

УДК 622.647.05:621.867.4-1

**ПРО ВПЛИВ КОНСТРУКТИВНИХ ПАРАМЕТРІВ ТРУБЧАТОГО КОНВЕЄРА НА
СТІЙКІСТЬ СТАНУ ПОПЕРЕЧНОГО ПЕРЕРІЗУ ЗА НЕСИМЕТРИЧНОГО ЙОГО
ЗАВАНТАЖЕННЯ****¹Ларіонов Г. І., ¹Кірія Р. В.**¹*Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України***О ВЛИЯНИИ КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ТРУБЧАТОГО КОНВЕЙЕРА НА
УСТОЙЧИВОСТЬ СОСТОЯНИЯ ПОПЕРЕЧНОГО СЕЧЕНИЯ ПРИ НЕСИММЕТРИЧНОЙ
ЕГО ЗАГРУЗКЕ****¹Ларионов Г. И., ¹Кирия Р. В.**¹*Інститут геотехнической механики им. Н.С. Полякова НАН Украины***ABOUT INFLUENCE OF DESIGN TUBULAR-CONVEYOR PARAMETERS ON THE CROSS
SECTION STABILITY AT ASSYMETRIC LOADING****¹Larionov G .I., ¹Kiriya R.V.**¹*Institute of Geotechnical Mechanics named by N. Poljakov of National Academy of Sciences of Ukraine*

Анотація. Основними недоліками трубчастих конвеєрів (ТК) при застосуванні в умовах вугільних шахт, як свідчить практика, є втрата стійкості кругової форми поперечного перерізу стрічки. Вона призводить не тільки до просипів вантажу, але й до нерозрахункових взаємодій з роликкоопорами ТК. В результаті такої взаємодії найчастіше спостерігались повздовжні розрізи стрічки і, як наслідок, неможливість її подальшої експлуатації. Відсутність математичної моделі процесу втрати стійкості форми поперечного перерізу стрічки, враховуючи складний характер вихідних рівнянь пружних оболонок, не дозволила належним чином дослідити цю проблему.

Внаслідок проведених досліджень розроблено математичну модель напружено-деформованого стану стрічки ТСК з вантажем при несиметричному його розташуванні по поперечному перерізу; на базі розробленої моделі визначено величину кручення нормального перерізу стрічки; момент кручення поперечного перерізу стрічки від сил ваги вантажу і деформації стрічки і момент кручення стрічки від сил тертя стрічки об ролики конвеєра; встановлено лінійну залежність моменту кручення, обумовленого силою ваги і деформацією вантажу, від кроку розстановки роликкоопор і кубічну залежність від радіуса згорнутої стрічки, а також пряму залежність від питомої ваги вантажу, що транспортується, і коефіцієнту тертя вантажу об стрічку. При цьому чим більша ступінь заповнення вантажем стрічки, тим величина моменту кручення стрічки, обумовленого силами ваги вантажу і деформацією, менше; встановлено кубічну залежність моменту кручення, обумовленого силами тертя стрічки об ролики роликкоопор, від радіуса трубчастої стрічки і лінійну залежність від відстані між роликкоопорами, коефіцієнта тертя стрічки об ролики і питомої ваги вантажу. При цьому, чим більший коефіцієнт внутрішнього тертя вантажу і ступінь заповнення вантажем стрічки, тим момент кручення більший; встановлено критерій стійкості поперечного перерізу стрічки ТСК за умов її руху по роликкоопорах.

Ключові слова: трубчастий стрічковий конвеєр, напружено-деформований стан, загальні рівняння пружної оболонки, спрощення, аналітичний розв'язок, крутка, втрата стійкості.

Вступ. Трубчасті конвеєри знаходять широке застосування в різних галузях при транспортуванні сипких вантажів. Особлива популярність викликана наявністю захищеності вантажу внаслідок замкнутості поперечного перерізу стрічки трубчастого стрічкового конвеєра (ТСК), що викликано необхідністю відповідності сучасним вимогам збереження навколишнього середовища та захищеності сипкого вантажу від його впливу.

Відомі випадки застосування ТСК в умовах підземної експлуатації на вугільних шахтах Німеччини [1] показали високу економічну ефективність від його застосування.

Проте вагомим аргументом відмови від його застосування набула втрата стійкості поперечного перерізу стрічки ТСК, що зрештою призвело до втрати найбільш дорогої складової конструкції ТСК – стрічки.

Актуальність. Використання машинних методів розрахунку ТСК не в змозі визначити умови, за яких поперечний переріз стрічки втрачає кругову форму, про що свідчить відсутність публікацій з цього приводу. Головним інструментом для забезпечення стійкості є використання досвіду застосування конструктивних рішень при проектуванні става та роликоопор.

Таким чином, розробка математичної моделі напружено-деформованого стану стрічки ТСК при несиметричному розподілі вантажу по поперечному перерізу стрічки для вивчення умов втрати стійкості стану та впливу на неї конструктивних параметрів є **актуальною науковою задачею**.

Розв'язок задачі. Основна ідея отримання математичної моделі напружено-деформованого стану полягає у використанні особливостей навантаження пружної оболонки з метою спрощення вихідної системи рівнянь, отримання розв'язку та дослідження і обґрунтування параметрів ТСК з врахуванням фізико-механічних властивостей стрічки, що забезпечують стійкість поперечного перерізу стрічки за її рухом по роликоопорам. Для вирішення цієї задачі необхідно визначити крутні моменти та величину крутки стрічки ТСК кругової форми поперечного перерізу за несиметричного розташування вантажу по перерізу та дослідити їх вплив на величину моменту та кута закручування. Під круткою будемо розуміти кут закручування поперечного перерізу кругової по формі стрічки між роликоопорами.

Для визначення крутних моментів та величину крутки стрічки ТСК кругової форми поперечного перерізу за несиметричного розташування вантажу по її перерізу розглянемо пружну циліндричну оболонку, отриману згортанням конвеєрної стрічки до отримання кругової замкнутої форми поперечного перерізу. Будемо вважати, що таку форму приймає згорнута стрічка ТСК між роликоопорами (рис.1).

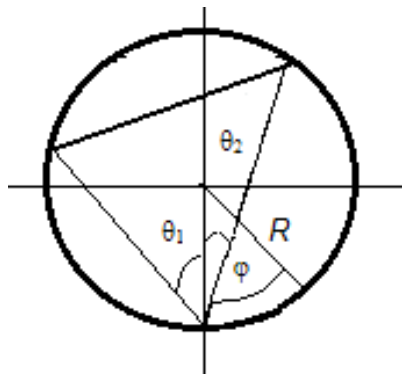


Рисунок 1 – Поперечний переріз стрічки ТСК між роликоопорами

На рис. 1 позначено: φ – поточна кутова координата, рад; θ_1 і θ_2 – кутові координати перетину поверхні трубчастой стрічки сипким вантажем, рад.

Згідно теорії пружних циліндричних оболонок [2] на елемент серединної поверхні оболонки за її деформування діють сили і моменти, причому

деформації оболонки рахують суттєво меншими у порівнянні з її радіусом R (м).

У цьому випадку з урахуванням дотичних сил, що діють з боку сипкого вантажу, таких же спрощень системи рівнянь рівноваги, як і в роботі [3], вона матиме вигляд:

$$\begin{cases} R \frac{\partial N_x}{\partial x} + \frac{\partial N_{\varphi x}}{\partial \varphi} = 0; \\ \frac{\partial N_{\varphi}}{\partial \varphi} + RN_x \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + R \frac{\partial N_{\varphi x}}{\partial x} - Q_{\varphi} + \tau R = 0; \\ R \frac{\partial Q_x}{\partial x} + \frac{\partial Q_{\varphi}}{\partial \varphi} + RN_x \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + N_{\varphi} + qR = 0; \\ R \frac{\partial M_{x\varphi}}{\partial x} - \frac{\partial M_{\varphi}}{\partial \varphi} + RQ_{\varphi} = 0; \\ \frac{\partial M_{\varphi x}}{\partial \varphi} + R \frac{\partial M_x}{\partial x} - RQ_x = 0. \end{cases} \quad (1)$$

Згідно [2] вісь z направлена по нормалі до деформованої серединної поверхні, вісь x направлена по дотичній до неї, вісь y направлена перпендикулярно до площини xz ; N_x – інтенсивність мембранних зусиль розтягу вздовж координатної осі x , Н/м; N_{φ} – інтенсивність мембранних зусиль в перерізі по координаті φ , Н/м; $N_{x\varphi}$ – інтенсивність дотичних мембранних зусиль, Н/м; Q_x – інтенсивність сил перерізу у напрямку осі x , Н/м; Q_{φ} – інтенсивність сил перерізу у напрямку координати φ , Н/м; M_{φ} , M_x , $M_{x\varphi}$, $M_{\varphi x}$ – інтенсивність моментів згину та крутки нормальних перерізів елемента циліндричної оболонки, Н; τ – дотичні напруження, що діють на стрічку ТСК з боку сипкого вантажу, Н/м².

Вважаємо також малими переміщення точок оболонки u , v та w відповідно вздовж осі симетрії x оболонки стрічки, в напрямку по колу φ , а також по нормалі до поверхні оболонки стрічки z [2]. Виконавши подібні перетворення, а також спрощення прийдемо до рівняння:

$$D_1 \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} - s \frac{\partial^3 v}{\partial x^2 \partial \varphi} - s \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} - \frac{\partial \tau}{\partial \varphi} - q(\varphi) = 0. \quad (2)$$

де $D_1 = D(1 - \nu_1^2)$.

Згідно Власову В.З., враховуючи, що деформація поперечного перерізу стрічки відсутня, маємо

$$\frac{\partial v}{\partial \varphi} = w. \quad (3)$$

Після підстановки в (2) отримаємо

$$D_1 \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} - 2s \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} - \frac{\partial \tau}{\partial \varphi} - q(\varphi) = 0.$$

Після підстановки до останнього рівняння згідно закону Кулона

$$\tau = f_1 q,$$

де f_1 – коефіцієнт тертя сипкого вантажу об стрічку, маємо

$$D_1 \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} - 2s \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} - q_1(\varphi) = 0, \quad (4)$$

$$\text{де } q_1(\varphi) = f_1 \frac{dq}{d\varphi} + q(\varphi).$$

Вважаючи, що стрічка на роlikоопорах є затиснутою, маємо наступні граничні умови:

$$w|_{x=0} = w|_{x=l_p} = 0; \quad \left. \frac{\partial w}{\partial x} \right|_{x=0} = \left. \frac{\partial w}{\partial x} \right|_{x=l_p} = 0, \quad (5)$$

де l_p – відстань між роlikоопорами, м.

Дотичні активні та пасивні навантаження, що діють на стрічку, згідно [4] визначаються як $\tau_a = f_1 q_a$; $\tau_n = f_1 q_n$ за умови $f_1 < f$, де f – коефіцієнт внутрішнього тертя сипкого вантажу.

Асиметрія розподілу навантаження сипкого вантажу по круговому перерізу стрічки q визначалась для двох ділянок перерізу – лівого $0 \leq \varphi \leq \pi - 2\theta_1$ і правого $-(\pi - 2\theta_2) \leq \varphi \leq 0$, де θ_1 і θ_2 – ступінь заповнення лівої та правої сторін перерізу стрічки, рад (див. рис. 1).

Середні значення розподілених нормального q і дотичного τ навантажень з боку сипкого вантажу на стрічку конвеєра визначаються згідно [2] за формулами:

$$q(\varphi) = \begin{cases} 0,5R\gamma(\cos 2\theta_1 + \cos \varphi) \left(2 \cos^2 \varphi + \frac{m^2 + 1}{m} \sin^2 \varphi \right) & \text{при } 0 \leq \varphi \leq \varphi_1; \\ 0,5R\gamma(\cos 2\theta_2 + \cos \varphi) \left(2 \cos^2 \varphi + \frac{m^2 + 1}{m} \sin^2 \varphi \right) & \text{при } \varphi_2 \leq \varphi \leq 0, \end{cases}$$

$$\tau = f_1 \begin{cases} 0,5R\gamma(\cos 2\theta_1 + \cos \varphi) \left(2 \cos^2 \varphi + \frac{m^2 + 1}{m} \sin^2 \varphi \right) & \text{при } 0 \leq \varphi \leq \varphi_1; \\ 0,5R\gamma(\cos 2\theta_2 + \cos \varphi) \left(2 \cos^2 \varphi + \frac{m^2 + 1}{m} \sin^2 \varphi \right) & \text{при } \varphi_2 \leq \varphi \leq 0, \end{cases}$$

де $\varphi_1 = \pi - 2\theta_1$; $\varphi_2 = -(\pi - 2\theta_2)$; m – коефіцієнт рухливості сипкого вантажу, $m = 0,18/f$ [4]; γ – питома вага матеріалу, Н/м³; φ – поточна кутова координата у круговому поперечному перерізі стрічки конвеєра, рад; θ – кут, що визначає ступінь заповнення поперечного перерізу стрічки сипким вантажем, рад (див. рис. 1).

Графік розподілення середнього нормального навантаження q по перерізу стрічки від кута φ представлено на рис. 2.

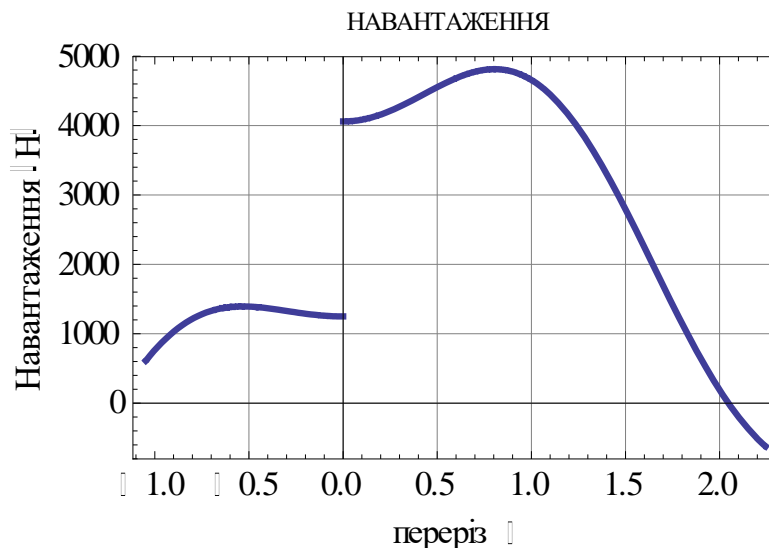


Рисунок 2 – Розподіл нормального навантаження q по перерізу стрічки ТСК

Розв'язок рівняння (4) з граничними умовами (5) після апроксимації має вигляд:

$$w = \frac{q_1}{8l_p s^2} \left[2D_1 l_p (1 - e^{-bx}) + 2l_p s (l_p - x)x - l_p^2 \sqrt{2D_1 s} (l_p^2 + 2l_p x - 2x^2) \right], \quad (6)$$

$$\text{де } b = l_p \sqrt{\frac{2s}{D_1}}; \quad D_1 = \frac{Eh^3}{12}.$$

Розподіл відносної похибки отриманого після апроксимації розв'язку (6) у порівнянні з відомим розв'язком С. П. Тимошенко [2] представлено на рис. 3.

Порівняння розв'язків показало, що відносна похибка не перевищує 1 %, що є достатнім для проведення інженерних розрахунків. У випадку несиметричного розподілу сипкого вантажу по поперечному перерізу стрічки у кожній його точці виникає окружне переміщення v , яке зв'язане з прогином w в тій же точці.

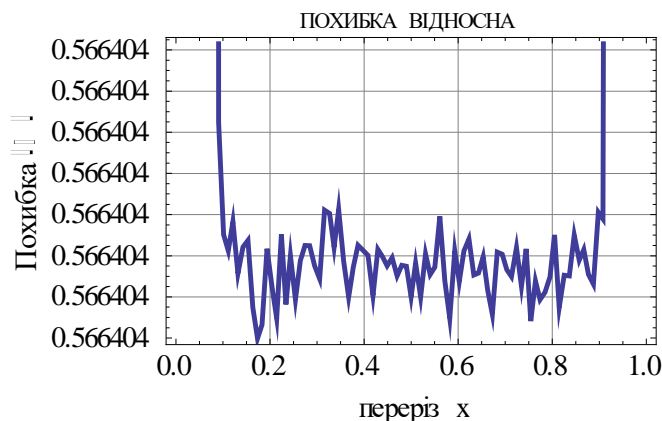


Рисунок 3 – Розподіл відносної похибки отриманого розв'язку

Зв'язок між ними можна встановити, інтегруючи (3):

$$V = \int_0^{\varphi} w d\varphi. \quad (7)$$

При цьому враховується, що при $\varphi = 0$ $v = 0$.

Враховуючи несиметричний характер навантаження поперечного перерізу стрічки, кручення визначалося за формулою

$$V = \int_0^{\varphi_1} w d\varphi + \int_0^{\varphi_2} w d\varphi$$

або

$$V = V_1 + V_2.$$

Скориставшись формулою (12), будемо мати

$$V = B_1(x) \left(\int_0^{\varphi_1} q_1 d\varphi + \int_0^{\varphi_2} q_1 d\varphi \right),$$

де

$$B_1(x) = \frac{1}{8l_p s^2} \left[2D_1 l_p (1 - e^{-bx}) + 2l_p s (l_p - x)x - l_p^2 \sqrt{2D_1 s} (l_p^2 + 2l_p x - 2x^2) \right].$$

Після інтегрування будемо мати:

$$V_1 = B_1 \left[2 \cos 2\theta_1 \left(\frac{1}{2} \sin \varphi_1 \cos \varphi_1 + \varphi_1 \right) + \frac{\cos 2\theta_1}{m} (m^2 + 1) + 2 \cos^3 \varphi_1 + \right. \\ \left. + \frac{\sin^2 \varphi_1 \cos \varphi_1}{m} (m^2 + 1) \left(\frac{1}{2} \sin \varphi_1 \cos \varphi_1 + \varphi_1 \right) + 2 \left(\sin \varphi_1 - \frac{\sin^3 \varphi_1}{3} \right) + \frac{\sin^3 \varphi_1}{m} (m^2 + 1) \right]; \quad (8)$$

$$V_2 = B_1 \left[2 \cos 2\theta_2 \left(\frac{1}{2} \sin \varphi_2 \cos \varphi_2 + \varphi_2 \right) + \frac{\cos 2\theta_2}{m} (m^2 + 1) + 2 \cos^3 \varphi_2 + \right. \\ \left. + \frac{\sin^2 \varphi_2 \cos \varphi_2}{m} (m^2 + 1) \left(\frac{1}{2} \sin \varphi_2 \cos \varphi_2 + \varphi_2 \right) + 2 \left(\sin \varphi_2 - \frac{\sin^3 \varphi_2}{3} \right) + \frac{\sin^3 \varphi_2}{m} (m^2 + 1) \right]. \quad (9)$$

Окружний момент (момент кручення стрічки) у поперечному перерізі стрічки визначався за формулою

$$M_k = -R \int_{s_1}^{s_2} N_{\varphi x} ds, \quad (10)$$

де ds – елементарна дуга контуру стрічки, $ds = R d\varphi$.

Зважаючи на це, (10) матиме вигляд

$$M_k = -R^2 \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} N_{\varphi x} d\varphi. \quad (11)$$

Згідно [2] момент згину $M_\varphi = \frac{D}{R}$. Тоді виконується $\frac{\partial M_\varphi}{\partial \varphi} = 0$

Підставляючи отриманий результат у друге рівняння системи (1), отримаємо

$$N_x \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial N_{\varphi x}}{\partial x} + \tau = 0 \quad (12)$$

або

$$\frac{\partial N_{\varphi x}}{\partial x} = -N_x \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} - \tau = -s \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} - \tau.$$

Після інтегрування по x отримаємо

$$N_{\varphi x} = -s \frac{\partial v}{\partial x} - \tau x + C_1(\varphi). \quad (13)$$

Згідно (5) з урахуванням (3), для симетричного характеру навантажень нормального перерізу стрічки відносно площини, що проходить посередині між ролюкоопорами, сталу $C_1(\varphi)$ в рівнянні (13) визначимо із граничних умов:

$$\left. \frac{\partial v}{\partial x} \right|_{x=0} = \left. \frac{\partial v}{\partial x} \right|_{x=l_p} = 0; \quad N_{\varphi x}|_{x=0} = -N_{\varphi x}|_{x=l_p}. \quad (14)$$

Як результат маємо $C_1 = \tau l_p / 2$ і рівність (14) набуде вигляду

$$N_{\varphi x} = -s \frac{\partial v}{\partial x} - \tau(x - l_p / 2). \quad (15)$$

Рівність (15) з урахуванням (7) матиме вигляд

$$N_{\varphi x} = -s \int_0^{\varphi} \frac{\partial w}{\partial x} d\varphi - \tau(x - l_p / 2).$$

Підставляючи в останню рівність вираз (6), після перетворень отримаємо

$$N_{\varphi x} = -s \frac{dB_1(x)}{dx} \int_0^{\varphi} q_1 d\varphi - \tau(x - l_p / 2). \quad (16)$$

При цьому з (16) виходить, що при $x = 0$ $N_{\varphi x} = \tau l_p / 2$ і при $x = l_p$ $N_{\varphi x} = -\tau l_p / 2$.

Підставляючи (16) в (11), після інтегрування та застосування методу послідовної апроксимації [5] отримаємо момент крутки в нормальному перерізі стрічки ТСК на роликоопорі, тобто при $x = 0$, і початкової стадії заповнення стрічки $\theta_{10} = \theta_{20} = \pi/6$ у вигляді:

$$M_k = A_1 \gamma R^3 l_p f_1^{0,65} (\theta_1^{0,49} - \theta_2^{0,49}), \quad (17)$$

де $A_1 = 0,914$.

Визначимо момент, що виникає на роликоопорі від сил тертя стрічки об ролики, за формулою

$$M_T = l_p R \cos \alpha \int_{s_1}^{s_2} f_2 q(\varphi) ds$$

або

$$M_T = l_p R^2 \cos \alpha \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} f_2 q(\varphi) d\varphi, \quad (18)$$

де f_2 – коефіцієнт тертя стрічки об ролики конвеєра, який залежить від кута нахилу роликоопори до вертикальної площини; α – кут відхилення роликоопори від вертикальної площини, яку утворює площина поперечного перерізу стрічки у напрямку її руху, град.

Згідно [3] максимальне значення коефіцієнту тертя f_2 співпадає з коефіцієнтом сухого тертя стрічки об ролик і виникає при $\alpha = 1-2^\circ$.

Після підстановок, інтегрування та апроксимації за умов початкового ступеня заповнення стрічки $\theta_{10} = \theta_{20} = \pi/6$ отримаємо

$$M_T = A_2 \gamma R^3 l_p f^{0,38} f_2 \cos \alpha \left(\frac{1}{\theta_1^{0,39}} + \frac{1}{\theta_2^{0,39}} \right), \quad (19)$$

де $A_2 = 4,23$.

На рисунку 4 наведено графік залежності моменту крутки M_k від відстані нормального перерізу стрічки x до роликоопори ТСК.

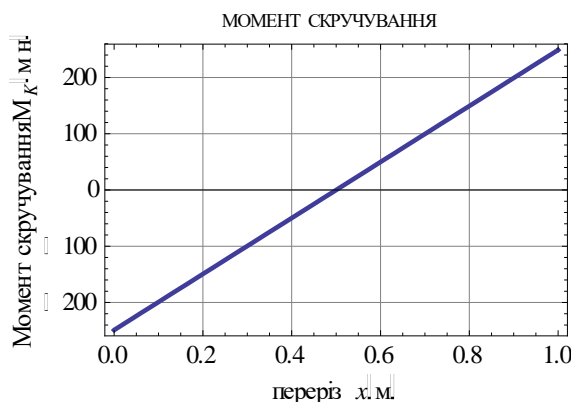


Рисунок 4 – Розподіл моменту скручування між роликоопорами

Побудова графіку відбувалась за такими даними: $E = 1,2 \cdot 10^6$ Н/м²; $\nu_1 = 0,4$; $h = 0,0134$ м; $l_p = 1,0$ м; $s = 7957,75$ Н/м; $R = 0,3$ м; $\gamma = 12000$ Н/м³; $f_1 = 0,6$; $f_2 = 0,5$; $\theta_1 = \pi/6$; $\theta_2 = \pi/6$.

Із графіка (див. рис. 4) видно, що зі збільшенням відстані перерізу стрічки від роликоопори величина моменту кручення збільшується від від'ємних значень до додатних за лінійним законом. При цьому графік симетричний відносно середини відстані між роликоопорами і в перерізі стрічки посередині між роликоопорами момент крутки дорівнює нулю.

У нашому випадку критерієм стійкості стану поперечного перерізу стрічки ТСК за умов повороту роликоопори є рівність моментів крутки та тертя стрічки об роликоопору, тобто:

$$M_K = M_T.$$

З останньої рівності виходить, якщо завантаження стрічки симетричне, тобто $M_K = 0$, то має місце нерівність

$$M_T > M_K$$

і стрічка з вантажем завжди нестійка. Іншими словами, у разі симетричного навантаження поперечного перерізу стрічки ТСК за умов повороту роликоопори величина її крутки безперервно збільшується, що може привести до відмови роботи конвеєра. З іншого боку, у разі несиметричного навантаження поперечного перерізу стрічки і за відсутності повороту роликоопори, тобто $M_T = 0$, має місце нерівність $M_T < M_K$ і стрічка з вантажем також нестійка.

В цьому випадку стійкого стану стрічки з вантажем можна досягти шляхом повороту площини роликоопори на деякий кут.

Висновки:

– розроблено математичну модель напружено-деформованого стану стрічки ТСК з вантажем при несиметричному його розташуванні по поперечному перерізу;

– на базі розробленої моделі визначено величину кручення нормального перерізу стрічки; момент кручення поперечного перерізу стрічки від сил ваги вантажу і деформації стрічки і момент кручення стрічки від сил тертя стрічки об ролик конвеєра;

– встановлено лінійну залежність моменту кручення, обумовленого силою ваги і деформацією вантажу, від кроку розстановки роликоопор і кубічну залежність від радіуса згорнутої стрічки, а також пряму залежність від питомої ваги вантажу, що транспортується, і коефіцієнту тертя вантажу об стрічку. При цьому чим більша ступінь заповнення вантажем стрічки, тим величина моменту кручення стрічки, обумовленого силами ваги вантажу і деформацією, менше;

– встановлено кубічну залежність моменту кручення, обумовленого силами тертя стрічки об ролик роликоопор, від радіуса трубчастої стрічки і лінійну залежність від відстані між роликоопорами, коефіцієнта тертя стрічки об ролик і питомої ваги вантажу. При цьому, чим більший коефіцієнт внутрішнього тертя вантажу і ступінь заповнення вантажем стрічки, тим момент кручення більший;

– встановлено критерій стійкості поперечного перерізу стрічки ТСК за умов її руху по роликоопорах.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Циглер, М. Подземная эксплуатация конвейера со сворачиваемой лентой на шахте «Луизенталь» / М. Циглер, Х.-Й. Буссе // Глюкауф. – 1992. – №3. – С. 27–33.
2. Тимошенко, С. П. Теория упругости / С. П. Тимошенко, Дж. Гудьер. – М.: Наука, 1975. – 576 с.
3. Кирия, Р. В. Математическое моделирование напряженно-деформированного состояния линейной части трубчатого конвейера // Р. В. Кирия, Н. Г. Ларионов // Геотехническая механика: Межвед. сб. научн. тр. / ИГТМ НАН Украины. – Днепр, 2016 – Вып. 131. – С. 152–164.
4. Зенков, Р. Л. Механика насыпных грузов / Р. Л. Зенков. – М.: Машиностроение, 1984. – 251 с.
5. Ларіонов, Г.І. Оцінювання конструктивних параметрів анкерного кріплення / Г.І. Ларіонов. – Дніпропетровськ: Національна металургійна академія України, 2011. – 286 с.

REFERENCES

1. Tsigler, M. and Busse, X. (1992), "Underground exploitation of conveyer with the displaced ribbon on the mine «Luizental»", Gliukauf, no. 3, pp. 27–33.
2. Timoshenko, S. P. and D. Gudier, S. (1975), *Teoriya uprugosti* [Elasticity], Nauka, Moscow, SU.
3. Kiriya, R.V. and Larionov, M. G. (2016), "Mathematic modeling of linear belt item stress strain state tubular conveyor", *Geo-Technical Mechanics*, no. 131, pp. 158–164.
4. Zenkov, R.L. (1984), *Mekhanika nasypanykh грузов* [Soil mechanics], Mashinosroenie, Moscow, SU.
5. Larionov, G. I. (2011), *Otsiniuvannia konstruktyvnykh parametriv ankernogo kriplennia* [The anchor design parameter evaluating], The National Metallurgical Academy of Ukraine, Dnepropetrovsk, Ukraine.

Про авторів

Ларіонов Григорій Іванович, доктор технічних наук, старший науковий співробітник, старший науковий співробітник відділу фізико-механічних основ гірничого транспорту, Інститут геотехнічної механіки ім. М. С. Полякова Національної академії наук України (ІГТМ НАН України), Дніпро, Україна, larionovgrigoriydn@gmail.com

Кірія Руслан Вісаріонович, кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, завідувач відділу фізико-механічних основ гірничого транспорту, Інститут геотехнічної механіки ім. М. С. Полякова Національної академії наук України (ІГТМ НАН України), Дніпро, Україна, kiriya_igtm@ukr.net

About the authors

Larionov Grigoriy Ivanovich, Doctor of Technical Sciences (Ph.D), Senior Researcher, Senior Researcher in Department of Mining Transport Physics and Mechanics, Institute of Geotechnical Mechanics named by N. Poljakov of National Academy of Sciences of Ukraine (IGTM NASU), Dnipro, Ukraine, larionovgrigoriydn@gmail.com

Kiriya Ruslan Vissarionovich, Candidate of Technical Sciences (Ph.D), Senior Researcher, Head of the Department of Mining Transport Physics and Mechanics, Institute of Geotechnical Mechanics named by N. Poljakov of National Academy of Sciences of Ukraine (IGTM NASU), Dnipro, Ukraine, kiriya_igtm@ukr.net

Аннотация. Основными недостатками трубчатых конвейеров (ТК) при эксплуатации в условиях угольных шахт, как свидетельствует практика, есть потеря устойчивости круговой формы поперечного сечения ленты. Это приводит не только к пересыпям груза, но и к нерасчетным взаимодействиям с роlikоопорами ТК. В результате такого взаимодействия часто наблюдались продольные разрезы ленты и, как следствие, невозможность ее дальнейшей эксплуатации. Отсутствие математической модели процесса потери устойчивости формы поперечного сечения ленты, учитывая сложный характер исходных уравнений упругих оболочек, не позволило надлежащим образом исследовать эту проблему.

В результате проведенных исследований разработана математическая модель напряженно-деформированного состояния ленты ТСК с грузом при несимметричном его расположении в поперечном сечении; на основе разработанной модели определена величина кручения нормального сечения ленты; момент кручения поперечного сечения ленты от сил веса груза и деформации ленты и момент кручения ленты от сил трения ленты о ролик конвейера; установлена линейная зависимость момента кручения, обусловленного силой веса и деформацией груза, от шага расстановки роlikоопор и кубическая зависимость от радиуса свернутой ленты, а также прямая зависимость от удельного веса транспортируемого груза и коэффициента трения груза о ленту. При этом чем более больше степень заполнения грузом ленты, тем величина момента кручения ленты, обусловленного силами веса груза и деформацией, меньше; установлена кубическая зависимость момента кручения, обусловленного силами трения ленты о ролик роlikоопор, от радиуса трубчатой ленты, и линейная зависимость от расстояния между роlikоопорами, коэффициента трения ленты о ролик и удельного веса груза. При этом, чем больше коэффициент внутреннего трения груза и степень заполнения грузом ленты, тем больше момент кручения; установлен критерий стойкости поперечного сечения ленты ТСК при условиях ее движения по роlikоопорам.

Ключевые слова: трубчатый ленточный конвейер, напряженно-деформированное состояние, общие уравнения упругой оболочки, упрощение, аналитическое решение, крутка, потеря устойчивости.

Annotation. According to practical experience, main drawback of tubular conveyors (TC) when they operate in the coal mine is loss of the belt circular cross-section stability, which results not only in the freight pouring-out but also in abnormal interaction with the TC roller carriages, longitudinal cuts in the belts and, as consequence, impossibility of their further usage. Absence of mathematical model of process of cross-section stability losing did not allow investigating the problem properly due to complexity of initial elastic shell equations.

As a result of conducted researches the mathematical model of the tensely-deformed state of the TC conveyor belt with a load at asymmetrical location in the transversal section is developed; on the basis of the developed model the size of twisting of normal section of conveyor belt is certain; moment of twisting of normal section of conveyor belt from forces of weight of load and deformation of conveyor belt and moment of twisting of conveyor belt from friction forces of conveyor belt at the conveyor guide; linear dependence of moment of twisting, conditioned by force of weight and load deformation from the step of placing of idlers and cube dependence from the radius of convolute conveyor belt, and also straight dependence on specific gravity of the transported load and coefficient of friction of load at a conveyor belt, is set. At it than more anymore degree of filling by the load of conveyor belt, that the size of moment of twisting of conveyor belt, conditioned by forces of weight of load and deformation, less; cube dependence of moment of twisting is set by forces of friction of conveyor belts at the rollers of idlers, from the radius of tubular conveyor belt, and linear dependence from distance between idlers, coefficient of friction of conveyor belts at rollers and specific gravity of load. Thus, than anymore coefficient of internal friction of load and degree of filling by the load of conveyor belt, the anymore moment of twisting; determinated criterion of firmness of transversal section of the TC conveyor belt on conditions of its motion on idlers.

Keywords: tubular belt conveyor, stress-strain state, general elastic shell equations, simplification, analytical solving, torsion parameter, stability loss.

Стаття надійшла до редакції 10.02.2018.

Рекомендовано до друку д-ром техн. наук В.Ф. Монастирським.