

УДК 622.647.2

DOI: <https://doi.org/10.15407/geotm2019.144.157>

ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАГРУЗОК НА РОЛИКИ ТРУБЧАТОГО ЛЕНТОЧНОГО КОНВЕЙЕРА

¹Кирия Р.В., ¹Смирнов А.Н., ¹Мищенко Т.Ф.

¹Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова НАН Украины

ВИЗНАЧЕННЯ НАВАНТАЖЕНЬ НА РОЛИКИ ТРУБЧАТОГО СТРИЧКОВОГО КОНВЕЄРА

¹Кірія Р.В., ¹Смірнов А.М., ¹Мищенко Т.Ф.

¹Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України

DETERMINATION OF THE LOADS ON THE ROLLERS OF THE TUBULAR BELT CONVEYOR

¹Kiriia R.V., ¹Smirnov A.M., ¹Mishchenko T.F.

¹Institute of Geotechnical Mechanics named by N. Poljakov of NAS of Ukraine

Аннотация. В статье приведены методы определения нагрузок на ролики шестироликовой опоры трубчатого ленточного конвейера, основанные на законах равновесия упругих цилиндрических оболочек, заполненных сыпучей средой. При этом силы, действующие на ролики трубчатого конвейера, представляют собой сумму сил, обусловленных весом и распором сыпучего груза, весом и изгибом ленты, а также силами инерции, связанными с кривизной става и прогибом ленты под весом сыпучего груза. Кроме того, в случае движения ленты трубчатого конвейера по криволинейному участку силы на ролики действуют силы, обусловленные натяжением ленты, а также центробежные силы при движении груза и ленты по криволинейной траектории. Силы, действующие на ролики трубчатого конвейера, обусловленные весом и распором сыпучего груза, определяются из системы уравнений равновесия цилиндрической оболочки, разбитой на шесть тонких незамкнутых цилиндрических стержней, опирающихся на ролики. Силы, действующие на ролики, обусловленные изгибом ленты в плоскости её нормального сечения, определяются на основе теории равновесия цилиндрической оболочки, также разбитой на шесть тонких незамкнутых цилиндрических стержней, опирающихся на ролики. Динамические силы, действующие на ролики при движении ленты по роликоопорам трубчатого конвейера, определяются из уравнения колебаний тяжёлой гибкой нити при её движении по роликоопорам с помощью метода Ритца. В результате исследований получены аналитические зависимости сил, действующих на ролики шестироликовой опоры трубчатого конвейера от параметров конвейера, ленты, свойств сыпучего груза и радиуса кривизны става конвейера. Дана оценка составляющих сил, действующих на ролики трубчатого конвейера. При этом установлено, что величина сил, действующих на ролики, обусловленных распором груза, прямо пропорциональна квадрату радиуса трубчатой ленты, а величина сил, действующих на ролики, обусловленных изгибом ленты, обратно пропорциональна квадрату радиуса трубчатой ленты. Полученные результаты могут быть использованы при определении параметров роликов и увеличении ресурса роликов трубчатых конвейеров.

Ключевые слова: трубчатый ленточный конвейер, ролики, усилия, распор груза, изгиб ленты

С повышением требований к охране окружающей среды в настоящее время при транспортировании экологически опасных сыпучих грузов получили широкое распространение трубчатые ленточные конвейеры.

Опыт эксплуатации ленточных трубчатых конвейеров показал, что, в отличие от ленточного конвейера с желобчатой лентой, на ролики роликоопор трубчатого конвейера действуют дополнительные силы, обусловленные распором груза и силами инерции, связанными с кривизной става и прогибом ленты от веса груза. Эти силы, действующие на ролики трубчатого конвейера, существенно уменьшают их ресурс.

Поэтому для повышения ресурса ролика трубчатого конвейера необходимо, прежде всего, определить величины этих сил. В работах В.Г. Дмитриева, В.И. Галкина, Н.В. Сергеевой, А.П. Егорова, Н.Ю. Иванова приведён расчёт нагрузок на шестироликовые роликоопоры трубчатого конвейера. Однако в этих

работах полученные значения нагрузок на ролики не совсем соответствуют реальным нагрузкам. Это связано с тем, что методы определения этих нагрузок не основаны на законах равновесия упругих цилиндрических оболочек. Кроме того, в этих работах не исследованы зависимости сил, действующих на ролики трубчатых конвейеров от параметров конвейера, ленты и свойств транспортируемого груза.

В данной работе, на основании уравнений равновесия цилиндрической упругой оболочки, заполненной сыпучим грузом, определены силы, действующие на ролики шестирولیковой опоры трубчатого конвейера от веса и распора сыпучего груза, веса и изгиба ленты в её поперечном сечении, а также от сил инерции, обусловленных кривизной трасы и прогибом ленты, возникающих под действием силы тяжести транспортируемого груза. При этом используются теория равновесия упругой цилиндрической оболочки и теория предельного равновесия сыпучей среды.

Рассмотрим сначала случай, не учитывающий динамические усилия, действующие на ролики трубчатого конвейера при движении ленты с грузом по роликоопорам конвейера.

Согласно работам [1-4] усилие, действующее на ролики роликоопор прямолинейного участка става трубчатого ленточного конвейера, состоит из суммы сил от веса и сил распора сыпучего груза, веса ленты и от изгиба ленты конвейера, т.е.

$$P_i = P_{\Gamma_i} + P_{\lambda_i} + P_{u_i} \quad (i = 1, \dots, 6), \quad (1)$$

где P_i – сила, действующая на i -й ролик роликоопоры трубчатого конвейера (рис. 1), Н; P_{Γ_i} – сила, действующая на i -й ролик роликоопоры трубчатого конвейера от веса и распора сыпучего груза, Н; P_{λ_i} – сила, действующая на i -й ролик роликоопоры трубчатого конвейера от веса ленты (см. рис. 1), Н; P_{u_i} – сила, действующая на i -й ролик трубчатого конвейера от изгиба ленты, Н.

Для определения сил, действующих на ролики трубчатого конвейера от веса и распора сыпучего груза, предположим, что лента трубчатого конвейера представляет собой незамкнутую цилиндрическую упругую оболочку радиуса R , полностью заполненную сыпучим грузом и движущуюся по роликоопорам с

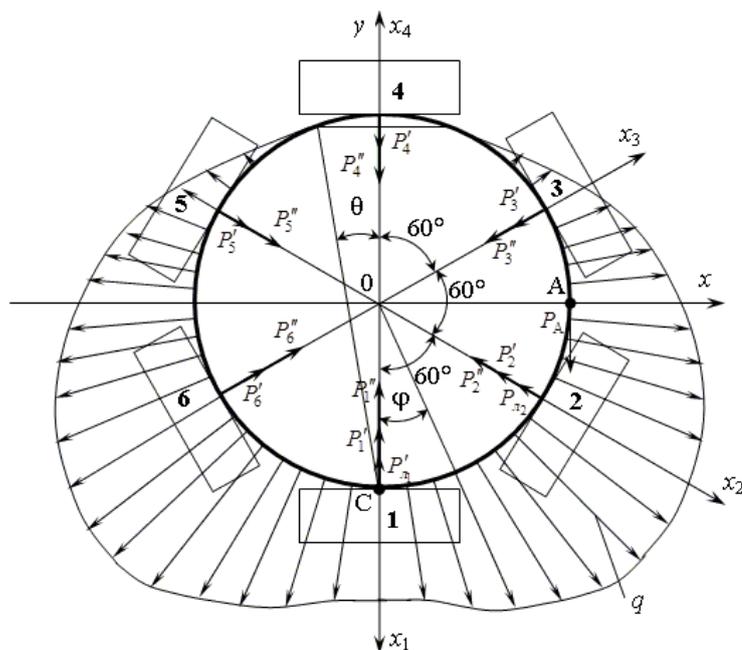


Рисунок 1 – Расчётная схема сил, действующих на ролики трубчатого конвейера

шестью роликами. При этом средняя величина нормальной распределённой нагрузки на ленту определяется по формуле

$$q = \frac{q_a + q_n}{2}, \quad (2)$$

где q_a – активная нормальная распределённая нагрузка на ленту конвейера, связанная с её сжатием, Н/м²; q_n – пассивная нормальная распределённая нагрузка на ленту конвейера, связанная с её развалом, Н/м².

При этом активная и пассивная нормальные распределённые нагрузки соответственно равны [5]:

$$\begin{aligned} q_a &= R\gamma(\cos^2 \varphi + m \sin^2 \varphi)(\cos 2\theta + \cos \varphi); \\ q_n &= R\gamma\left(\cos^2 \varphi + \frac{\sin^2 \varphi}{m}\right)(\cos 2\theta + \cos \varphi), \end{aligned} \quad (3)$$

где m – коэффициент подвижности сыпучего груза согласно «Зенков, Р.Л., 1964» $m = 1 + 2f^2 - 2f\sqrt{1 + f^2}$; f – коэффициент внутреннего трения сыпучего материала; γ – объёмный вес транспортируемого груза, Н/м³; φ – текущая угловая координата в поперечном сечении трубчатой ленты конвейера, рад; θ – угол, определяющий степень заполнения сыпучим материалом поперечного сечения контура ленты, рад.

Подставляя равенства (3) в (2), после преобразования получим:

$$q(\varphi) = \begin{cases} 0,5R\gamma(\cos 2\theta_1 + \cos \varphi)\left(2\cos^2 \varphi + \frac{m^2 + 1}{m}\sin^2 \varphi\right) & \text{при } 0 \leq \varphi \leq \varphi_1; \\ 0,5R\gamma(\cos 2\theta_2 + \cos \varphi)\left(2\cos^2 \varphi + \frac{m^2 + 1}{m}\sin^2 \varphi\right) & \text{при } \varphi_2 \leq \varphi \leq 0, \end{cases} \quad (4)$$

где $\varphi_1 = \pi - 2\theta_1$; $\varphi_2 = -(\pi - 2\theta_2)$; θ_1 и θ_2 – степени заполнения левой и правой сторон сечения ленты, рад.

В случае полной загрузки сыпучим грузом трубчатой ленты ($\theta_1 = \theta_2 = 0$) равенство (4) примет вид:

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

Для определения сил, действующих на ролики роlikоопоры от веса и распора сыпучего груза, выделим между роlikоопорами три части ленты, ограниченные точками контакта ленты с 1-м и 2-м роliками, точками контакта со 2-м и 3-м роliками, а также с 3-м и 4-м роliками.

Предположим, что силы трения между лентой и роliками отсутствуют. В этом случае нормальные силы, действующие на роliки со стороны ленты и груза, принимают максимальные значения.

Просуммируем проекции всех сил на оси Ox_1 , Ox_2 , Ox_3 , Ox_4 , действующих на каждую выделенную часть ленты, и приравняем эти суммы к нулю.

В результате получим:

$$P_1' + \frac{P_2''}{2} = l_p \int_0^{60^\circ} qR \cos \varphi d\varphi; \quad (6)$$

$$P_2'' + \frac{P_1'}{2} = l_p \int_0^{60^\circ} qR \cos \varphi d\varphi; \quad (7)$$

$$P_2' + \frac{1}{2} P_3' = l_p \int_{60^\circ}^{120^\circ} qR \cos(\varphi - 60^\circ) d\varphi; \quad (8)$$

$$P_3'' + \frac{1}{2} P_2' = l_p \int_{60^\circ}^{120^\circ} qR \cos(120^\circ - \varphi) d\varphi; \quad (9)$$

$$\frac{1}{2} P_4' + P_3' = l_p \int_{120^\circ}^{\varphi_1} qR \cos(\varphi - 120^\circ) d\varphi; \quad (10)$$

$$P_4' + \frac{1}{2} P_3' = l_p \int_{120^\circ}^{\varphi_1} qR \cos(180^\circ - \varphi) d\varphi, \quad (11)$$

где $\varphi_1 = 180^\circ - 2\theta$.

Здесь P_1' – сила, действующая на 1-ю выделенную часть ленты со стороны 1-го ролика, Н; P_2', P_2'' – силы, действующие на 1-ю и 2-ю выделенные части ленты со стороны 2-го ролика соответственно, Н; P_3', P_3'' – силы, действующие на 2-ю и 3-ю выделенные части ленты со стороны 3-го ролика соответственно, Н; P_4' – сила, действующая на 3-ю выделенную часть ленты со стороны 4-го ролика, Н; l_p – расстояние между роlikоопорами, м.

Силы, действующие на 1-й, 2-й, 3-й и 4-й ролики роlikоопоры обусловленные силами веса и распора сыпучего груза, определим по формулам:

$$P_{\Gamma_1} = 2P_1'; P_{\Gamma_2} = P_2' + P_2''; P_{\Gamma_3} = P_3' + P_3''; P_{\Gamma_4} = 2P_4'. \quad (12)$$

Решая систему уравнений (6)–(11) относительно неизвестных $P_1', P_2', P_2'', P_3', P_3'', P_4'$ и подставляя их в равенства (12), получим силы, действующие на ролики, равные:

$$P_{\Gamma_1} = \frac{8}{3} l_p \int_0^{60^\circ} qR \cos \varphi d\varphi - \frac{4}{3} l_p \int_0^{60^\circ} qR \cos(60^\circ - \varphi) d\varphi; \quad (13)$$

$$P_{\Gamma_2} = \frac{4}{3} l_p \int_0^{120^\circ} qR \cos(\varphi - 60^\circ) d\varphi - \frac{2}{3} l_p \int_{60^\circ}^{120^\circ} qR \cos(120^\circ - \varphi) d\varphi - \frac{2}{3} l_p \int_0^{60^\circ} qR \cos \varphi d\varphi; \quad (14)$$

$$P_{\Gamma_3} = \frac{4}{3} l_p \int_{60^\circ}^{120^\circ} qR \cos(120^\circ - \varphi) d\varphi - \frac{2}{3} l_p \int_{60^\circ}^{120^\circ} qR \cos(\varphi - 60^\circ) d\varphi + \frac{4}{3} l_p \int_{120^\circ}^{\varphi_1} qR \cos(\varphi - 120^\circ) d\varphi - \frac{2}{3} l_p \int_{120^\circ}^{\varphi_1} qR \cos(180^\circ - \varphi) d\varphi; \quad (15)$$

$$P_{\Gamma_4} = \frac{8}{3} l_p \int_{120^\circ}^{\varphi_1} qR \cos(180^\circ - \varphi) d\varphi - \frac{4}{3} l_p \int_{120^\circ}^{\varphi_1} qR \cos(\varphi - 120^\circ) d\varphi, \quad (16)$$

где $q = 0,5l_p R \gamma (\cos 2\theta + \cos \varphi) \left(2 \cos^2 \varphi + \frac{m^2 + 1}{m} \sin^2 \varphi \right)$; $0 \leq \varphi \leq \varphi_1$; $\varphi_1 = 180^\circ - 2\theta$, $0 \leq \theta \leq 90^\circ$.

Беря интегралы в правых частях равенств (13)-(16), после преобразования получим:

$$\begin{aligned} P_{\Gamma 1} &= I_1 \gamma R^2 l_p; P_{\Gamma 2} = I_2 \gamma R^2 l_p; P_{\Gamma 3} = I_3 \gamma R^2 l_p; \\ P_{\Gamma 4} &= I_4 \gamma R^2 l_p; P_{\Gamma 5} = I_3 \gamma R^2 l_p; P_{\Gamma 6} = I_2 \gamma R^2 l_p, \end{aligned} \quad (17)$$

где

$$\begin{aligned} I_1 &= \frac{8}{3} \int_0^{60^\circ} \bar{q} \cos \varphi d\varphi - \frac{4}{3} \int_0^{60^\circ} \bar{q} \cos(60^\circ - \varphi) d\varphi; \\ I_2 &= \frac{4}{3} \int_0^{120^\circ} \bar{q} \cos(\varphi - 60^\circ) d\varphi - \frac{2}{3} \int_{60^\circ}^{120^\circ} \bar{q} \cos(120^\circ - \varphi) d\varphi - \frac{2}{3} \int_0^{60^\circ} \bar{q} \cos \varphi d\varphi; \\ I_3 &= \frac{4}{3} \int_{60^\circ}^{120^\circ} \bar{q} \cos(120^\circ - \varphi) d\varphi - \frac{2}{3} \int_{60^\circ}^{120^\circ} \bar{q} \cos(\varphi - 60^\circ) d\varphi + \\ &+ \frac{4}{3} \int_{120^\circ}^{\varphi_1} \bar{q} \cos(\varphi - 120^\circ) d\varphi - \frac{2}{3} \int_{120^\circ}^{\varphi_1} \bar{q} \cos(180^\circ - \varphi) d\varphi; \\ I_4 &= \frac{8}{3} \int_{120^\circ}^{\varphi_1} \bar{q} \cos(180^\circ - \varphi) d\varphi - \frac{4}{3} \int_{120^\circ}^{\varphi_1} \bar{q} \cos(\varphi - 120^\circ) d\varphi; \\ \bar{q} &= 0,5(\cos(2\theta) + \cos \varphi) \left(2 \cos^2 \varphi + \frac{m^2 + 1}{m} \sin^2 \varphi \right); \\ &0 \leq \varphi \leq \varphi_1; \varphi_1 = 180^\circ - 2\theta; 0 \leq \theta \leq 90^\circ. \end{aligned} \quad (18)$$

Из формул (17) следует, что величины сил, действующих на ролики шести-роликовой опоры трубчатого конвейера, обусловленных весом и распором сыпучего груза, пропорциональны квадрату радиуса трубчатой ленты и прямо пропорциональны удельному весу сыпучего груза и расстоянию между роликоопорами.

В табл. 1 приведены значения коэффициентов I_1, I_2, I_3, I_4 при $\theta = 0$ и различных значениях коэффициента трения сыпучего груза f .

Таблица 1 – Значения коэффициентов I_1, I_2, I_3, I_4 при $\theta = 0$ и различных значениях коэффициента трения сыпучего груза f

$I \backslash f$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
I_1	2,209	2,230	2,264	2,313	2,375	2,451	2,541	2,645	2,762	2,894
I_2	1,698	1,759	1,860	2,001	2,183	2,405	2,667	2,970	3,313	3,696
I_3	0,642	0,674	0,727	0,801	0,896	1,013	1,151	1,310	1,491	1,692
I_4	0,108	0,111	0,115	0,120	0,127	0,136	0,146	0,157	0,171	0,185

При полной загрузке ленты трубчатого конвейера, т.е. при $\theta = 0$ и $f = 0,7$ ($m = 0,271$), величины интегралов I_1, I_2, I_3, I_4 равны:

$$I_1 = 2,541; I_2 = 2,667; I_3 = 1,151; I_4 = 0,146.$$

Определим теперь силы, действующие на ролики роlikоопоры трубчатого конвейера от веса ленты. Для этого выделим участок ленты AC между роlikоопорами без груза (см. рис. 1). На этот участок конвейерной ленты будут действовать силы: P_A – сила со стороны верхней части конвейерной ленты; $P'_{л_1}$ – сила реакции со стороны нижнего ролика 1 и направленная вертикально вверх; $P_{л_2}$ – сила реакции со стороны нижнего бокового ролика 2 и направленная в центр цилиндра, а также распределённые силы веса выделенного участка ленты, направленные вертикально вниз. При этом предполагается, что силы трения между лентой и роliками отсутствуют. В этом случае нормальные силы, действующие на роliки со стороны ленты и груза, принимают максимальные значения.

Кроме того положим, что силы, действующие на верхний, центральный и боковые верхние роliки от веса ленты, равны нулю.

Запишем уравнения равновесия этих сил, действующих на выделенный участок ленты AC , в проекциях на ось Oy и моментов этих сил относительно точки C . В результате получим систему уравнений относительно сил $P'_{л_1}$ и $P_{л_2}$:

$$\begin{cases} P'_{л_1} + P_{л_2} \cos 60^\circ - P_A - \frac{q_l l_p}{4} = 0; \\ P_A R - P_{л_2} R \cos 60^\circ + l_p \int_0^{90^\circ} q'_l R^2 \sin \varphi d\varphi = 0. \end{cases} \quad (19)$$

Здесь q'_l – распределённая нагрузка веса ленты, определяемая по формуле

$$q'_l = \frac{q_l}{B}, \quad (20)$$

где q_l – погонный вес ленты, Н/м; B – ширина ленты трубчатого конвейера, м.

Беря интеграл во втором уравнении системы (19) и решая её относительно $P'_{л_1}$ и $P_{л_2}$, получим

$$\begin{cases} P'_{л_1} = P_A + \frac{q_l l_p}{4} - \frac{P_{л_2}}{2}; \\ P_{л_2} = \frac{2}{\sqrt{3}} (P_A + q'_l l_p R). \end{cases} \quad (21)$$

Сила P_A равна четвертой части веса ленты на участке между роlikоопорами, т.е.

$$P_A = \frac{q_l l_p}{4}. \quad (22)$$

Подставляя (20) и (22) в (21), после преобразования получим:

$$P'_{л_1} = \left(\frac{1}{2} - \frac{1}{4\sqrt{3}} - \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{R}{B} \right) q_l l_p; \quad (23)$$

$$P_{л_2} = \frac{2}{\sqrt{3}} \left(\frac{1}{4} + \frac{R}{B} \right) q_l l_p. \quad (24)$$

Сила, действующая на нижний ролик 1 со стороны всей ленты, равна $P_{л_1} = 2P'$.

Подставляя последнее равенство в (22), получим

$$P_{л_1} = \left(1 - \frac{1}{2\sqrt{3}} - \frac{2}{\sqrt{3}} \frac{R}{B}\right) q_l l_p. \quad (25)$$

Ширину ленты трубчатого конвейера приближённо можно определить по формуле

$$B = 2\pi R. \quad (26)$$

Подставляя (26) в (24) и (25) с учётом симметрии сил, действующих на левый боковой ролик роlikоопоры, после вычисления получим:

$$P_{л_1} = 0,528q_l l_p; P_{л_2} = 0,473q_l l_p; P_{л_3} = 0; P_{л_4} = 0; P_{л_5} = 0; P_{л_6} = 0,473q_l l_p. \quad (27)$$

Из (27) следует, что силы, действующие на роlikоопоры трубчатого конвейера, обусловленные весом ленты, прямо пропорциональны погонной нагрузке и расстоянию между роlikоопорами.

Определим теперь силы P_{u_i} , действующие на ролики от изгиба ленты.

Силы, действующие на ролики от изгиба ленты, можно представить как сумму сил от предварительного изгиба ленты без учёта груза и сил от изгиба ленты под действием сил распора сыпучего груза. Величина прогиба ленты от предварительного изгиба ленты намного больше величины прогиба ленты от сил распора сыпучего груза. Поэтому силы, действующие на ролики от изгиба ленты, обусловленного силами распора сыпучего груза, намного меньше сил, действующих на ролики от предварительного изгиба ленты, и ими можно пренебречь. Следовательно, определим только силы, действующие на ролики от предварительного изгиба ленты без учёта груза.

Представим ленту как упругую бесконечно длинную цилиндрическую пластину, на которую действует постоянный изгибающий момент. Выделим часть ленты между точками контакта с третьим и четвертым роliками, т.е. часть 3 (см. рис. 1).

Согласно С.П. Тимошенко запишем выражение для определения величины изгибающего момента в выделенной 3-й части ленты в виде

$$M_u = \frac{Dl_p}{R}, \quad (28)$$

где M_u – момент силы, действующей на ленту со стороны 4-го роliка (верхнего) на 3-ю выделенную часть ленты относительно точки контакта 3-го роliка (верхнего бокового роliка) с лентой, Н·м; D – изгибная жёсткость цилиндрической пластины, Н·м.

Изгибная жёсткость цилиндрической пластины согласно С.П. Тимошенко определяется по формуле

$$D = \frac{E_l h_l^3}{12(1-\nu^2)}, \quad (29)$$

где E_l – модуль упругости ленты в продольном направлении ленты, Н/м²; h_l – толщина ленты, м; ν – коэффициент Пуассона ленты.

Момент изгиба M_u ленты в точке C контакта ленты с нижним роликом (см. рис. 1) равен сумме моментов сил, действующих на ленту в точках контакта второго, третьего и четвёртого роликов в предположении, что груз в ленте трубчатого конвейера отсутствует

$$M_u = P_{u_2} d_2 + P_{u_3} d_3 + P_{u_4} d_4, \quad (30)$$

где d_2, d_3, d_4 – величины перпендикуляров, опущенных из точки C на направленные векторы сил $P_{u_2}, P_{u_3}, P_{u_4}$.

Согласно рис. 1 величины d_2, d_3, d_4 соответственно равны

$$d_2 = d_3 = R \sin 60^\circ = \frac{\sqrt{3}}{2} R; \quad d_4 = 0. \quad (31)$$

Так как изгибная жёсткость ленты постоянная, то в силу симметрии для цилиндрической ленты силы, действующие на ролики от изгиба ленты, равны

$$P_{u_1} = P_{u_2} = P_{u_3} = P_{u_4} = P_u.$$

Подставляя (31) в (30) с учётом последнего равенства, получим

$$M_u = \sqrt{3} R P_u. \quad (32)$$

Из последнего равенства с учётом (28) определим силы, действующие на ролики трубчатого конвейера от изгиба ленты

$$P_u = \frac{D l_p}{\sqrt{3} R^2}. \quad (33)$$

Подставляя (17), (27) и (33) в (1) окончательно получим силы, действующие на ролики шестироликовой опоры трубчатого конвейера, с учётом веса ленты:

$$\begin{aligned} P_1 &= I_1 \gamma R^2 l_p + 0,528 q_l l_p + \frac{D l_p}{\sqrt{3} R^2}; & P_2 &= I_2 \gamma R^2 l_p + 0,473 q_l l_p + \frac{D l_p}{\sqrt{3} R^2}; \\ P_3 &= I_3 \gamma R^2 l_p + \frac{D l_p}{\sqrt{3} R^2}; & P_4 &= I_4 \gamma R^2 l_p + \frac{D l_p}{\sqrt{3} R^2}; & P_5 &= I_3 \gamma R^2 l_p + \frac{D l_p}{\sqrt{3} R^2}; \\ P_6 &= I_2 \gamma R^2 l_p + 0,473 q_l l_p + \frac{D l_p}{\sqrt{3} R^2}. \end{aligned} \quad (34)$$

Для сравнения определим суммарную силу, действующую на роликоопору от веса груза и ленты, по формуле

$$P = \pi \gamma R^2 l_p + q_l l_p = 3,14 \gamma R^2 l_p + q_l l_p.$$

Расчёты показали, что силы, действующие на нижний центральный и нижние боковые ролики шестироликовой опоры трубчатого конвейера приближённо совпадают с суммарной силой, действующей на роликоопору от веса груза и ленты на участке между роликоопорами. В то же время для конвейера с желобчатой лентой сила, действующая на нижний ролик, составляет 0,7 от суммарной силы, действующей на роликоопору от веса груза и ленты на участке между роликоопорами.

Кроме того, расчёты показали, что, силы, действующие на ролики шестироликовой опоры трубчатого конвейера, обусловленные весом ленты, не

превышают 11 % от общей суммы сил веса и распора сыпучего груза, сил изгиба и веса ленты.

Кроме того, при движении груза по роликоопорам прямолинейного участка трубчатого конвейера возникают динамические усилия, действующие на ролики, обусловленные прогибом ленты под действием сил тяжести груза и ленты.

При этом при движении мелкокускового груза по прямолинейному участку става конвейера динамические усилия на ролики шестироликовой опоры трубчатого конвейера определяются по формулам [6]

$$P_{\partial_i} = k_{\partial} P_{\Gamma_i} + k_{\partial} P_{\lambda_i} + P_u \quad (i = 1, \dots, 6), \quad (35)$$

где k_{∂} – коэффициент динамичности при движении мелкокускового груза по роликоопорам конвейера, определяемый по формуле

$$k_{\partial} = 1 + \frac{v_{\lambda}^2}{g} \cdot \frac{q}{\left(S_{\lambda} - \frac{v_{\lambda}^2}{g} q \right)}, \quad (36)$$

где v_{λ} – скорость ленты, м/с; $q = q_{\Gamma} + q_{\lambda}$ – сумма погонных весов груза и ленты, Н/м; S_{λ} – натяжение ленты, Н.

Исследования показали, что динамические усилия, действующие на ролики при движении мелкокускового груза по роликоопорам прямолинейного участка става трубчатого конвейера, на 10 % больше по сравнению со статическими нагрузками на ролики.

В случае криволинейного участка става трубчатого ленточного конвейера на ролики кроме сил от веса и сил распора сыпучего груза, веса ленты и от изгиба ленты конвейера действуют силы от натяжения ленты, а также динамические силы, связанные с изгибом ленты и силами инерции, возникающими при движении груза и ленты по криволинейному участку става конвейера, т.е. суммарная сила, действующая на ролики, определяется по формуле

$$P'_i = k'_{\partial} P'_{\Gamma_i} + k'_{\partial} P'_{\lambda_i} + P'_{u_i} + P_n \quad (i = 1, \dots, 6), \quad (37)$$

где P'_i – сила, действующая на i -й ролик роликоопоры криволинейного участка става трубчатого конвейера (см. рис. 1), Н; P'_{Γ_i} – сила, действующая на i -й ролик роликоопоры криволинейного участка става трубчатого конвейера от веса и распора сыпучего груза, Н; P'_{λ_i} – сила, действующая на i -й ролик роликоопоры криволинейного участка става трубчатого конвейера от веса ленты (рис. 1), Н; P'_{u_i} – сила, действующая на i -й ролик роликоопоры криволинейного участка става трубчатого конвейера от изгиба ленты, Н; P_n – сила, действующая на ролики роликоопоры криволинейного участка става трубчатого конвейера от натяжения ленты, Н; k'_{∂} – коэффициент динамичности при движении ленты с грузом по криволинейному участку става трубчатого конвейера.

Силы $P'_{\Gamma_i}, P'_{\lambda_i}, P'_{u_i}$ определяются по тем же формулам, что и силы $P_{\Gamma_i}, P_{\lambda_i}, P_{u_i}$, т.е. по формулам (17), (27) и (33) только вместо l_p подставляется l'_p (l'_p – расстояние между роликами на криволинейном участке става трубчатого конвейера, м).

Коэффициент динамичности k'_o согласно [7] определяется по формуле:

$$k'_o = k_o \left(1 + \frac{v_l^2}{R_k g} \right);$$

R_k – радиус кривизны в начальной точке криволинейного участка става трубчатого конвейера, м.

Сила P_n , действующая на ролики, из треугольника равновесия сил, действующих на ролики от натяжения ленты и реакции роликов, определяется по формуле

$$P_n = S_l \frac{l'_p}{R_k}. \quad (38)$$

Выводы

1. На основании уравнения равновесия цилиндрической упругой ленты, движущейся вместе с сыпучим грузом по шестироликовым опорам трубчатого конвейера, определены силы, действующие на ролики, обусловленные весом и силами распора сыпучего груза, весом и изгибом ленты, а также силами инерции и натяжением ленты.

При этом установлено, что:

а) величины сил, действующих на ролики шестироликовой опоры трубчатого конвейера, обусловленных весом и распором сыпучего груза, пропорциональны квадрату радиуса трубчатой ленты и прямо пропорциональны расстоянию между роликоопорами. При этом силы, действующие на нижний центральный и нижние боковые ролики, обусловленные весом и распором сыпучего груза, равны приближённо сумме веса сыпучего груза и ленты конвейера на участке между роликоопорами;

б) силы, действующие на ролики трубчатого конвейера, обусловленные изгибом ленты, прямо пропорциональны изгибной жёсткости ленты и расстоянию между роликоопорами и обратно пропорциональны квадрату радиуса трубчатой ленты;

в) силы, действующие на ролики трубчатого конвейера, обусловленные весом ленты, прямо пропорциональны погонной нагрузке и расстоянию между роликоопорами и не превышают 11 % от общей суммы сил веса и распора сыпучего груза;

г) величина силы, действующей на ролики криволинейного участка става трубчатого конвейера, обусловленная натяжением ленты, прямо пропорциональна натяжению ленты и расстоянию между роликоопорами и обратно пропорциональна радиусу кривизны криволинейного участка става.

2. На основании разработанной математической модели колебания трубчатой ленты при движении по роликоопорам конвейера определены динамические составляющие сил, действующих на роликоопоры, обусловленные весом и распором сыпучего груза, а также весом ленты. При этом динамические составляющие усилий, действующих на роликоопоры трубчатого конвейера, не превышают 10 % от статических нагрузок на роликоопоры трубчатого конвейера.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Галкин В.И., Дмитриев В.Г. Трубчатые конвейеры для горной промышленности. *Горное оборудование и электромеханика*. 2009. № 1. С. 39-46.
2. Дмитриев В.Г., Сергеева Н.В. Методика тягового расчета ленточного трубчатого конвейера. *ГИАБ*. М.: МГУ, 2011. № 7. С. 218-228.
3. Дмитриев В.Г., Егоров А.П. Влияние скорости ленты на распределение силы сопротивления движению трубчатого конвейера. *ГИАБ*. М.: МГУ, 2011. № 6. С. 191-198.
4. Дмитриев В.Г., Иванов Н.Ю. Теория ленточных трубчатых конвейеров (ЛТК) пространственной криволинейной трассы. М.: Горная книга, 2013. Вып. 1. 24 с.
5. Шешко Е.Е., Касаткин А.А. Влияние напряженно-деформированного состояния ленты крутонаклонного конвейера с прижимной лентой на его работоспособность. *Горный журнал*. 2009. №1. С. 79-82.
6. Кирья Р.В., Смирнов А.Н. Определение коэффициента динамичности при движении ленты с кусками груза по роликоопорам трубчатого конвейера. *Геотехническая механика*. Днепропетровск, 2016. Вып. 131. С. 144-151.
7. Кирья Р.В., Смирнов А.Н. Определение динамических усилий на роликоопоры при движении ленты и груза по криволинейному участку трубчатого конвейера. *Геотехническая механика*. Днепропетровск, 2018. Вып. 139. С. 152-161.

REFERENCES

1. Galkin, V.I. and Dmitriev, V.G. (2009), "Tubular conveyers for mining industry", *Gornoe oborudovanie i elektromechanika*, no. 1, pp. 39-46.
2. Dmitriev, V.G. and Sergeeva, N.V. (2011), "Method of hauling calculation of band tubular conveyer", *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten*, no. 7, pp. 218-228.
3. Dmitriev, V.G. and Egorov, A.P. (2011), "Influence of speed of belt on distributing of force of resistance to motion of tubular conveyer", *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten*, no. 6, pp. 191-198.
4. Dmitriev, V.G. and Ivanov, N.Yu. (2013), *Teoriya lentochnykh trubchatykh konveerov (LTK) prostranstvennoy krivolineynoy trassy. Vypusk 1* [Theory of band tubular conveyers (BTC) of spatial curvilinear route. Issue 1], *Gornaya kniga*, Moscow, Russia.
5. Sheshko, E.E. and Kasatkin, A.A. (2009), "Influence of the stress-strain state of belt of high angle conveyer with a pressure belt on his capacity", *Mining Journal*, no. 1, pp. 79-82.
6. Kiriya, R.V. and Smirnov, A.N. (2016), "Determination of dynamic factor when the belt with load are transported by the tubular conveyers roller supports", *Geo-Technical Mechanics*, no. 131, pp. 144-151.
7. Kiriya, R.V. and Smirnov, A.N. (2018), "Determination of dynamic efforts on roller supports at motion of ribbon and load on the curvilinear area of tubular conveyer", *Geo-Technical Mechanics*, no. 139, pp. 152-161.

Об авторах

Кирья Руслан Виссарионович, доктор технических наук, старший научный сотрудник, старший научный сотрудник отдела геомеханических основ технологии открытой разработки месторождений, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова национальной академии наук Украины (ИГТМ НАН Украины), Днепр, Украина, kiriya_igtm@ukr.net.

Смирнов Андрей Николаевич, кандидат технических наук, старший научный сотрудник отдела геомеханических основ технологии открытой разработки месторождений, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова национальной академии наук Украины (ИГТМ НАН Украины), Днепр, Украина, sm.contur24@gmail.com

Мищенко Тамара Федоровна, магистр, главный технолог отдела геомеханических основ технологии открытой разработки месторождений, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова национальной академии наук Украины (ИГТМ НАН Украины), Днепр, Украина, mishenkotamaraf@gmail.com.

About the authors

Kiriya Ruslan Vissarionovych, Doctor of Technical Sciences (D. Sc), Senior Researcher, Senior Researcher in Department of Geomechanics of Mineral Opencast Mining Technology, Institute of Geotechnical Mechanics named by N. Poljakov NAS of Ukraine (IGTM, NASU), Dnipro, Ukraine, kiriya_igtm@ukr.net.

Smirnov Andrii Mykolaiovych, Candidate of Technical Sciences (Ph.D), Senior Researcher in Department of Geomechanics of Mineral Opencast Mining Technology, I Institute of Geotechnical Mechanics named by N. Poljakov NAS of Ukraine (IGTM, NASU), Dnipro, Ukraine, sm.contur24@gmail.com

Mishchenko Tamara Fedorivna, Master of Science, Senior Specialist in Department of Geomechanics of Mineral Opencast Mining Technology, Institute of Geotechnical Mechanics named by N. Poljakov NAS of Ukraine (IGTM, NASU), Dnipro, Ukraine, mishenkotamaraf@gmail.com.

Анотація. В статті наведено методи визначення навантажень на ролики шестиріликової опори трубчатого стрічкового конвеєра, які засновано на законах рівноваги пружних циліндрових оболонки, заповнених сипким середовищем. При цьому сили, діючі на ролики трубчатого конвеєра, є сумою сил, обумовлених вагою та розпором сипкого вантажу, вагою і згином стрічки, а також силами інерції, пов'язаними з кривизною ставу та прогинанням стрічки під вагою сипкого вантажу. Крім того, у разі руху стрічки трубчатого конвеєра по криволинійній ділянці на ролики діють сили, обумовлені натягненням стрічки, а також відцентрові сили при русі вантажу і стрічки по криволинійній траєкторії. Сили, що діють на ролики трубчатого конвеєра, які обумовлені вагою і розпором сипкого вантажу, визначаються з системи рівнянь рівноваги циліндрової оболонки, розбитої на шість тонких незамкнених

циліндрових стрижнів, що спираються на ролики. Сили, діючі на ролики, обумовлені згином стрічки в площині її нормального перетину, визначаються на основі теорії рівноваги циліндрової оболонки, також розбитої на шість тонких незамкнених циліндрових стрижнів, що спираються на ролики. Динамічні сили, що діють на ролики при русі стрічки по роликоопорах трубчастого конвеєра, визначаються з рівняння коливань важкої гнучкої нитки при її русі по роликоопорах за допомогою методу Рітца. В результаті досліджень отримана аналітична залежність сил, діючих на ролики шестироликової опори трубчастого конвеєра від параметрів конвеєра, стрічки, властивостей сипкого вантажу та радіусу кривизни ставу конвеєра. Дана оцінка складових сил, діючих на ролики трубчастого конвеєра. При цьому встановлено, що величина сил, діючих на ролики, обумовлених розпором вантажу, прямо пропорційна квадрату радіусу трубчастої стрічки, а величина сил, діючих на ролики, обумовлених згином стрічки, обернено пропорційна квадрату радіусу трубчастої стрічки. Отримані результати можуть бути використані при визначенні параметрів роликів і збільшенні ресурсу роликів трубчастих конвеєрів.

Ключові слова: трубчастий стрічковий конвеєр, ролики, зусилля, розпір вантажу, згин стрічки

Abstract. The article presents methods for determining loads on rollers of a six-roll support of a tubular belt conveyor, based on the equilibrium laws of elastic cylindrical shells filled with a freight. In this case, the forces acting on the rollers of the tubular conveyor are the sum of the forces caused by the weight and expansion of the bulk load, the weight and bend of the belt, as well as the inertial forces associated with the curvature and the deflection of the belt under the weight of the bulk load. In addition, in the case of movement of the tubular conveyor belt along a curved section, the rollers are subject to forces due to the tension of the belt, as well as centrifugal forces during the movement of the load and the belt along a curved path. The forces acting on the rollers of the tubular conveyor, due to the weight and expansion of the bulk load, are determined from the system of equilibrium equations of the cylindrical shell, divided into six thin unclosed cylindrical rods, based on the rollers. The forces acting on the rollers, due to the bending of the belt in the plane of its normal cross-section, are determined on the basis of the equilibrium theory of a cylindrical plate, also divided into six thin unclosed cylindrical rods resting on the rollers. The dynamic forces acting on the rollers as the belt moves along the roller-supports of the tubular conveyor are determined from the equation of the oscillations of a heavy flexible string as it moves along the roller-supports using the Ritz method. As a result of the research, analytical dependences of the forces acting on the rollers of the six-roller support of the tubular conveyor on the parameters of the conveyor, the belt, the properties of the bulk load and the radius of curvature of the conveyor are obtained. An assessment of the component forces acting on the rollers of the tubular conveyor is given. It was found that the magnitude of the forces acting on the rollers, due to the load expansion, is directly proportional to the square of the radius of the tubular belt, and the magnitude of the forces acting on the rollers due to the bend of the belt, is inversely proportional to the square of the radius of the tubular belt. The results can be used to determine the parameters of the tubular conveyors rollers and increase the service life of the rollers.

Keywords: tubular belt conveyor, rollers, forces, load expansion, belt bending

Статья поступила в редакцию 15.02.2019

Рекомендовано к печати д-ром техн. наук В.Г. Шевченко