

К. т. н. В. М. Таугер, д. т. н. С. Я. Давыдов(✉), д. т. н. Н. Г. Валиев, М. С. Филатов

ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет»,
г. Екатеринбург, Россия

УДК 621.867.2.001.24

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ КОНТАКТА ЛЕНТЫ С ШАРОВЫМИ ОПОРАМИ ТРУБЧАТОГО ЛЕНТОЧНОГО КОНВЕЙЕРА

Показано, что от величины деформации ленты трубчатого ленточного конвейера в контакте с шарами зависят ее долговечность и сопротивление движению. Рассмотрена деформация ленты трубчатого конвейера с шаровыми опорами. На основе положений сопротивления материалов и теории упругости получены формулы, которые позволяют путем подстановки конкретных физико-механических характеристик вычислить прогибы ленты под действием опорных шаров в ее как поперечном сечении, так и продольном.

Ключевые слова: трубчатый ленточный конвейер (ТЛК), шаровые опоры, упругая деформация, сила натяжения, модуль упругости, толщина ленты.

Ужесточение мер по охране окружающей среды способствует интенсивному развитию герметически закрытых способов транспортирования грузов, один из которых реализован при использовании трубчатого ленточного конвейера (ТЛК) при перемещении золы на Рефтинской ГРЭС для ее использования в стройиндустрии. В таблице представлен перечень зарубежных ТЛК (<http://pandina.ru/text/80/138/9642.php>).

Вследствие перекоса роликов (рис. 1) тратится больше энергии на преодоление сил трения, а учитывая то, что длина ТЛК может составлять десятки километров, потери получаются довольно внушительными. Во избежание излишних потерь на преодоление сил трения была предложена замена цилиндрических роликов на ролики в виде шаров [1–4]. На рис. 2 схематично представлено поперечное сечение рабочей ветви ленты ТЛК [2] с шаровыми опорами. Вхождение ленты в контакт с опорными шарами сопровождается деформацией контактирующих тел (в основном ленты, так как шар значительно более жесткий). От величины деформации зависят сопротивление движению ленты и ее долговечность.

Выполнена работа по определению пятна контакта шара с лентой с использованием теории упругости [3, 5], которая решает задачу о распределении контактных напряжений и размерах поверхности соприкосновения в паре цилиндр – сфера. Цилиндр считается монолитным и обладает модулем упругости материала ленты. Рассмотрим деформацию ленты ТЛК с шаровыми опорами. На рис. 3, а показан фрагмент поперечного,

на рис. 3, б — продольного сечения ленты в зонах контакта с шарами. Для точного определения геометрии упругой линии и поверхности контакта необходимо решить сложную задачу о взаимодействии ленты со всеми шарами, образующими опору. Для этого примем следующие допущения: деформация порожней трубы равна нулю; соб-



Рис. 1. ТЛК TAKRAF от силосного склада золы на золоотвал сухого складирования Рефтинской ГРЭС (ОАО «Энел Россия»)

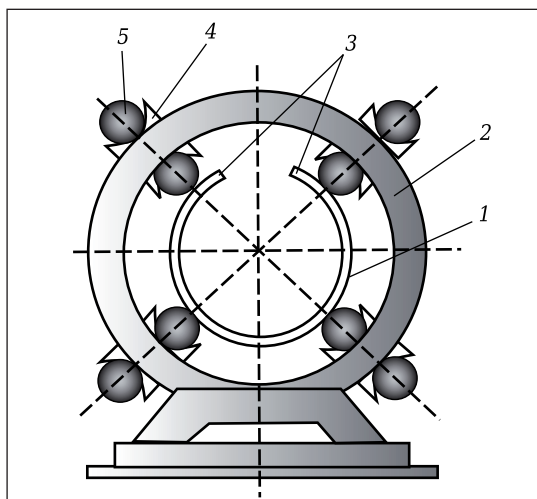


Рис. 2. Поперечное сечение рабочей ветви ленты ТЛК: 1 — транспортная лента; 2 — опоры; 3 — кромки ленты; 4 — дорожки качения; 5 — шары (тела качения)



С. Я. Давыдов
E-mail: davidovtrans@mail.ru

№ п/п	Location	Conveyor Length, m	Diameter, mm	Capacity, tph	Material Conveyed	Date Commissioned	Particle Size, mm
1	Finland	1200	315	300	PaperPulp	1995	Pulp
2	»	300	250	300	PaperPulp	1995	Pulp
3	VikramIspat, India	180	240	400	HBI / DRI	1996	-80
4	IndoGulf, India	3300	450	1760	Briquettes	Feb 1999	-80
				1540	Copper Concentrate	Upgraded 2004	
				1100	Rock Phosphate		
5&6	Sweden	2 × 200	315	450	Coal	1995	-30
7	Chanda, India	147	240	250	Cement	Dec 2001	90 % <3500 Blaine
8	Coromundal, India	95	240	100	RockPhosphate	Feb 2002	95 % <25
9 & 10	Hindalco, India	2 × 200	275	375	Coal	Mar 2003	100 % -20
11	Tadipatri, India	470	315	800	Clinker	Dec 2000	95 % <25
12	MadrasCement, India	70	150	140	Ilyasa / Gypsum	2002	PowderLumps
13	RichardsBay, South Africa	870	360	≤2500	Zircon, Rutile, Leucoxene, Ilmenite, CP SP Slag	2002	100 % -2
14	То же	350	340	900	RockPhosphate	2002	100 % -5
15	» »	412	340	900	RockPhosphate	2002	100 % -5
16	Nirma, India	380	240	100	KurbLimeStone	2002	100 % <25
17	Coromandel, India	167	315	500	RockPhosphate	Dec 2003	100 % -10
18	» »	270	200	600	RockPhosphate	ExpOct 2004	100 % -10
19	VikramCement, India	400	240	385	Cement	ExpOct 2004	4000 Blaine
20	Sterlite LDC, India	5000	400	1150	BauxiteOre	ExpEnd2005	80 % <80
21	VedantaAlumina Ltd, India	480	300	350	Calcined Alumina	ExpEnd 2005	85 % <50
22	Coromandel, India	135	200	100	Complex Fertiliser	ExpJan 2005	1-4
23	» »	108	400	750	RockPhosphate / Map / Mud	ExpMar 2005	3-12
24	Dalmha Cement (Bharat) Ltd, India	260	200	150	Coal / Lignite	ExpMar 2005	80
25	То же	278	200	150	Coal / Lignite	ExpMar 2005	80
26	» »	150	300	500	Limestone	ExpMar 2005	80
27	» »	142	360	1200	Limestone	ExpMar 2005	80
28	» »	184	260	250	Gypsum / Fly Ash / Cement Additives	ExpMar 2005	80

ственный погонный вес трубы не учитывается; влияние изгибной жесткости ленты на прогиб незначительно. Первое допущение означает, что порожняя труба (на рис. 3, а показана тонкой линией) контактирует с шарами в точках, лежащих на дуге окружности радиуса R . Расстояние между точками контакта с лентой двух соседних шаров равно B . Высоту f_0 сегмента окружности можно считать исходным прогибом ленты.

Загрузка конвейера сыпучим материалом приводит к появлению распределенной нагрузки на ленту, в результате чего длина ее участка между шарами увеличивается и прогиб ленты достигает величины f_1 . Выделим элемент ленты длиной dl и шириной dB (рис. 4). На него будет действовать вес материала, равный

$$dG = \rho g dl dB h, \quad (1)$$

где ρ — насыпная плотность материала; g — ускорение свободного падения; h — высота слоя материала на ленте.

Удобно представить вес материала в виде распределенной по пролету B нагрузки q . С учетом того что B значительно меньше, чем $2R$ (см. рис. 3, а), принимаем

$$q = \frac{dG}{dB} = \rho g dl h = \text{const.} \quad (2)$$

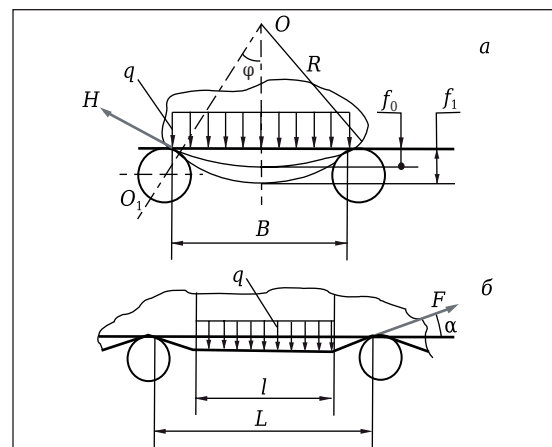


Рис. 3. Деформация трубчатой ленты на шаровых опорах

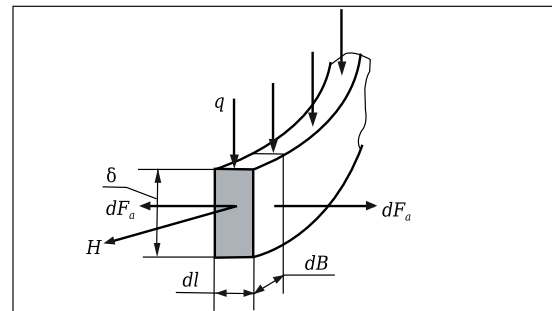


Рис. 4. Элемент ленты ТЛК в поперечном сечении

Рассматривая элемент ленты в статике, полагаем, что на его боковые стороны действуют равные по модулю и противоположно направленные элементарные осевые силы dF_a . При этом элемент может быть уподоблен упругой нити, подвешенной на двух опорах, для которой справедливо уравнение*:

$$B\left(1 + \frac{8f_1^2}{3B^2}\right) = B\left(1 + \frac{8f_0^2}{3B^2}\right) + \frac{HB}{E\delta dl'} \quad (3)$$

где H, E, δ — сила натяжения, модуль упругости и толщина ленты соответственно.

При получении формулы (3) принимаем следующее: дуга окружности радиуса R между шарами мало отличается от параболы; увеличение прогиба вызвано только упругим натяжением ленты.

Значение силы натяжения H находится по формуле*

$$H \approx \frac{qB^2}{8f_1}. \quad (4)$$

Подставляя формулы (2) и (4) в уравнение (3), после соответствующих преобразований получаем уравнение относительно f_1 :

$$f_1^3 - f_0^2 f_1 - \frac{3B^3 \rho gh}{64E\delta} = 0. \quad (5)$$

Выражение для прогиба ленты f_1 находится как корень кубический уравнения (5) одним из способов (например, по методу Кардана), описанных в публикации [6]:

$$f_1 = \sqrt[3]{\frac{3B^3 \rho gh}{128E\delta}} + \sqrt[3]{\left(\frac{3B^3 \rho gh}{128E\delta}\right)^2 - \frac{f_0^3}{27}} + \sqrt[3]{\frac{2B^3 \rho gh}{128E\delta} - \sqrt{\left(\frac{3B^3 \rho gh}{128E\delta}\right)^2 - \frac{f_0^3}{27}}}. \quad (6)$$

Упругая линия ленты между шарами (см. рис. 3) преобразуется из дуги окружности в параболу с уравнением*

$$y = Cx^2. \quad (7)$$

Точка с координатами $\left(\frac{B}{2}; f_1\right)$ лежит на этой параболе, и постоянная C находится путем подстановки координаты f_1 в уравнение (7):

$$C = \frac{4f_1}{B^2}, \quad (8)$$

откуда

$$y = \frac{4f_1}{B^2} x^2. \quad (9)$$

На рис. 5 показан обхват шара лентой. Точка вхождения ленты в контакт с шаром под действием веса транспортируемого материала смещается из положения K_0 (порожня лента) в положение K_1 . При выводе формул (5) и (9) смещение $K_0 K_1$ не учитывалось, поскольку $K_0 K_1 \ll B$.

Тангенс угла α_1 наклона касательной $A_1 A_2$ к поверхности шара в точке $K_1 (0,5B; f_1)$ найдем

* <http://www.toehelp.ru>. (лекция № 15. Расчет гибких нитей).

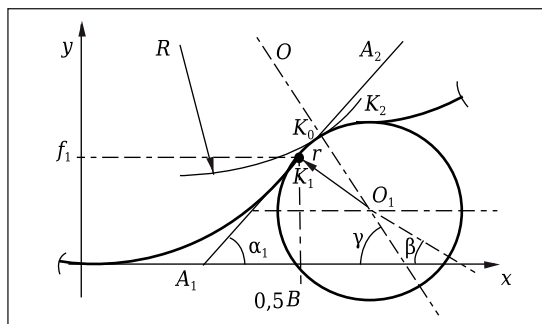


Рис. 5. Обхват шаровой опоры лентой в поперечном сечении

как значение первой производной функции (9):

$$\operatorname{tg} \alpha_1 = y' = 2 \frac{B}{2} \cdot \frac{4f_1}{B^2} = \frac{4f_1}{B}. \quad (10)$$

Отсюда

$$\alpha_1 = \operatorname{arctg} \frac{4f_1}{B}. \quad (11)$$

Угол β (см. рис. 5) между радиусом r шара, проведенным в точку K_1 (т. е. отрезком $O_1 K_1$), и осью x равен

$$\beta = \left(\frac{\pi}{2} - \alpha_1\right), \quad (12)$$

а угол γ между линией центров OO_1 и осью x

$$\gamma = \frac{\pi}{2} - \varphi \approx \arccos\left(\frac{B}{2R}\right), \quad (13)$$

где φ — угол установки шаров, показанный на рис. 3, а.

Выражения (11) – (13) позволяют найти длину дуги $K_0 K_1$ в виде

$$K_0 K_1 = r(\gamma - \beta), \quad (14)$$

где значения углов γ и β указаны в радианах.

Предположим далее, что поверхность контакта по дуге $K_0 K_1$ ленты с шаром симметрична относительно плоскости, параллельной оси трубы и проецирующейся на плоскость (см. рис. 5) в виде прямой OO_1 . Тогда дуга $K_0 K_1$ есть полуось поверхности контакта, имеющей ширину $K_1 K_2 = 2K_0 K_1 = 2r(\gamma - \beta)$.

В продольном сечении ленты (см. рис. 3, б) при достаточно большом пролете L вмятина, обусловленная контактом с шаром, на расстоянии $\frac{L-l}{2}$ разглаживается, и отрезок l принимает

форму трубы, деформация которой носит уже не местный характер. Правомерно поэтому представить отрезок l абсолютно жестким (недеформируемым). Выделим элемент ленты шириной dB в продольном сечении (рис. 6) подобно тому, как это было сделано в поперечном сечении (см. рис. 4). На участке $C_1 D$ (рис. 7) элемент представляет собой упругую нить, а на участке длиной l — жесткую балку. Таким образом, расчетная

схема элемента в пролете между двумя соседними опорными шарами выглядит как балка шириной dB , повернутая относительно вертикальной плоскости на угол φ и подвешенная на двух упругих нитях. Вся система нагружена распределенной нагрузкой q , но учитывая, что $C_1D \ll l$, далее принимаем во внимание нагрузку, приходящуюся на жесткий участок.

По условию статического равновесия расчетной схемы

$$\rho g l h d B \cos \varphi = 2 F s \sin \alpha, \quad (15)$$

где F — сила натяжения упругой нити.

Левая часть выражения (15) есть вес G материала, приходящийся на жесткий участок расчетной схемы. Для определения величины и направления силы натяжения упругой нити F (см. рис. 7) примем допущения: значение F постоянное по длине C_1D ; отрезок CD есть исходная длина отрезка C_1D . Отрезок C_1D состоит из прямолинейной части C_1K_3 и дуги K_3D , поэтому

$$F = \frac{C_1D - CD}{CD} EdB\delta = \frac{CD - r s \sin \alpha}{\cos \alpha} + r \alpha - CD \quad (16)$$

После подстановки F из выражения (15)

$$F = \frac{\rho g l h d B \cos \varphi}{2 s \sin \alpha} \quad (17)$$

получаем уравнение, угол α в котором неизвестен:

$$2 s \sin \alpha E \delta \frac{CD - r s \sin \alpha}{\cos \alpha} + r \alpha - CD - \rho g l h \cos \varphi = 0. \quad (18)$$

С известной долей приближения можно считать участок C_1D прямолинейным и равным $CD/\cos \alpha$ тогда уравнение (16) принимает вид

$$F = \frac{1 - \cos \alpha}{\cos \alpha} EdB\delta \quad (19)$$

и уравнение (18) становится более компактным:

$$2 s \sin \alpha E \delta \frac{1 - \cos \alpha}{\cos \alpha} - \rho g l h \cos \varphi = 0. \quad (20)$$

Решение тригонометрического уравнения (20) даст значение угла α , после чего появляется

Библиографический список

1. Пат. 2548218 Российская Федерация. Ленточный конвейер / Давыдов С. Я., Косарев Н. П., Валиев Н. Г., Боярский Г. А. — № 2013134805 ; заявл. 23.07.13 ; опубл. 20.04.15, Бюл. № 11.
2. Заявка 2016145381 Российская Федерация. Ленточный конвейер с шаровыми опорами / Таугер В. М., Давыдов С. Я., Боярских Г. А., Филатов М. С. ; заявитель ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет» ; заявл. 18.11.16.
3. Давыдов, С. Я. Предпосылки создания энергосберегающих конструкций трубчатых ленточных конвейеров / С. Я. Давыдов, Н. П. Косарев, Н. Г. Валиев [и др.] // Новые огнеупоры. — 2016. — № 10. — С. 22–26.

Davydov, S. Ya. Prerequisites for the creation of energy-conserving constructions of tubular belt

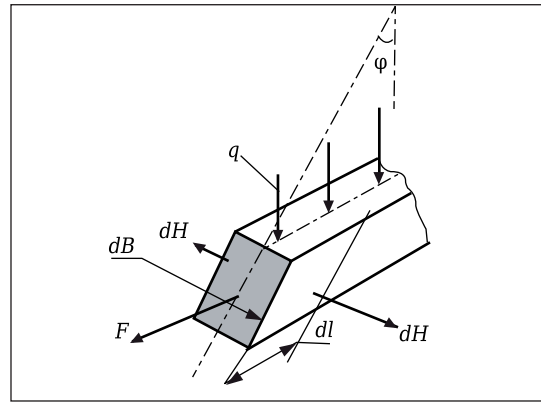


Рис. 6. Элемент ленты ТЛК в продольном сечении

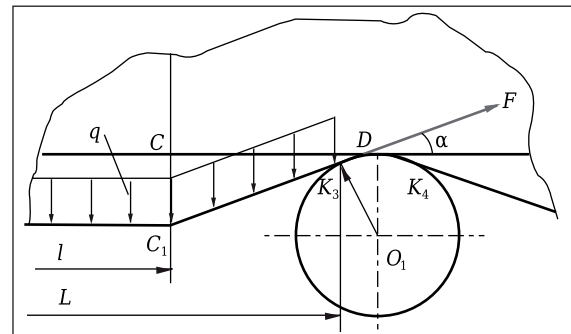


Рис. 7. Обхват шаровой опоры лентой в продольном сечении

ся возможность определить вторую полуось поверхности контакта K_3D (см. рис. 7):

$$K_3D = r \alpha, \quad (21)$$

а симметрия расположения расчетных схем относительно радиуса O_1D шара позволяет найти полную длину оси $K_3K_4 = 2r\alpha$.

Таким образом, предложена новая конструкция ТЛК с шаровыми опорами. Представление ленты конвейера в виде упругой цилиндрической оболочки позволило получить формулы для вычисления размеров, характеризующих деформацию груженной ветви ленты под действием опорных шаров как в поперечном ее сечении, так и в продольном.

conveyors / S. Ya. Davydov, N. P. Kosarev, N. G. Valiev [et al.] // Refractories and Industrial Ceramics. — 2016. — Vol. 57, № 5. — P. 462–466.

4. Пат. 157392 Российская Федерация. Ленточный конвейер с трубчатым сечением лент / Давыдов С. Я., Афанасьев А. И. — № 2015131190 ; заявл. 27.07.15 ; опубл. 27.11.15, Бюл. № 33.

5. Лурье, А. И. Теория упругости / А. И. Лурье. — М. : Наука, 1970. — 970 с.

6. Выгодский, М. Я. Справочник по высшей математике / М. Я. Выгодский. — М. : АСТ, Астрель, 2006. — 991 с. ■

Получено 25.01.17

© В. М. Таугер, С. Я. Давыдов, Н. Г. Валиев, М. С. Филатов, 2017 г.