

УДК 622.6

Е. В. Борис

Закрытое акционерное общество «Солигорский Институт проблем ресурсосбережения с Опытным производством», ул. Козлова, 69, 223710 Солигорск, Республика Беларусь, +375 (33) 698 30 88, atp.even@yandex.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ СТАТИЧЕСКИХ БОКОВЫХ СМЕЩЕНИЙ ЛЕНТЫ ГРУЗОВОЙ И ПОРОЖНЯКОВОЙ ВЕТВЕЙ ЛЕНТОЧНОГО КОНВЕЙЕРА

Рассмотрено поведение грузовой и порожняковой ветвей ленточного конвейера при возникновении статических децентрирующих факторов. Исследовано боковое смещение ленты под действием децентрирующих факторов на линейной части жесткого и канатного ставов конвейера, не оборудованных центрирующими устройствами. Произведен сравнительный анализ различных типов роlikоопор. В зависимости от децентрирующего фактора были получены соответствующие коэффициенты центрирования. Даны рекомендации по применению различного типа роlikоопор с учетом их коэффициента центрирования.

Ключевые слова: лента; конвейер; сосредоточенная сила; распределенное усилие; став; смещение; ролики; роlikоопора.

Табл. 2. Библиогр.: 3 назв.

Ya. V. Borys

Closed Joint-Stock Company "Soligorsk Institute of Resources Saving Problems with Pilot Production", 69 Kozlov St., 223710 Soligorsk, the Republic of Belarus, +375 (33) 698 30 88, atp.even@yandex.ru

THE RESEARCH OF STATIC LATERAL DISPLACEMENTS OF THE BELT TRACK OF THE CARRYING AND RETURN BELT CONVEYOR LINES

The behavior of the carrying and return lines of the conveyor belt under the emergence of static decentralizing factors is considered. The lateral displacement of the belt track under the influence of decentralizing factors on the linear part of the rigid and rope conveyor flights, not equipped with centering devices, was examined. A comparative analysis of various types of roller supports is carried out. Corresponding centering coefficients were obtained depending on the decentering factor. Recommendations are given on the use of various types of rollers based on their centering coefficient.

Keywords: belt track; conveyor; concentrated force; distributed force; flight; displacement; rollers; roller support. Table 2. Ref.: 3 titles.

Введение. При движении по роlikоопорам става конвейерная лента под действием различных сил отклоняется в сторону от своего центрального положения, возникает явление, которое в практике называют боковым сходом. Нецентральное движение ленты является в настоящее время одной из причин простоев конвейеров, появления просыпей в подконвейерном пространстве и заштыбовки става, уменьшения сроков службы ленты из-за износа бортов и пр. Все эти недостатки, связанные с боковым сходом ленты, снижают технико-экономические показатели конвейерного транспорта [1].

В процессе эксплуатации конвейера на ленту, движущуюся по линейной части, действуют боковые силы, которые вызваны следующими децентрирующими факторами: перекосом роlikоопор в горизонтальной и вертикальной плоскостях; отклонением става от оси конвейера; неодинаковым сопротивлением вращению боковых роlikов опоры; нецентральной загрузкой ленты; непрямолинейностью ленты в горизонтальной плоскости; несимметричным распределением натяжения по ширине ленты; неодинаковым натяжением канатов става.

Большинство децентрирующих факторов, за исключением непрямолинейности и нестационарной нецентральной загрузки ленты, сравнительно медленно изменяются в пространстве и во времени и могут рассматриваться как статические. Результатом их проявления являются децентрирующие ленту усилия и моменты, для определения которых рассматривается взаимодействие ленты и роlikоопоры.

Основная часть. При решении задач, связанных с определением величины бокового схода под действием статических сил, воспользуемся уравнением смещений ленты, которое запишется в виде

$$EI \frac{d^4\delta}{dx^4} - (S - \rho v^2) \frac{d^2\delta}{dx^2} - \rho a \frac{d\delta}{dx} + \rho b \delta = 0, \quad (1)$$

где EI — изгибная жесткость ленты;

δ — поперечное смещение ленты;

x — продольная координата;

S — натяжение ленты в зоне ее схода;

ρ — масса 1 м длины ленты с грузом.

v — скорость движения ленты;

a — коэффициент интенсивности силы от перекоса ленты на роlikоопорах;

b — коэффициент интенсивности восстанавливающих сил става;

Уравнение (1) может быть использовано как для грузовой, так и для порожняковой ветвей с введением соответствующих констант.

Исследование боковых смещений ленты грузовой ветви конвейера. Определим величину бокового схода ленты под действием децентрирующих факторов на линейной части жесткого и канатного ставов конвейеров, необорудованных центрирующими устройствами.

Под действием сосредоточенной децентрирующей силы F , возникающей при перекосе отдельной роlikоопоры, величина наибольшего схода ленты δ_1 определяется выражением

$$\delta_1 = \frac{F}{2\sqrt{\rho b} \sqrt{2\sqrt{\rho b EI} + S - \rho v^2}}. \quad (2)$$

Поскольку величина схода прямо пропорциональна силе F , то перекося роlikоопоры в горизонтальной плоскости приводит к смещениям ленты в 6...8 раз больше, чем такой же перекося в вертикальной плоскости. При повороте трехроlikовой опоры ($\beta_1 = 30^\circ$, $\beta_2 = 0$) в горизонтальной плоскости на угол 3...4° боковые смещения ленты шириной 1,2 м достигают 0,03 м. Из (2) следует, что наиболее рациональным способом увеличения центрирующей способности става является увеличение коэффициента интенсивности восстанавливающих сил b линейных опор. Зависимость коэффициента b от параметров трехроlikовой опоры имеет следующий вид [2]:

$$b = Qg \frac{\sin 2\beta_1}{\rho},$$

$$\text{где } Q = \frac{\rho_r(l-l') \cos \beta_1 \sin(\beta_1 + \varphi)}{\cos \varphi} + \frac{\rho_l}{B},$$

где l — длина ролика;

l' — длина незагруженной части ролика;

φ — угол естественного откоса груза;

ρ_l — масса 1 м ленты.

Максимальная величина b для углов естественного откоса $10...20^\circ$ достигается при углах наклона боковых роликов $30...35^\circ$. Дополнительное увеличение b может быть достигнуто поворотом боковых роликов в плане. В этом случае

$$b = \frac{Qg}{\rho} [\sin 2\beta_1 + 2f_1(\beta_2)].$$

Поворот боковых роликов в плане на угол $2...3^\circ$ увеличивает восстанавливающие силы в $1,6...1,7$ раза. Подобная конструкция роlikоопор линейной секции может быть рекомендована для конвейеров, эксплуатируемых в условиях, когда точная установка става затруднена. При использовании пятироликовых желобчатых опор интенсивность восстанавливающих усилий возрастает по сравнению с трехроликовыми в $1,2...1,4$ раза за счет увеличения суммарной длины негоризонтально установленных роликов, а также большего наклона к горизонту крайних роликов.

На конвейерах с канатным ставом боковой сход ленты сопровождается дополнительным перекосом роlikоопор в вертикальной плоскости, возникающим вследствие перераспределения веса ленты и груза между канатами. Интенсивность восстанавливающих сил при этом уменьшается на величину b' . При навеске между поддерживающими канатами четырех роlikоопор $b' = 3\rho g^2 \frac{l_p^2}{HB_c^2}$, двух роlikоопор $b' = 1,5\rho g^2 \frac{l_p^2}{HB_c^2}$.

Роlikоопоры с шарнирным (в вертикальной плоскости) соединением роликов между собой и с канатами создают восстанавливающую силу, на $10...20\%$ меньшую, чем жесткие. У роlikоопор с шарнирным соединением роликов в вертикальной и горизонтальной плоскостях восстанавливающие силы на горизонтальных и уклонных конвейерах на $20...25\%$ больше, чем у жестких роlikоопор; на бремсберговых конвейерах применение данных роlikоопор без специальных приспособлений, препятствующих уводу роликов лентой, недопустимо.

Для сравнения бокового схода ленты на роlikоопорах различных конструкций введем коэффициент центрирования $\rho_{ц}$, равный отношению величины децентрирующей силы R_1 , необходимой для бокового схода ленты на допустимую величину $[\delta_1]$ на исследуемой конструкции става, к величине децентрирующей силы R_0 , вызывающей сход ленты на величину $[\delta_0]$ на ставе базовой конструкции:

$$\rho_{ц} = \frac{R_1}{R_0}.$$

За базовую примем жесткую конструкцию става с трехроликовыми опорами. Величина допустимого схода ленты на грузовой ветви определяется отсутствием просыпания груза и существенно зависит от угла наклона боковых роликов β_1 и угла естественного откоса груза φ .

Существует зависимость величины допустимого бокового схода $[\delta]$ от ширины незагруженной кромки ленты Δ и углов β_1 , φ :

$$[\delta] = \frac{\Delta}{2} \left[1 + \sqrt{0,5 + 2 \frac{\operatorname{tg}\varphi}{\operatorname{tg}\beta_1} \left(0,55 + \frac{0,2}{\cos\beta_1} - \frac{\Delta}{B} \right)} \right].$$

При увеличении угла β_1 от 30 до 45° величина $[\delta]$ уменьшается на $10 \dots 15 \%$. При действии сосредоточенной силы значения коэффициентов центрирования роlikоопор грузовой ветви горизонтального конвейера с параметрами $B = 1,2$ м; $S = 20$ кН; $v = 3,15$ м / с приведены в таблице 1.

Из таблицы 1 следует, что наибольшие значения коэффициента центрирования имеют жесткие трехроlikовые и пятироlikовые опоры с боковыми роlikами, повернутыми в плане. Равенство значений коэффициента центрирования трехроlikовой и пятироlikовой опор объясняется тем, что хотя восстанавливающие силы на пятироlikовой опоре больше, но величина допустимого бокового схода ленты на ней будет меньше, чем на трехроlikовой.

При действии на ленту распределенного децентрирующего усилия, вызванного неодинаковым натяжением канатов или стационарной нецентральной загрузкой ленты, величину усилия можно считать постоянной вдоль става. Тогда на значительном удалении от концевых барабанов боковые смещения ленты также постоянны по величине, децентрирующее усилие уравнивается восстанавливающими силами линейных опор:

$$F_{3,4} = \rho b \delta$$

При допускаемой разнице провесов канатов $0,01$ м боковые смещения ленты определяются выражением

$$\delta = \frac{0,01g \sum K_i \cos \beta_{li}}{bB_c}$$

Величина боковых смещений ленты обратно пропорциональна интенсивности восстанавливающих сил и для трехроlikовых опор не превышает $0,015$ м. Нецентральная нагрузка вызывает боковой сход ленты на величину, близкую смещению грузопотока сечением F_r относительно середины ленты:

$$\delta = \frac{\rho_r F_r}{\rho} \delta_r$$

Т а б л и ц а 1. — Значения коэффициентов центрирования роlikоопор грузовой ветви

Тип става	Тип роlikоопоры	Углы наклона роlikов	Коэффициент центрирования *
Жесткий	Жесткая трехроlikовая	$\beta_1 = 30^\circ, \beta_2 = 0$	1 / 1
		$\beta_1 = 30^\circ, \beta_2 = 2^\circ$	1,3 / 1,3
	Жесткая пятироlikовая	$\beta_{11} = 22^\circ, \beta_{12} = 45^\circ, \beta_1 = \beta_2 = 0$	1,1 / 1,2
		$\beta_{11} = 22^\circ, \beta_{12} = 45^\circ, \beta_1 = \beta_2 = 2$	1,3 / 1,5
Канатный	Жесткая трехроlikовая	$\beta_1 = 30^\circ, \beta_2 = 0$	0,9 / 0,9
	Трехроlikовая с шарнирным соединением роlikов в вертикальной плоскости	$\beta_1 = 30^\circ, \beta_2 = 0$	0,8 / 0,8
	Трехроlikовая с универсальным шарнирным соединением роlikов	$\beta_1 = 30^\circ$	1,2 / 1,2

Примечание. * В числителе значения при децентрирующем факторе — сосредоточенной силе, в знаменателе — сосредоточенном моменте.

Центрирующие свойства става не влияют на величину схода. Смещение грузопотока относительно ленты происходит вследствие бокового схода ленты в месте загрузки $\delta_{\text{л}}$ и смещения самого грузопотока относительно продольной оси конвейера $\delta_{\text{р}}$.

Рассматривая эти причины отдельно, следует отметить, что вследствие смещений ленты в месте загрузки ширина ее незагруженной кромки Δ уменьшается до величины $\Delta - \delta_{\text{л}} \left(1 - \frac{\rho_{\text{л}}}{2\rho}\right)$ (на трехроликовых опорах), а при смещении грузопотока — до величины $\Delta - \delta_{\text{р}} \left(1 - \frac{\rho_{\text{р}} F_{\text{р}}}{2\rho}\right)$ или $\Delta - \delta_{\text{р}} \left(1 - \frac{\rho_{\text{р}} F_{\text{л}}}{2\rho}\right)$.

Таким образом, отклонения поступающего грузопотока уменьшают ширину свободной кромки почти в 1,5 раза существеннее, чем отклонения ленты в месте загрузки.

Определим смещение ленты под действием сосредоточенного изгибающего момента M , возникающего при заклинивании в опоре бокового ролика. Решение уравнения (1) статических смещений ленты имеет следующий вид:

$$\delta = e^{-\eta_1 x} (C_1 \cos \eta_2 x + C_2 \sin \eta_2 x) + e^{\eta_1 x} (C_3 \cos \eta_2 x + C_4 \sin \eta_2 x),$$

где

$$\eta_1 = \left[\left(\frac{\rho b}{4EI} \right)^{1/2} + \frac{S - \rho v^2}{4EI} \right]^{1/2},$$

$$\eta_2 = \left[\left(\frac{\rho b}{4EI} \right)^{1/2} - \frac{S - \rho v^2}{4EI} \right]^{1/2}.$$

Пусть момент приложен в точке с координатой $x = 0$, тогда, учитывая кососимметричный характер смещений ленты, запишем граничные условия:

$$\begin{aligned} \delta(0) &= \delta(\infty) = 0, \\ \frac{d\delta}{dx}(\infty) &= 0, \\ \frac{d^2\delta}{dx^2}(0) &= \frac{M}{EI}. \end{aligned} \quad (3)$$

Определив из граничных условий постоянные C_{1-4} , запишем выражение для наибольших смещений ленты δ_{max} , имеющих место в точке $x = \frac{1}{\eta_1} \operatorname{arctg} \frac{\eta_2}{\eta_1}$:

$$\delta_{\text{max}} = \frac{M}{2EI\eta_1^2 \sqrt{1 + \eta_2 / \eta_1}} e^{\frac{\eta_1 \operatorname{arctg} \frac{\eta_2}{\eta_1}}{\eta_2}}.$$

С увеличением восстанавливающих сил, натяжения и жесткости ленты боковые смещения уменьшаются. Значения коэффициентов центрирования для конвейера с параметрами $B = 1200$ мм, $S = 20$ кН, $v = 3,15$ м/с приведены в таблице 1. У пятироликовых опор считаем заторможенным внутренний наклонный ролик. Расчеты показывают, что на грузовой ветви современных типажных подземных конвейеров боковые смещения ленты, вызванные заклиниванием бокового ролика, не превышают 0,01 м.

Исследование боковых смещений ленты порожняковой ветви конвейера. Рассмотрим боковой сход ленты на порожняковой ветви, оснащенной одно-, двух- и трехроликовыми опорами, под действием сосредоточенной децентрирующей силы и момента [3].

Боковые смещения ленты на порожняковой ветви гораздо сильнее зависят от типа роликоопор, чем на грузовой. Так, на двухроликовых опорах с роликами, наклоненными к горизонту под углом 10° , сход ленты в 7 раз меньше, чем на однороликовых опорах. Допустимые смещения ленты определяются величиной зазора между бортом ленты и металлоконструкцией става Δ_c и углом наклона роликов β_1 :

$$[\delta] = \frac{\Delta_c}{\cos \beta_1}.$$

Величина наибольших смещений ленты на желобчатых опорах $[\delta_2]$ определяется выражением

$$\delta_2 = \frac{F(a_1 - a_2)}{4\sqrt{\rho_{\text{л}} b_{\text{л}}} \sqrt{\frac{(S - \rho_{\text{л}} v^2)^2}{4EI} - \rho_{\text{л}} F b_{\text{л}}}},$$

где

$$a_{1,2} = \left\{ \frac{S - \rho_{\text{л}} v^2}{2EI} \pm \left[\left(\frac{S - \rho_{\text{л}} v^2}{2EI} \right)^2 - \frac{\rho_{\text{л}} b_{\text{л}}}{EI} \right]^{1/2} \right\};$$

$b_{\text{л}}$ — интенсивность восстанавливающих сил на порожняковой ветви:

$$b_{\text{л}} = \frac{2\rho_{\text{л}} F_{\text{л}} g}{B} \sin \beta_1.$$

С увеличением наклона боковых роликов к горизонту смещения ленты существенно уменьшаются, однако угол наклона регламентирован не только допустимым углом перегиба ленты. Глубина желоба порожняковой ветви ограничена также условием опирания ленты на боковые ролики: при значительной глубине желоба жесткая многослойная лента не вписывается в роликоопору, а опирается на ролики краями, что недопустимо. Крепление роликоопор порожняковой ветви к канатам става, подвешенного к кровле, уменьшает коэффициент центрирования в 1,06...1,08 раза за счет податливости канатов. Для устранения этого явления роликоопоры целесообразно закреплять в местах подвески канатов. Значения коэффициентов центрирования при параметрах $B = 1,4$ м, $S = 10$ кН, $v = 3,15$ м/с приведены в таблице 2.

При эксплуатации конвейеров с желобчатыми опорами возможны случаи, когда один из роликов опоры перестанет вращаться. Возникающие при этом боковые смещения ленты, описываемые уравнением (1) и граничными условиями (3), имеют следующий вид:

$$\delta = \frac{M}{EI(a_1^2 - a_2^2)} (e^{-a_1 x} - e^{-a_2 x}).$$

Т а б л и ц а 2. — Значения коэффициентов центрирования роlikоопор порожняковой ветви

Тип роlikоопоры	Углы наклона	Коэффициент центрирования *
Однороlikовая	—	1 / —
Двухроlikовая	$\beta_1 = 10^\circ, \beta_2 = 0$	7 / 1
	$\beta_1 = 10^\circ, \beta_2 = 2^\circ$	9 / 1,2
Трехроlikовая	$\beta_1 = 30^\circ, \beta_2 = 0$	1,2 / 1,8
	$\beta_1 = 30^\circ, \beta_2 = 2^\circ$	16 / 2,1

Примечание. * В числителе значения при децентрирующем факторе — сосредоточенной силе, в знаменателе — сосредоточенном моменте.

Наибольшие смещения ленты δ_{\max} имеют место в точке

$$x = \frac{1}{a_2 - a_1} \ln \frac{a_2}{a_1},$$

$$\delta_{\max} = \frac{M}{EI(a_1^2 - a_2^2)} \left[\left(\frac{a_2}{a_1} \right)^{-\frac{a_1}{a_1 - a_2}} - \left(\frac{a_2}{a_1} \right)^{-\frac{a_2}{a_1 - a_2}} \right]. \quad (4)$$

Из (4) следует, что смещения ленты порожняковой ветви при заклинивании бокового ролика больше смещений грузовой ветви. Это связано с тем, что величины децентрирующих моментов имеют одинаковый порядок на обеих ветвях (так как расстояние между опорами порожняковой ветви вдвое больше, чем грузовой), а натяжение и восстанавливающие силы на порожняковой ветви меньше. При замене двухроlikовых опор трехроlikовыми на конвейере с параметрами $B = 1,2$ м, $l_p = 2,4$ м, $S = 10$ кН величина момента уменьшается со 108 до 86 Н · м, а боковой сход — с 0,04 до 0,02 м. Значения коэффициента центрирования при действии сосредоточенного момента приведены в таблице 2.

Заключение. Исследование бокового схода ленты грузовой ветви конвейера показало, что наиболее опасными статическими децентрирующими факторами, вызывающими наибольшие смещения ленты, являются перекося роlikоопор в горизонтальной плоскости и нецентральная загрузка ленты. Остальные децентрирующие факторы вызывают несущественные смещения ленты. Наиболее рациональной конструкцией роlikоопоры грузовой ветви является жесткая трехроlikовая опора с боковыми роliками, повернутыми в плане на угол 2...2,5°.

При меньшей стоимости по сравнению с пятироlikовой опорой она имеет ту же величину коэффициента центрирования. Поскольку повышение центрирующих свойств става не уменьшает бокового схода, вызванного нецентральной загрузкой, то рациональным способом уменьшения смещений ленты является центральная установка загрузочных устройств и центрирование ленты в местах загрузки.

Наиболее опасным децентрирующим фактором на порожняковой ветви конвейера является перекося роликкопор в горизонтальной плоскости. Для устранения перекося и регулировки хода ленты в конструкции става и опор должно быть предусмотрено плавное регулирование положения роликкопор в горизонтальной плоскости. Наиболее рациональной конструкцией роликкопоры порожняковой ветви является унифицированная трехроликковая опора с роликами, повернутыми в плане на $2...2,5^\circ$.

Список цитируемых источников

1. *Захаров, Ю. Н.* Ленточные конвейеры горной промышленности: исследования и проектирование : монография / Ю. Н. Захаров. — Гродно : ГГАУ, 2013. — 417 с.
2. *Шахмейстер, Л. Г.* Теория и расчет ленточных конвейеров / Л. Г. Шахмейстер, В. Г. Дмитриев. — М. : Машиностроение, 1978. — 392 с.
3. Ленточные конвейера в горной промышленности / В. А. Дьяков [и др.] — М. : Недра, 1982. — 349 с.

Поступила в редакцию 05.05.2020