УДК [622.647.2.057:621.867.52.6]:539.5 https://doi.org/10.33271/crpnmu/68.124

© Р.В. Кірія[1], А.М. Смірнов[1], Л.А. Новіков[1]
[1] Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України, Дніпро, Україна

ВИЗНАЧЕННЯ СИЛИ ОПОРУ РУХУ СТРІЧКИ ПО СТАВУ ТРУБЧАСТОГО СТРІЧКОВОГО КОНВЕЄРА

© R. Kiriia[1], A. Smirnov[1], L. Novikov[1]
[1] Institute of Geotechnical Mechanics named by N. Poljakov of National Academy of Sciences of Ukraine, Dnipro, Ukraine

DETERMINING THE MOTION RESISTANCE FORCE TO BELT ON LOAD BEARING STRUCTURE OF A TUBULAR BELT CONVEYOR

Метою роботи є дослідження впливу основних параметрів трубчастого стрічкового конвеєра на опір руху стрічки по роликоопорах конвеєра.

Методи дослідження. Для вирішення поставлених завдань у роботі використовувалися методи теорії тонких пружних оболонок та методи механіки сипких середовищ.

Результати. Аналіз конструктивних особливостей промислових конвеєрів показує, що сила опору руху стрічки по роликоопорах трубчастого конвеєра більше ніж у стрічкового конвеєра з жолобчастою стрічкою, що пов'язано с впливом складової сили опору, викликаної деформацією вантажу. Розроблено математична модель опору руху стрічки по роликоопорах трубчастого стрічкового конвеєра. Отримана аналітична залежність сили опору руху стрічки по роликоопорах від параметрів конвеєра, властивостей стрічки та вантажу, а також від ступеня заповнення стрічки вантажем. Наведено результати розрахунку коефіцієнту опору руху стрічки від ступеня заповнення при різній силі натягу стрічки, радіусу роликів і коефіцієнту внутрішнього тертя вантажу. Встановлено, що зі збільшенням ступеня заповнення трубчастого стрічкового конвеєра, натягу стрічки та радіусу роликів, коефіцієнт опору руху стрічки зменшується, а при збільшенні коефіцієнта внутрішнього тертя сипучого вантажу та циліндричної жорсткості стрічки, навпаки, збільшується.

Наукова новизна. Вперше на основі теорії тонких пружних циліндричних оболонок та механіки сипких середовищ розроблена математична модель опору руху стрічки по роликоопорах трубчастого стрічкового конвеєра. Встановлено аналітична залежність сили опору руху стрічки по роликоопорах від основних параметрів конвеєра, стрічки та властивостей сипучого вантажу.

Практична значимість. Результати досліджень дозволяють в залежності від основних параметрів конвеєра, властивостей стрічки і сипучого вантажу, що транспортується, визначити опір руху стрічки по роликоопорах трубчастого стрічкового конвеєра. Це дозволяє за рахунок вибору параметрів роликоопор і стрічки зменшити потужність приводу.

Ключові слова: *трубчастий конвеєр, стрічка, сила опору, роликоопора, вантаж.*

Вступ. В даний час, у зв'язку з посиленням вимог до екології, отримали застосування у промисловості конвеєри з трубчастою стрічкою. Це дозволяє зменшити довжину конвеєрних лінії і відповідно знизити капітальні витрати.

Трубчасті стрічкові конвеєри широко впроваджуються та розробляються зарубіжними компаніями: "KOCH" (Німеччина), "NOYES" (Франція), "KRUPP ROBINS" (США), "DOSCO" (Великобританія), "NOVA" (Італія) та іншими [1].

Перевагами трубчатих конвеєрів в порівнянні з іншими видами стрічкових конвеєрів є відсутність безпосереднього контакту вантажу з навколишнім середовищем, можливість транспортувати вантаж по криволінійних трасах з кутами нахилу траси до 30° без проміжних перевантажувальних вузлів. К основнім недолікам трубчастих стрічкових конвеєрів відносяться збільшення в 1,5-2 рази опору руху стрічки по роликоопорах става порівняно з стрічковим конвеєром з жолобчастою стрічкою, а також застосування дорогої спеціальної стрічки. При цьому товщина стрічки залежить від довжини конвеєра, що підвищує експлуатаційні витрати.

Актуальність досліджень. Недостатньо ефективне використання трубчастих стрічкових конвеєрів у промисловості пов'язане з відсутністю науково обґрунтованих методів розрахунку їх основних параметрів [2, 3] з урахуванням з урахуванням пружних властивостей стрічки та фізико-механічних властивостей сипучого вантажу. Зокрема це відноситься до розрахунку максимально допустимої відстані між роликоопорами трубчастого конвеєра, а також визначення складової сили опору руху стрічки по роликоопорах, яка викликана деформацією сипучого вантажу [3, 4, 5].

Основними складовими сили опору руху стрічки по роликоопорах є складові від обертання роликів, їх вдавлювання у стрічку, від вигину стрічки і деформації вантажу [3, 5]. При цьому на складову сили опору від деформації вантажу припадає від 50 до 60% загальної сили опору.

Визначення сили опору руху стрічки по ставу трубчастого конвеєра в залежності від його основних параметрів дозволяє розрахувати потужність приводу у даних умовах експлуатації, а також вибрати раціональні параметри трубчастого конвеєра і стрічки при проектуванні. Це дозволяє знизити енерговитрати та підвищити ефективність транспортування сипучих вантажів.

Метою роботи є дослідження впливу основних параметрів трубчастого стрічкового конвеєра на опір руху стрічки по роликоопорам конвеєра.

Викладення основного матеріалу. Представимо ділянку стрічки трубчастого конвеєра, розташовану між роликоопорами, як тонку пружну циліндричну оболонку, защемлену між роликоопорами. При цьому сипкий вантаж симетрично розташований у перерізі стрічки (рис. 1)

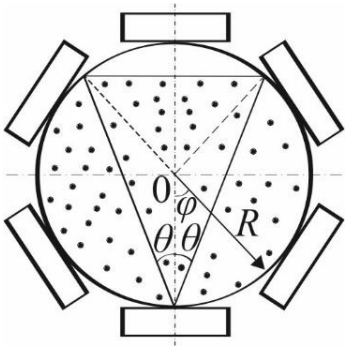

Рис. 1. Нормальний переріз стрічки трубчастого конвеєра: φ – поточна кутова координата точок циліндричної оболонки, рад; θ – кут незаповнення перерізу трубчастої стрічки сипким вантажем, рад; R – радіус трубчастої стрічки, м

Для визначення сил опору руху стрічки по роликоопорах трубчастого конвеєра, обумовлених деформацією вантажу, необхідно дослідити напружено-деформований стан стрічки. Поставлену задачу розіб'ємо на дві: зовнішню та внутрішню.

У зовнішній задачі розглянемо напружено-деформований стан стрічки та сипкого вантажу на проміжку між роликоопорами трубчастого конвеєра (рис. 2)

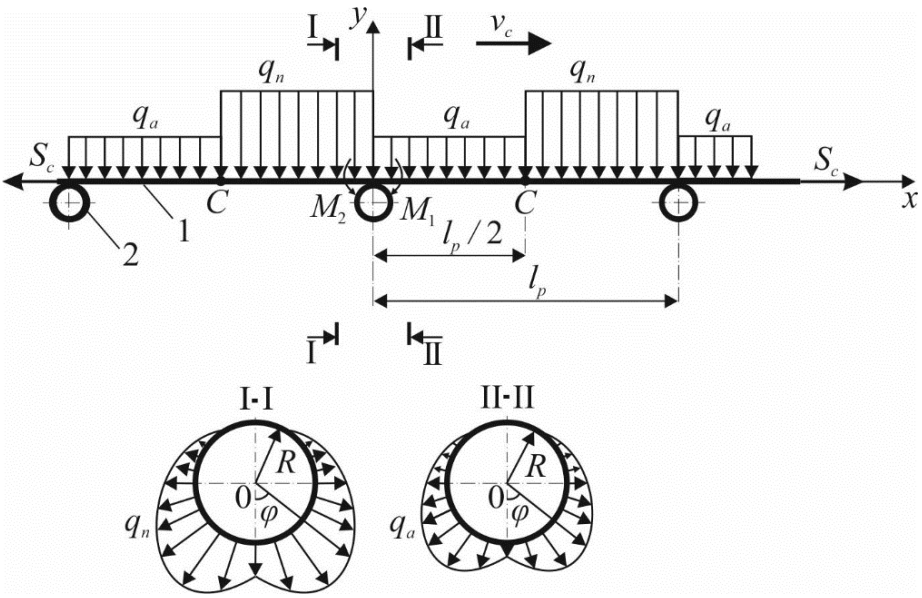

Рис. 2. Розрахункова схема визначення сили опору руху стрічки по роликоопорах трубчастого конвеєра від деформації вантаж:
M_1, M_2 – інтенсивності згинальних моментів поблизу точки контакту стрічки з роликом, відповідно праворуч і ліворуч, Н; v_c – швидкість руху стрічки, м/с; q_a – інтенсивність розподіленого навантаження, що діє на стрічку з боку вантажу на ділянці її розвалу за роликоопорами, Н/м^2; q_n – інтенсивність розподіленого навантаження, що діє на стрічку з боку вантажу на ділянці її стиснення перед роликоопорами, Н/м^2; S_c – сила натягу стрічки, Н; l_p – відстань між роликоопорами, м.

У зовнішній задачі припустимо, що деформація, яка розтягує поперечний переріз стрічки, дорівнює нулю, тобто $\varepsilon_\varphi = 0$. Тоді за аналогією з [5] рівняння прогинів трубчастої стрічки між роликоопорами конвеєра (рис. 2) можна подати у вигляді:

$$D_1 \frac{\partial^4 w_1}{\partial x^4} - 2s \frac{\partial^2 w_1}{\partial x^2} - q_a = 0, \quad 0 \le x \le \frac{l_p}{2}; \tag{1}$$

$$D_1 \frac{\partial^4 w_2}{\partial x^4} - 2s \frac{\partial^2 w_2}{\partial x^2} - q_n = 0, \quad \frac{l_p}{2} \le x \le l_p, \tag{2}$$

де $D_1 = D(1 - \nu_1^2) = Eh^3/12$; D – циліндрична жорсткість стрічки, Н·м; h – товщина стрічки конвеєра, м; E – модуль пружності матеріалу стрічки, Н/м^2; ν_1 – коефіцієнт Пуассона стрічки; $s = S_c/B$ – інтенсивність натягів, що розтягують, Н/м;

B – ширина стрічки ($B \approx 2\pi R$), м; w_1 – прогин стрічки в інтервалі її розвалу після проходження роликоопори, м; w_2 – прогин стрічки на ділянці її стиснення на роликоопорі, м.

На рис. 2 у точці C посередині між роликоопорами відбувається стрибок нормального навантаження на стрічку трубчастого конвеєра від активного q_a до пасивного q_n значень, обумовлених розвалом та сходженням стрічки [5].

Величини активного та пасивного навантажень стрічки трубчастого конвеєра при симетричному розташуванні вантажу в перерізі стрічки згідно [5] визначаються за формулами:

$$q_a = R\gamma\left(\cos^2\varphi + m\cdot\sin^2\varphi\right)\left(\cos 2\theta + \cos\varphi\right), \quad 0 \le \varphi \le \pi - 2\theta; \tag{3}$$

$$q_n = R\gamma\left(\cos^2\varphi + m^{-1}\sin^2\varphi\right)\left(\cos 2\theta + \cos\varphi\right), \quad -\left(\pi - 2\theta\right) \le \varphi \le 0, \tag{4}$$

де m – коефіцієнт рухливості сипкого вантажу, що визначається як [3]:

$$m = 1 + 2f^2 - 2f\sqrt{1+f^2}, \tag{5}$$

де f – коефіцієнт внутрішнього тертя сипкого вантажу.

Припустимо, що стрічка жорстко притиснута вантажем до роликоопор, тоді граничні умови для рівнянь (1), (2) набудуть вигляду:

$$w_1 = \left.\frac{\partial w_1}{\partial x}\right|_{x=0} = 0; \;\; w_2 = \left.\frac{\partial w_2}{\partial x}\right|_{x=l_p} = 0. \tag{6}$$

Умови в точці переходу активного розподіленого навантаження до пасивного (рис. 2) мають вигляд:

$$x = l_p; \quad w_1 = w_2; \quad \frac{\partial w_1}{\partial x} = \frac{\partial w_2}{\partial x}; \quad \frac{\partial^2 w_1}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 w_2}{\partial x^2}; \quad \frac{\partial^3 w_1}{\partial x^3} = \frac{\partial^3 w_2}{\partial x^3}, \tag{7}$$

де $w_1 = w_1$ – відповідає безперервності прогину стрічки у точці C (C – точка переходу активної розподіленої навантаження в пасивну); $\partial w_1/\partial x = \partial w_2/\partial x$ – відповідає безперервності кутів нахилу дотичної (гладкості прогину стрічки) у точці C; $\partial^2 w_1/\partial x^2 = \partial^2 w_2/\partial x^2$ – відповідає безперервності згинальних моментів у точці C; $\partial^3 w_1/\partial x^3 = \partial^3 w_2/\partial x^3$ – відповідає безперервності перерізувальних сил у точці C.

Так як розмір зони контакту стрічки з роликами набагато менше відстані між роликоопорами, а натяг стрічки набагато більше за згинальну жорсткість, то в першому наближенні напружені стани визначаються розподіленим активним і пасивним навантаженням, відповідно праворуч і ліворуч від точки контакту.

При цьому впливи навантажень вдалині від точки контакту незначні. Отже, при визначенні напруженого стану поблизу точки контакту стрічки з роликом достатньо вирішити задачу з розподіленим активним навантаженням праворуч вздовж усього інтервалу $0 \le x \le l_p/2$, а також розподіленим пасивним навантаженням зліва в тому ж інтервалі.

На підставі викладеного вище, розрахункову схему задачі визначення напружено-деформованого стану стрічки трубчастого конвеєра (рис. 2) можна замінити в першому наближенні розрахунковою схемою, представленою на рис. 3.

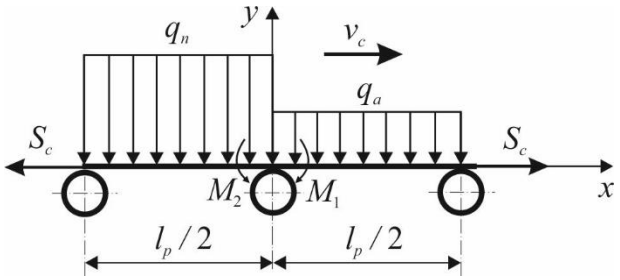

Рис. 3. Розрахункова схема визначення сили опору руху стрічки по роликоопорах трубчастого конвеєра від деформації вантажу у разі активного та пасивного навантажень, розподілених вздовж всього інтервалу між роликоопорами відповідно праворуч і ліворуч від точки контакту

У цьому випадку рівняння прогинів трубчастої стрічки між роликоопорами праворуч і ліворуч від точки контакту з роликами відповідно мають вигляд (рис. 3):

$$D_1 \frac{\partial^4 w_1}{\partial x^4} - 2s \frac{\partial^2 w_1}{\partial x^2} - q_a = 0, \quad 0 \le x \le l_p/2; \tag{8}$$

$$D_1 \frac{\partial^4 w_2}{\partial x^4} - 2s \frac{\partial^2 w_2}{\partial x^2} - q_n = 0, \quad -l_p/2 \le x \le 0. \tag{9}$$

При цьому граничні умови (6) набудуть наступного вигляду.

Для правого інтервалу $0 \le x \le l_p/2$:

$$w_1 = \left.\frac{\partial w_1}{\partial x}\right|_{x=0} = 0; \; w_1 = \left.\frac{\partial w_1}{\partial x}\right|_{x=l_p/2} = 0. \tag{10}$$

Для лівого інтервалу $-l_p/2 \le x \le 0$:

$$w_2 = \left.\frac{\partial w_2}{\partial x}\right|_{x=-l_p/2} = 0; \; w_2 = \left.\frac{\partial w_2}{\partial x}\right|_{x=0} = 0. \tag{11}$$

Відповідно до [6] рішення рівняння (8) для величини прогину стрічки w_1 за граничних умов (10) набуде вигляду:

$$w_1 = \frac{q_a l_p^2}{8s \cdot u \cdot \mathrm{th}u} \left\{ \frac{\mathrm{ch}\left[u\left(1 - 4x/l_p\right)\right]}{\mathrm{ch}u} - 1 \right\} + \frac{q_a \left(l_p - 2x\right)x}{8s}, \quad 0 \le x \le \frac{l_p}{2}, \tag{12}$$

де $u = 0{,}25 l_p \sqrt{2sD_1^{-1}}$ – зміщення вздовж осі $0X$.

Для інтенсивності згинального моменту праворуч від точки контакту стрічки з роликом (рис. 3) отримаємо у разі $x = 0$:

$$M_1 = D_1 \frac{\partial^2 w_1}{\partial x^2}\bigg|_{x=0} = \frac{q_a l_p^2}{48} \frac{3(u - \text{th}u)}{u^2 \text{th}u}. \tag{13}$$

Оскільки $S_c > D$ та $u \to \infty$, то $\text{th}\, u \to 1$. Тоді вираз (13) можна приблизно представити у вигляді:

$$M_1 = \frac{q_a l_p^2}{4u} = \frac{q_a l_p}{4} \sqrt{\frac{D_1}{2s}}. \tag{14}$$

Вирішуючи рівняння (9), аналогічно отримаємо співвідношення для інтенсивності згинального моменту ліворуч від точки контакту стрічки з роликом (рис. 3) при $x = 0$:

$$M_2 = \frac{q_n l_p}{4} \sqrt{\frac{D_1}{2s}}. \tag{15}$$

З формул (14), (15) слід, що інтенсивність згинального моменту у стрічці трубчастого конвеєра при переході через точку контакту стрічки з роликами роликоопор змінюється стрибкоподібно.

Розглянемо внутрішню задачу контакту трубчастої стрічки з роликами роликоопор. Відповідно до принципу відносності в механіці задачу руху стрічки по роликоопорах трубчастого конвеєра замінимо задачею кочення роликів по трубчастій стрічці.

Розглянемо сили та моменти, що діють у зоні контакту стрічки з роликами (рис. 4).

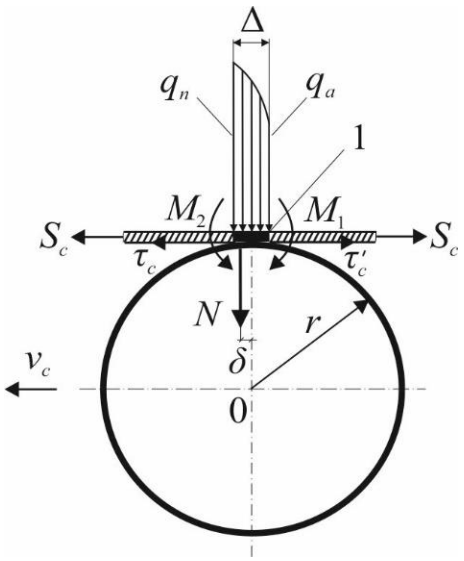

Рис. 4. Розрахункова схема кочення ролика по в'язко-пружній площині:
1 – зона контакту ролика з трубчастою стрічкою; N – рівнодіюча сил, що діють на ролик у зоні контакту з боку вантажу, Н; δ – зміщення рівнодіючої сил N щодо вертикальної осі симетрії, м; r – радіус ролика, м; τ_c' – інтенсивність сили опору коченню роликів стрічкою трубчастого конвеєра, Н/м;
Δ – ширина зони контакту, м

З рис. 4 видно, що в зоні контакту ролика з в'язко-пружною площиною виникає стрибок розподіленого навантаження, що в свою чергу зумовлює виникнення згинальних моментів.

Умова рівноваги моментів сил, що діють на ролик з боку вантажу та стрічки, має вигляд:

$$\tau_c^{'} \cdot r - N \cdot \delta + M_1 - M_2 = 0. \tag{16}$$

Відповідно до принципу відносності в механіці $\tau_c^{'} = \tau_c$, де τ_c – інтенсивність сили опору руху стрічки трубчастого конвеєра по роликоопорі.

Рівнодійну сил, що діють на ролик у зоні контакту (рис. 4), можна наближено визначити за формулою:

$$N \approx 0{,}5\Delta(q_a + q_n). \tag{17}$$

Оскільки величина δ мала і $\delta < \Delta$, то моментом рівнодіючої сил $N \cdot \delta$ можна знехтувати. Тоді рівність (16) набуде вигляду:

$$\tau_c \cdot r + M_1 - M_2 = 0. \tag{18}$$

З виразу (18) отримаємо:

$$\tau_c = r^{-1}(M_2 - M_1). \tag{19}$$

Підставляючи (14), (15) у (19), отримаємо:

$$\tau_c = (q_n - q_a) l_p (4r)^{-1} \sqrt{D_1 (2s)^{-1}}. \tag{20}$$

Сила опору руху стрічки по роликоопорі трубчастого конвеєра визначиться з інтеграла, взятого по контуру поперечного перерізу конвеєрної стрічки на роликоопорі:

$$F_c = 2\int_0^{\varphi} \tau_c R d\varphi. \tag{21}$$

Підставляючи (20) у (21), отримаємо:

$$F_c = 2\int_0^{\varphi} (q_n - q_a) l_p (4r)^{-1} \sqrt{D_1 (2s)^{-1}} R d\varphi. \tag{22}$$

З урахуванням (3), (4) вираз (22) набуде вигляду:

$$F_c = R^2 l_p \gamma (2r)^{-1} \left(m^{-1} - m\right) \sqrt{D_1 (2s)^{-1}} \int_0^{\pi - 2\theta} \sin^2 \varphi (\cos 2\theta + \cos\varphi) d\varphi. \tag{23}$$

В результаті інтегрування (23), з урахуванням (5), після перетворень отримаємо:

$$F_c = \frac{R^2 l_p \gamma}{2r} \left(4 f \sqrt{1 + f^2}\right) \sqrt{\frac{D_1}{2s}} \left[\frac{\cos 2\theta}{2} \left(\pi - 2\theta + \frac{1}{2} \sin 4\theta \right) + \frac{\sin^3 2\theta}{3} \right]. \tag{24}$$

Коефіцієнт опору руху стрічки по роликоопорах визначається за формулою:

$$k_\partial = F_c\left(q_m l_p\right)^{-1}, \tag{25}$$

де $q_m = \gamma\pi R^2$ – погонна вага вантажу, Н/м; γ – об'ємна вага сипучого вантажу, Н/м^3.

Підставляючи (24) у (25), отримаємо:

$$k_\partial = \frac{2f\sqrt{1+f^2}}{\pi r}\sqrt{\frac{D_1 B}{2S_c}}\left[\frac{\cos 2\theta}{2}\left(\pi - 2\theta + \frac{1}{2}\sin 4\theta\right) + \frac{\sin^3 2\theta}{3}\right]. \tag{26}$$

З виразу (26) випливає, що коефіцієнт опору руху не залежить від радіусу трубчастої стрічки. При цьому зі збільшенням радіусу роликів та натягу стрічки, коефіцієнт опору руху стрічки по роликоопорах трубчастого конвеєра зменшується, а зі збільшенням згинальної жорсткості стрічки, навпаки, зростає.

Розглянемо окремий випадок повного заповнення сипким вантажем нормального перерізу стрічки трубчастого конвеєра. В цьому випадку маємо: $\theta = 0$ ($\varphi = \pi$). Після підстановки $\theta = 0$ у співвідношення (26) отримаємо:

$$k_\partial = r^{-1} f\sqrt{1+f^2}\sqrt{D_1 B\left(2S_c\right)^{-1}}. \tag{27}$$

На рис. 5 представлено графіки залежності коефіцієнта опору руху стрічки по роликоопорах трубчастого конвеєра k_∂ від кута θ при різних значеннях натягу стрічки конвеєра S_c. При цьому параметри стрічки, роликів та вантажу набувають значення: $B = 2$ м; $r = 0{,}1$ м; $D_1 = 2$ Н·м; $f = 0{,}7$.

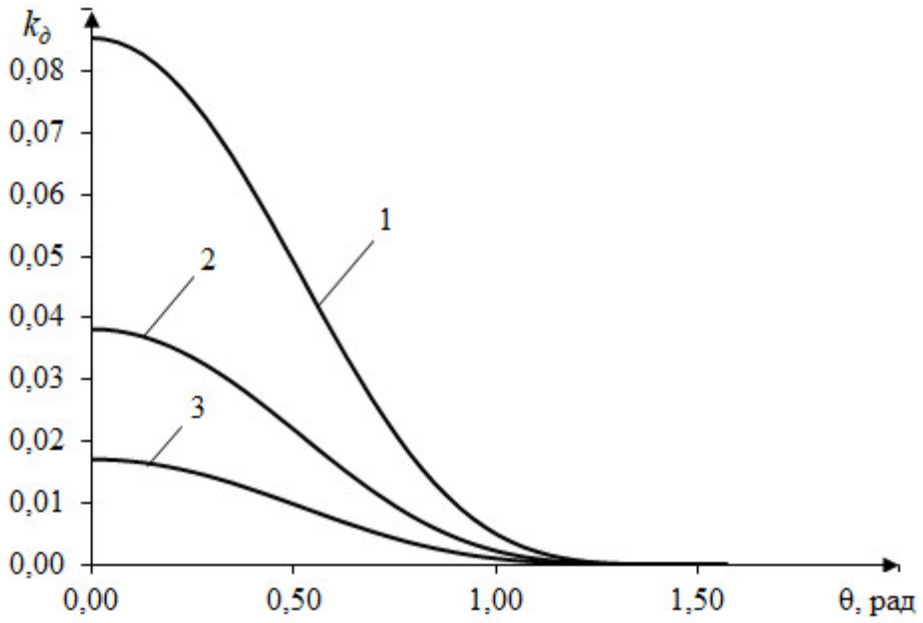

Рис. 5. Залежність коефіцієнта опору руху стрічки по роликоопорах трубчастого конвеєра від ступеня незаповнення при різній силі натягу стрічки: 1 – S_c = 20000 Н; 2 – S_c = 100000 Н; 3 – S_c= 500000 Н

На рис. 6 представлено графіки залежності коефіцієнта опору руху стрічки по роликоопорах трубчастого конвеєра k_∂ від кута θ при різних радіусах роликів r. При цьому параметри стрічки та вантажу приймають значення: B = 2 м; D_1 = 2 Н·м; S_c = 100 000 Н; f = 0,7.

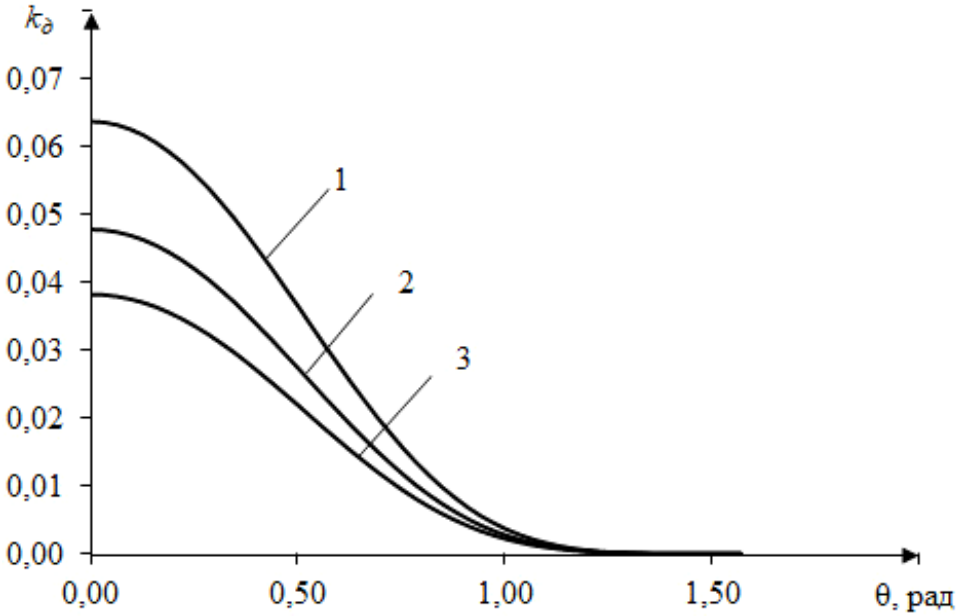

Рис. 6. Залежність коефіцієнта опору руху стрічки по роликоопорах трубчастого конвеєра від ступеня незаповнення при різному радіусі роликів: 1 – r = 0,06 м; 2 – r = 0,08 м; 3 – r = 0,1 м

На рис. 7 представлено графіки залежності коефіцієнта опору руху стрічки по роликоопорах трубчастого конвеєра k_∂ від кута θ при різних значеннях коефіцієнта внутрішнього тертя вантажу f. При цьому параметри стрічки та роликів набувають значення: B = 2 м; D_1 = 2 Н·м; S_c = 100000 Н; r = 0,1 м.

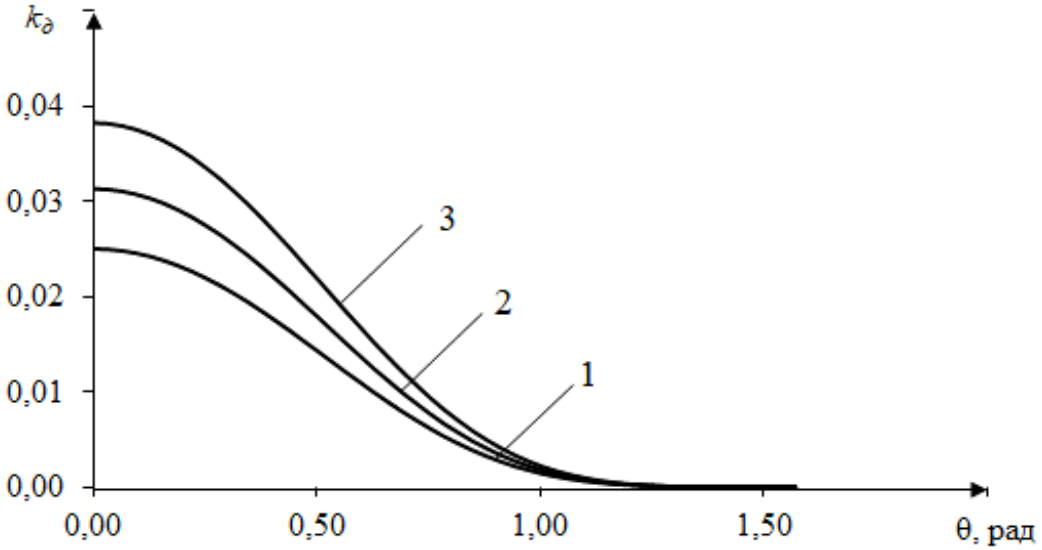

Рис. 7. Залежність коефіцієнта опору руху стрічки по роликоопорах трубчастого конвеєра від ступеня не заповнення при різних значеннях коефіцієнта внутрішнього тертя вантажу: 1 – f = 0,5; 2 – f = 0,6; 3 – f = 0,7

З аналізу рис. 5, рис. 6 і рис. 6 випливає, що зі збільшенням ступеня незаповнення трубчастого стрічкового конвеєра, натягу стрічки (рис. 5) і радіусі роликів (рис. 6) коефіцієнт опору руху стрічки по роликоопорах зменшується. При цьому зі збільшенням коефіцієнта внутрішнього тертя сипкого вантажу (ріс. 7) коефіцієнт опору збільшується.

Висновки. На підставі теорії тонких пружних оболонок отримано математичну модель опору руху стрічки з сипким вантажем по роликоопорах трубчастого конвеєра від деформації вантажу, що враховує активні та пасивні нормальні напруження на стрічку трубчастого конвеєра з боку вантажу, що транспортується, які виникають при переході через роликоопори.

Вперше встановлено, що в стрічці конвеєра під час переходу через точки контакту на роликоопорах відбувається стрибок згинального моменту, що зумовлено виникненням сили опору на роликоопорі.

Встановлено, що зі збільшенням ступеня незаповнення трубчастого стрічкового конвеєра, натягу стрічки і радіусі роликів коефіцієнт опору руху стрічки по роликоопорах зменшується. При цьому зі збільшенням коефіцієнта внутрішнього тертя сипкого вантажу коефіцієнт опору збільшується.

Перелік посилань

1. Loeffler, F.J. (2000). Pipe / Tube Conveyors - a modern method of bulk materials transport Bulk *Solids Handling*, *20*(4), 431−435. https://www.researchgate.net/publication/293631779_Pipetube_conveyors
2. Монастырский, В.Ф., Максютенко, В.Ю., & Кирия, Р.В. (2010). Эффективность работы ленточных конвейеров на горных предприятиях. *Геотехнічна механіка*, *88*, 185–191.
3. Кирия, Р.В., & Ларионов, Н.Г. (2014). Определение сил сопротивления движению ленты по роликоопорам ленточного конвейера, обусловленных деформацией груза. *Збірник наукових праць Національного гірничого університету*, *44*, 43–53.
4. Guo, Y., Wang, S., Hu, K., & Li, De. (2016). Optimization and experimental study of transport section lateral pressure of pipe belt conveyor. *Advanced Powder Technology*, *27*(4), 1318–1324. https://doi.org/10.1016/j.apt.2016.04.026
5. Kiriia, R., & Mishchenko, T. (2019). Determination of the maximum allowable distance between the roller conveyors of a tubular belt conveyor. *E3S Web of Conferences, International Conference Essays of Mining Science and Practice*, *109*, 1–10. https://doi.org/10.1051/e3sconf/201910900035
6. Тимошенко, С.П., & Войновский-Кригер, С. (1963). *Пластины и оболочки*. Физ.-мат. литература.

ABSTRACT

The purpose of the work is to investigation of the influence of the main parameters of a tubular belt conveyor on the resistance of the belt movement on the idler of conveyor.

Research methods. To solve these problems, methods of thin elastic shell theory and loose material mechanics were use.

The results. The analysis of the design features of industrial conveyors shows that the resistance force to belt movement on tube conveyor idlers is greater than that of a belt conveyor with a trough belt, due to the influence of the resistance force component caused by the deformation of the cargo. The mathematical model of resistance to the movement of the belt on idlers tubular belt conveyor has been developing. The analytical dependence of the belt resistance forces on the idlers on the conveyor

parameters, belt and cargo properties, as well as on the degree of belt filling with cargo was obtained. Results for the calculation of the resistance coefficient to belt movement as a function of the degree of filling at different belt tensions, roller radii and the coefficient of internal friction of the cargo are given. It found that with increasing degree of filling of tubular belt conveyor, belt tension and radius of rollers, coefficient of resistance to belt movement decreases, and with increasing coefficient of internal friction of bulk cargo and cylindrical stiffness of the belt, on the contrary, increases.

Scientific novelty. Based on the theory of thin elastic cylindrical shells and loose material mechanics, a mathematical model of the resistance to belt movement on the idlers of a tubular belt conveyor is develop for the first time. Analytical dependencies of resistance force to belt movement on tube conveyor idlers on main parameters of conveyor, belt and bulk cargo properties are established.

The practical significance. The results of the investigations make it possible, depending on the basic parameters of the conveyor, the properties of the belt and the bulk material to be transporting, to determine the resistance to belt movement on the idlers of a tubular belt conveyor. This reduces drive power by selecting the parameters of idlers and belt.

Keywords: *tubular conveyer, belt, resistive force, idler, cargo.*