \frac{b c \rho x^2}{2 E F} \quad (12)$$

Рішення в переміщеннях

$$u_{i,j} = u_{i,j}^* + u_{i,j}^{**} \quad (13)$$

Скористаємося законом Гука (6). Отримаємо вираз для визначення внутрішніх сил навантаження тросів канату.

$$P_{i,j}^* = EF \sum_{k=0}^K \times \left[\begin{aligned} & C_k \cos(\alpha_k t) \times \\ & \left(\sum_{m=1}^{M-1} \sum_{n=1}^{N-1} (A_{m,n,k} e^{\beta_{m,n,k} x} - B_{m,n,k} e^{-\beta_{m,n,k} x}) \beta_{m,n,k} \times \right. \\ & \quad \left. + \cos(\mu_m (i-0,5)) \cos(\chi_n (j-0,5)) \right) \\ & + \sum_{m=1}^{M-1} (A_{m,k} e^{\beta_{m,k} x} - B_{m,k} e^{-\beta_{m,k} x}) \beta_{m,k} \times \\ & \quad \left. + \cos(\mu_m (i-0,5)) \right) \\ & \left. + \sum_{n=1}^{N-1} (A_{n,k} e^{\beta_{n,k} x} - B_{n,k} e^{-\beta_{n,k} x}) \beta_{n,k} \cos(\chi_n (j-0,5)) \right] + \\ & + P + b c \rho x \quad (14) \end{aligned}$$

Згідно поставленої задачі, в канаті в перерізі $x=l$ ушкоджено I, J -тий трос. Він локально порушує конструкцію канату, зокрема умову нерозривності його тросів. Рішення (13) та (14) не прийнятні для такого канату. З метою розв'язання задачі, умовно, площиною нормальною до осі канату, розріжемо його на дві частини. В кожній з цих частин троси не мають розривів неперервності. Для них прийнятні вказані форми рішень. Частинам надамо номери 1 та 2. Їх помістимо в нижні індекси величин, сталих, що стосуються відповідних частин. З метою спрощення виразів, прийемо, що в перерізах початку ($x=0$) та його кінця ($x=L$) лінії розташування

центрів тросів прямі до навантаження залишаються прямими і після навантаження канату. В такому випадку маємо.

$$\begin{aligned} A_{1,m,n,k} &= -B_{1,m,n,k}, \quad Am_{1,m,k} = -Bm_{1,m,k}, \quad An_{1,n,k} = -Bn_{1,n,k}, \\ A_{2,m,n,k} &= -B_{2,m,n,k} e^{-2\beta_{m,n,k}L}, \quad Am_{1,m,k} = -Bm_{1,m,k} e^{-2\beta_{m,k}L}, \quad An_{1,n,k} = -Bn_{1,n,k} e^{-2\beta_{n,k}L}. \end{aligned} \quad (15)$$

Внутрішні сили навантаження тросів та їх переміщень набудуть наступних виглядів.

$$p_{\eta,i,j} = EF \sum_{k=0}^K \left[\begin{aligned} &C_k \cos(\alpha_k t) \times \\ &\left(\sum_{m=1}^{M-1} \sum_{n=1}^{N-1} B_{\eta,m,n,k} \left(e^{\beta_{m,n,k}x} + e^{-\beta_{m,n,k}x} \right) \beta_{m,n,k} \times \right. \\ &\quad \left. \times \cos(\mu_m(i-0,5)) \cos(\chi_n(j-0,5)) \right) + \\ &+ \sum_{m=1}^{M-1} Bm_{\eta,m,k} \left(e^{\beta_{m,k}x} + e^{-\beta_{m,k}x} \right) \beta_{m,k} \cos(\mu_m(i-0,5)) + \\ &\left. \sum_{n=1}^{N-1} Bn_{\eta,n,k} \left(e^{\beta_{n,k}x} + e^{-\beta_{n,k}x} \right) \beta_{n,k} \cos(\chi_n(j-0,5)) \right) \end{aligned} \right] + \\ + P + b c \rho x \quad (16)$$

$$u_{\eta,i,j} = \sum_{k=0}^K C_k \cos(\alpha_k t) \left[\begin{aligned} &\sum_{m=1}^{M-1} \sum_{n=1}^{N-1} B_{\eta,m,n,k} \left(e^{\beta_{m,n,k}x} - e^{-\beta_{m,n,k}x} \right) \times \\ &\quad \times \cos(\mu_m(i-0,5)) \cos(\chi_n(j-0,5)) \right) + \\ &+ \sum_{m=1}^{M-1} Bm_{\eta,m,k} \left(e^{\beta_{m,k}x} - e^{-\beta_{m,k}x} \right) \cos(\mu_m(i-0,5)) + \\ &\left. \sum_{n=1}^{N-1} Bn_{\eta,n,k} \left(e^{\beta_{n,k}x} - e^{-\beta_{n,k}x} \right) \cos(\chi_n(j-0,5)) \right) \end{aligned} \right] + \\ + \frac{P}{EF} x + \delta_{\eta} + \frac{b c \rho x^2}{2EF} \quad (17)$$

де η – номер ділянки.

Умовне розділення канату на частини вимагає виконання умов сумісності деформування цих частин. Зокрема, рівності сил навантаження тросів в перерізі $x=l$.

$$P_{1,\bar{z},j} = P_{2,\bar{z},j} \quad (18)$$

З цієї умови маємо співвідношення коефіцієнтів у виразах показників напружено-деформованого стану канату.

$$\begin{aligned} B_{1,m,n,k} &= B_{2,m,n,k} \frac{e^{-\beta_{m,n,k}l} + e^{\beta_{m,n,k}(l-2L)}}{e^{-\beta_{m,n,k}l} + e^{\beta_{m,n,k}l}} \\ Bm_{1,m,k} &= Bm_{2,m,k} \frac{e^{-\beta_{m,k}l} + e^{\beta_{m,k}(l-2L)}}{e^{-\beta_{m,k}l} + e^{\beta_{m,k}l}} \\ Bn_{1,n,k} &= Bn_{2,n,k} \frac{e^{-\beta_{n,k}l} + e^{\beta_{n,k}(l-2L)}}{e^{-\beta_{n,k}l} + e^{\beta_{n,k}l}} \end{aligned} \quad (19)$$

Переміщення тросів частин з урахуванням (19).

$$u_{1,i,j} = \sum_{k=0}^K C_k \cos(\alpha_k t) \left[\sum_{m=1}^{M-1} \sum_{n=1}^{N-1} B_{2,m,n,k} \frac{e^{-\beta_{m,n,k}l} + e^{\beta_{m,n,k}(l-2L)}}{e^{-\beta_{m,n,k}l} + e^{\beta_{m,n,k}l}} (e^{\beta_{m,n,k}x} - e^{-\beta_{m,n,k}x}) \times \right. \\ \left. \times \cos(\mu_m(i-0,5)) \cos(\chi_n(j-0,5)) + \sum_{m=1}^{M-1} B_{m_{2,m,k}} \frac{e^{-\beta_{m,k}l} + e^{\beta_{m,k}(l-2L)}}{e^{-\beta_{m,k}l} + e^{\beta_{m,k}l}} (e^{\beta_{m,k}x} - e^{-\beta_{m,k}x}) \times \right. \\ \left. \times \cos(\mu_m(i-0,5)) + \sum_{n=1}^{N-1} B_{n_{2,n,k}} \frac{e^{-\beta_{n,k}l} + e^{\beta_{n,k}(l-2L)}}{e^{-\beta_{n,k}l} + e^{\beta_{n,k}l}} (e^{\beta_{n,k}x} - e^{-\beta_{n,k}x}) \times \right. \\ \left. \times \cos(\chi_n(j-0,5)) \right] + \frac{P + b c \rho l}{E F} + \delta_1 \quad (20)$$

$$u_{2,i,j} = \sum_{k=0}^K C_k \cos(\alpha_k t) \left[\sum_{m=1}^{M-1} \sum_{n=1}^{N-1} B_{2,m,n,k} (e^{\beta_{m,n,k}x} - e^{-\beta_{m,n,k}x}) \times \right. \\ \left. \times \cos(\mu_m(i-0,5)) \cos(\chi_n(j-0,5)) + \sum_{m=1}^{M-1} B_{m_{2,m,k}} (e^{\beta_{m,k}x} - e^{-\beta_{m,k}x}) \cos(\mu_m(i-0,5)) + \right. \\ \left. \sum_{n=1}^{N-1} B_{n_{2,n,k}} (e^{\beta_{n,k}x} - e^{-\beta_{n,k}x}) \cos(\chi_n(j-0,5)) \right] + \frac{P + b c \rho l}{E F} + \delta_2 \quad (21)$$

Розрив суцільності троса призводить до появи зазору поміж утвореними розривом його кінцями. Максимальне значення зазору позначимо як U_0 . Запишемо різницю переміщень кінців тросів в часі, в перерізі $x=l$.

$$u_{1,i,j} - u_{2,i,j} = U_0 \sum_{k=0}^K C_k \cos(\alpha_k t) \begin{cases} 1 & i = I \wedge j = J \\ 0 & i \neq I \vee j \neq J \end{cases} \quad (22)$$

Задамо різницю переміщень рядом Фур'є на дискретних осях координат – номерів тросів та шарів їх розташування. Вказане дозволить визначити останні невідомі сталі як величини лінійно залежну від максимального значення зазору.

$$B_{2,m,n,k} = U_0 \frac{4e^{\beta_{m,n,k}l} \cos(\mu_m(I-0,5)) \cos(\chi_n(J-0,5))}{M N \left(-\frac{1 + e^{2\beta_{m,n,k}(l-L)}}{\text{th}(\beta_{m,n,k}l)} + e^{2\beta_{m,n,k}(l-L)} - 1 \right)}, \quad (23)$$

$$B_{m_{2,m,k}} = U_0 \frac{2 \cos(\mu_m(I-0,5))}{M N \left(-\frac{1 + e^{2\beta_{m,k}(l-L)}}{\text{th}(\beta_{m,k}l)} + e^{2\beta_{m,k}(l-L)} - 1 \right)}, \quad (24)$$

$$Bn_{2,n,k} = U_0 \frac{2 \cos(\mu_m (I - 0,5))}{M N \left(-\frac{1 + e^{2\beta n_{n,k}(l-L)}}{\operatorname{th}(\beta n_{n,k} l)} + e^{2\beta n_{n,k}(l-L)} - 1 \right)}, \quad (25)$$

$$\delta_2 = \delta_1 - \frac{U_0}{M N} \sum_{k=0}^K C_k \cos(\alpha_k t) \quad (26)$$

Прийmemo що переміщення першої частини канату як жорсткого тіла відсутні. Тоді $\delta_1=0$. Друга частина, відповідно і її кінець – переріз $x=L$, змінює своє розташування в часі (26).

Розрив I, J - того троса зменшує до нуля силу його розтягу в перерізі $x=l$. З виразу для переміщення тросів другої частини (21), з урахуванням значень невідомих сталих (15), (19), (23) - (25) маємо величину зазору що утворюється в часі поміж кінцями троса в перерізі розриву його непервності.

$$U_0(t) = \frac{\left(\sum_{k=0}^K C_k \cos(\alpha_k t) + b c \rho l - P \right) M N}{\left(\begin{array}{l} \cos^2(\mu_m (I - 0,5)) \times \\ 2 \sum_{m=1}^{M-1} \sum_{n=1}^{N-1} \frac{\cos^2(\chi_n (J - 0,5)) \beta_{m,n,k}}{\operatorname{cth}(\beta_{m,n,k} l) - \frac{e^{2\beta_{m,n,k}(l-L)} - 1}{e^{2\beta_{m,n,k}(l-L)} + 1}} + \\ + \sum_{m=1}^{M-1} \frac{\cos^2(\mu_m (I - 0,5)) \beta_{m,k}}{\operatorname{cth}(\beta_{m,k} l) - \frac{e^{2\beta_{m,k}(l-L)} - 1}{e^{2\beta_{m,k}(l-L)} + 1}} + \\ + \sum_{n=1}^{N-1} \frac{\cos^2(\chi_n (J - 0,5)) \beta_{n,k}}{\operatorname{cth}(\beta_{n,k} l) - \frac{e^{2\beta_{n,k}(l-L)} - 1}{e^{2\beta_{n,k}(l-L)} + 1}} \end{array} \right) EF} \quad (27)$$

Отримані вирази та послідовність їх застосування становлять собою алгоритм визначення напружено-деформованого стану вантового гумотросового канату з ушкодженим тросом та динамічним його навантаженням.

Розглянемо приклади ушкодження крайнього та середнього троса вантового канату з двадцяти п'яти тросів довжиною 10 м зі змінюваним в часі зазором поміж кінцями ушкодженого троса з періодом 2 секунди. За цей період 0,2 секунди зазор має максимальне значення. Решта часу зазор поміж кінцями тросів відсутній. Вказане супроводжується зміною розподілу внутрішніх сил навантаження тросів. Перерізи канату ($x=0, x=L$) не деформуються. Трос канату ушкоджено в перерізі $x=5$ м. Діаметр тросів канату $d=8,25$ мм, товщина канату $b=16,5$ мм, крок розташування тросів $c=1,2d$, питома маса троса з гумою навколо нього $\rho=52$ /мм³; модуль зсуву гуми $G=5$ МПа, коефіцієнт форми гуми $k_G=1$.

Характер навантаження канату в часі, відповідно прийнятої форми розв'язку однорідної системи рівнянь (7) - (9) в переміщеннях (10) задамо сумою добутків косинусів на коефіцієнти – рядом Фур'є для симетричної функції циклічного навантаження канату силою у МН з періодом у 2 секунди ($T=2$ секунди). Зовнішнє навантаження діє на канат на протязі 0,2 сек. Кількість членів суми прийmemo рівною десяти.

$$p(t) = \sum_{k=1}^{10} C_k \cos(\alpha_k t) \quad (28)$$

де C_k - коефіцієнти ряду Фур'є розкладу функції прийнятої функції.

Прийнята $(p(t))$ та врахована функція Фур'є наведені на рисунку 2.

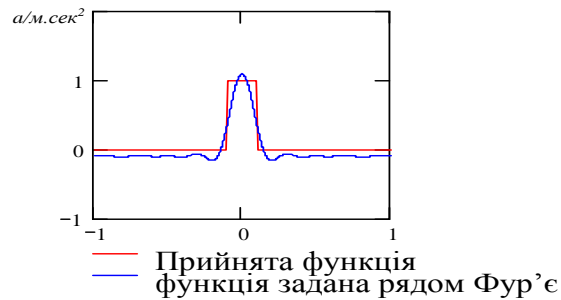


Рис. 2. Графік прискорення канату за період часу $-T \leq t \leq T$

З використанням отриманого алгоритму визначали переміщення тросів та внутрішні сили їх навантаження. На рисунку 3 показані переміщення та внутрішні сили навантаження тросів першої частини канату в перерізі ушкодження кутового троса ($I=J=1$) для трьох випадків значення часу ($t=0$; $t=0,1$ сек.; $t=0,3$ сек.).

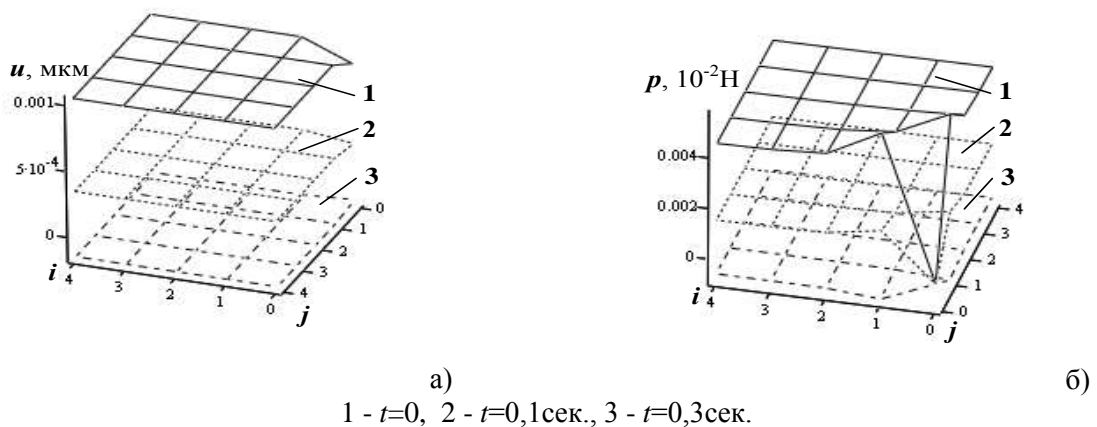


Рис. 3. Переміщення та внутрішні сили навантаження тросів в перерізі ушкодження кутового троса

Наведені графіки свідчать про те переріз канату переміщається змінюється перерозподіл сил поміж тросами в процесі динамічної зміни зазору поміж кінцями ушкодженого троса. При цьому відношення сили навантаження найбільш навантаженого троса до середньої сили їх навантаження (коефіцієнт концентрації напружень r_1) становить 1,41. Переміщення перерізів канату спрямована вздовж його осі. Збільшення значення координати розташування пориву супроводжується зростанням переміщень перерізу. Особливо зауважимо що від'ємні переміщення (поверхня 3) зумовлені від'ємними значеннями прискорення для $t=0,3$ сек (див. рис. 2) що отримані коли безмежне значення членів суми обмежено першими десятима складовими.

На рисунку 4 наведені аналогічні графіки для випадку ушкодження центрального троса канату.

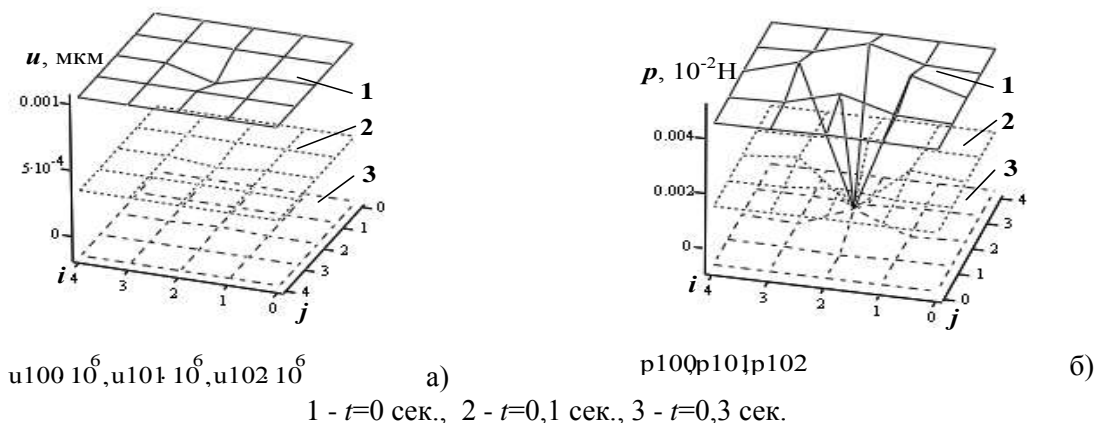


Рис. 4. Переміщення та внутрішні сили навантаження тросів в перерізі ушкодження середнього троса

Характери переміщень та навантажень тросів збігаються з попереднім випадком. Різниця полягає в місці розташування ушкодженого троса та значеннях сил навантаження суміжних тросів. Коефіцієнт концентрації напружень менший. Він (r_2) становить 1.22. Фізично вказане є наслідком того що зменшення навантаження до нуля кінців ушкодженого троса компенсується, практично, лише суміжними тросами. В першому випадку їх було два, в останньому – чотири. Подвійне зростання кількості суміжних тросів призвело, практично до вдвічі меншого зростання сил в останньому випадку. На рисунку 5 показана залежність коефіцієнтів концентрації напружень від кількості тросів в канаті у випадку рівності кількості тросів в ряду (M) та кількості рядів (N).

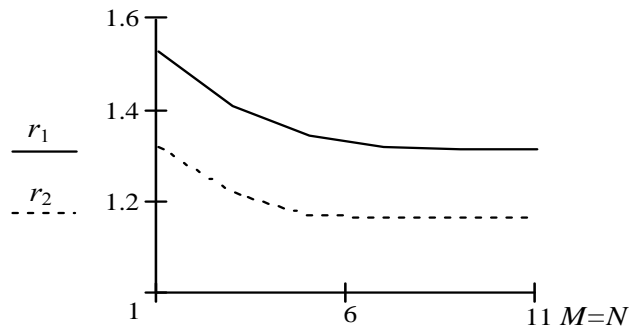


Рис. 5. Залежність коефіцієнтів концентрації напружень від кількості тросів в канаті для випадків ушкоджень кутових (r_1) та середніх тросів (r_2)

Отримані графіки показують що коефіцієнти концентрації напружень спадні. Їх значення залежать від кількості тросів в канаті коли кількість рядів та тросів в рядах не менша за вісім.

Висновки. Відомі дослідження не дозволяють урахувати вплив характеру зміни зовнішнього навантаження на напружено-деформований стан гумо-тросового канату з ушкодженим довільним тросом.

Розроблена модель та алгоритм розрахунку напружено-деформованого стану гумотросового канату довільної конструкції, з урахуванням зміни його зовнішнього навантаження в часі та за наявності в ньому розриву суцільності довільно розташованого троса.

Встановлено наступне. Розрив троса супроводжується зростанням навантажень, практично, лише суміжних тросів. Значення максимальних сил навантаження тросів залежить від розташування ушкодженого троса в канаті. Вони найбільші у разі пориву кутового троса. Найменші - у разі пориву середнього троса. Їх значення залежать від кількості тросів в канаті коли кількість рядів та тросів в рядах не менша за вісім. Максимальні внутрішні зусилля навантаження тросів зменшуються зі зростанням кількості тросів до 1,31, у разі пориву кутового троса, та до 1,16 - середнього. Максимальні сили, що виникають у разі ушкодження інших тросів, лежать в межах наведених величин. Зона збурення напружено-деформованого стану багатотросового гумотросового канату зумовлена включно і поривом троса пропорційна корню квадратному з відношення жорсткостей троса канату на розтяг та гумових поміж тросових прошарків на зсув. За динамічного навантаження довжина зони збурення зростає. Динамічний характер прикладеного навантаження призводить до зростання максимальних сил, відносних переміщень тросів не менш ніж на 8%. Наявність динамічної складової супроводжується зростанням зони локального перерозподілу напружень в канаті з ушкодженням його троса.

Розроблений алгоритм дозволяє визначати напружений стан вантового канату з ушкодженим тросом у разі навантаження канату змінним зусиллям та підвищити безпеку його використання в капітальних спорудах з довгим терміном використання. З метою збільшення терміну використання канату його оболонку доцільно виготовити з еластичного матеріалу механічні властивості якого не суттєво змінюються в часі, наприклад, з поліуретану. Застосування алгоритму розрахунку напружено-деформованого стану канату дозволить обґрунтовано визначити мінімальні запаси міцності за умови безпечного використання вантового гумотросового канату, включно, і в особливих умовах та і у разі аварійної ситуації.

Математична модель вантового канату побудована методами механіки композитних матеріалів. Отримані результати не суперечать встановленим раніше закономірностям, вони поглиблюють розуміння механізму взаємодії тягових складових в гумотросових канатах.

Розв'язана вона аналітично в замкненому вигляді. Результати можна вважати достатньо достовірними.

Список бібліографічного опису

1. Волоховский В.Ю., Радин В.П., Рудяк М.Б. Концентрация усилий в тросах и несущая способность резиновых конвейерных лент с повреждениями Вестник МЭИ №5, 2010, стр. 5-12.
2. Бельмас И.В. Напряженное состояние резиновой ленты при произвольном повреждении тросов Проблемы прочности и надежности машин 1993, №6 с. 45-48
3. Колосов Л.В., Бельмас И.В. Исследование прочностных характеристик образцов поврежденных резиновых лент. Известия вузов. Горный журнал. - 1990, N 8, с.81-84.
4. Колосов Л.В., Бельмас И.В. Экспериментальные исследования агрегатной прочности РТЛ. Известия вузов. Горный журнал. - 1991, N 1, с.85-87.
5. Ропай В.А. Шахтные уравнивающие канаты: монография / А.В. Ропай. – Днепропетровск: Национальный горный университет, 2016. – 263 с.
6. Belmas I., Kolosov D. The stress-strain state of the stepped rubber-rope cable in bobbin of winding. Technical and Geoinformational Systems in Mining. Taylor & Francis Group, London, UK 2011c. 211-214
7. 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 Volume 26, Number 2, 2018 p 231-236
8. 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
9. Колосов Д.Л., Білоус О.І., Гуров. І.А. Міцність відновленої гумотросової стрічки. Математичні проблеми технічної механіки та прикладної математики – 2019. Міжнародна наукова конференція. Матеріали конференції Дніпро, Кам'янське -2019 – с. 126-127.
10. 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
11. Бельмас І.В., Білоус О.І., Танцура Г.І., Бобильова І.Т. Зірочка. Патент № 117954 України F16H 55/17 (2006.01), F16H 55/12 (2006.01), F16H 55/16 (2006.01), F16H 55/30 (2006.01), F16H 7/02 (2006.01)). Заявник та патентовласник ДДТУ № а201609889, заявл. 26.09.2016 25.10.2018, бюл. № 20/2018
12. Бельмас І.В., Д.Л.Колосов, О.І.Білоус, Бобильова І.Т. Дослідження напруженого стану гнучкого тягового органу з кінематичним зв'язком. Збірник наукових праць VIII Міжнародної науково-технічної конференції «Прогресивні технології в машинобудуванні РТМЕ 2019» 4-8 лютого 2019р. Івано-Франківськ – Яремче, 2019 - с. 72-73.
13. Колосов Л.В., Бельмас И.В. Анализ схем стыковых соединений резиновых лент. Известия вузов. Горный журнал. - 1990, N 2, с.83-85.
14. Танцура Г.І. Гнучкі тягові органи. Стикові з'єднання конвеєрних стрічок. – Дніпродзержинськ: ДДТУ, 2010 - 127 с.
15. Zabolotnyi, K.S., Panchenko, O.V., Zhupiiiev, O.L., & Polushyna, M.V. (2018). Influence of parameters of a rubber-rope cable on the torsional stiffness of the body of the winding (Вплив параметрів гумотросового канату на крутильну жорсткість тіла намотки). Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu. (5), 54–63. DOI: 10.29202/nvngu/2018-5/11.

References

1. Volokhovskiy V.Yu., Radin V.P., Rudyak M.B. The concentration of forces in the cables and the bearing capacity of rubber-cable conveyor belts with damage Vestnik MPEI №5, 2010, pp. 5-12.
2. Belmas I.V. Stress state of a rubber-cable belt with arbitrary damage to cables Problems of strength and reliability of machines 1993, №6 p. 45-48
3. Kolosov L.V., Belmas I.V. Investigation of the strength characteristics of samples of damaged rubber bands. Izvestiya vuzov. Mining magazine. - 1990, N 8, pp. 81-84.
4. Kolosov L.V., Belmas I.V. Experimental studies of the aggregate strength of RTL. Izvestiya vuzov. Mining magazine. - 1991, N 1, pp. 85-87.
5. Ropay V.A. Mine balancing ropes: monograph / A.V. Ropay. - Dnepropetrovsk: National Mining University, 2016. - 263 p.
6. Belmas I., Kolosov D. The stress-strain state of the stepped rubber-rope cable in bobbin of winding. Technical and Geoinformation Systems in Mining. Taylor & Francis Group, London, UK 2011p. 211-214
7. Belmas I., Kolosov D., Kolosov O., Onvshchenko S. 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 Volume 26, Number 2, 2018 p 231-236
8. I.V.Belmas, D.L.Kolosov, T.O.Chechel, O.M.Vorobyova, O.M.Chernish. 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. Collection of science practices of the national hospitality university 2020 No. 61. With. 149-155
9. Kolosov D.L., Bilous O.I., Gurov. I.A. Mitsnist vidnovlenoi humotrosovoi strichki. Mathematical problems of technical mechanics and applied mathematics - 2019. International scientific conference. Proceedings of the conference Dnipro, Kam'yansk -2019 - p. 126-127.

10. Belmas I., Kolosov D. , Onyshchenk S., Bobylova I. Partial restoration of tractive ability of rubber-cable tractive element with damaged cable base university 2020 №60. With. 196-206
11. Belmas I.V., Bilous O.I., Tantsura G.I., Bobilova I.T. Zirochka. Patent No. 117954 of Ukraine F16H 55/17 (2006.01), F16H 55/12 (2006.01), F16H 55/16 (2006.01), F16H 55/30 (2006.01), F16H 7/02 (2006.01)). Applicant and patent holder DDTU No. a201609889, Appl. 09/26/2016 10/25/2018, bul. No. 20/2018
12. Belmas I.V., D.L. Kolosov, O.I. Bilous, Bobilova I.T. Collection of scientific practices of the VIII International scientific and technical conference "Progressive technologies in machine-building RTME 2019" February 4-8, 2019. Ivano-Frankivsk - Yaremche, 2019 - p. 72-73.
13. Kolosov L.V., Belmas I.V. Analysis of schemes of butt joints of rubber-cable tapes. Izvestiya vuzov. Mining magazine. - 1990, N 2, pp. 83-85.
14. Tantsura G.I. Gnuchki traction organs. Sticks of conveyor stitches. - Dniprodzerzhynsk: DDTU, 2010 - 127 p.
15. Zabolotnyi, K.S., Panchenko, O.V., Zhupiiiev, O.L., & Polushyna, M.V. (2018). Influence of parameters of a rubber-rope cable on the torsional stiffness of the body of the winding. Naukovyi Visnyk Nationalnoho Hirnychoho Universytetu. (5), 54–63. DOI: 10.29202/nvngu/2018-5/11.