

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ КОНВЕЙЕРА НА
КОЭФФИЦИЕНТ СОПРОТИВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЮ ЛЕНТЫ И ГРУЗА
ПО РОЛИКООПОРАМ КОНВЕЙЕРА С ЛЕНТОЙ ГЛУБОКОЙ
ЖЕЛОБЧАТОСТИ**

В данной работе разработана математическая модель взаимодействия ленты и груза при движении по роликоопорам конвейера с лентой глубокой желобчатости, найдены зависимости коэффициента сопротивления обусловленные деформацией груза, параметрами конвейера, роликоопор и свойств груза.

**RESEARCH OF PARAMETERS FOR CONVEYOR FACTOR RESISTANCE
BANDS AND LOAD ON RIBBON CONVEYORS WITH ROLLER DEEP
GROOVED**

In this paper developed a mathematical model of the interaction ribbon and load while driving on a conveyor belt roller carriages deep grooved, found dependence of the resistance due to deformation of the load parameters of conveyor idlers and properties of the load.

В работе [1] дана математическая модель взаимодействия ленты и груза с роликоопорами ленточного конвейера с лентой глубокой желобчатости. Были получены уравнения деформации при движении ленты и груза по роликоопорам ленточного конвейера, которые имеют вид:

$$\text{при } 0 \leq x \leq a \quad D_1 \frac{d^4 y_1}{dx^4} - S_n \frac{d^2 y_1}{dx^2} = q_{\delta.a.}, \quad (1)$$

$$\text{при } a \leq x \leq l_p \quad D_1 \frac{d^4 y_2}{dx^4} - S_n \frac{d^2 y_2}{dx^2} = q_{\delta.n.}, \quad (2)$$

где y_1, y_2 - координаты прогиба ленты; $q_{\delta.a.}, q_{\delta.n.}$ - активное и пассивное давление на ленту; l_p - расстояние между роликоопорами; a - зона действия активного давления; S - натяжение ленты; D_1 - изгибная жесткость ленты.

При этом граничные условия на границе балки имеют вид

$$\begin{aligned} \text{при } x = 0 : y_1 = 0; \frac{dy_1}{dx_1} = 0; \\ \text{при } x = l_p : y_2 = 0; \frac{dy_2}{dx_2} = 0. \end{aligned} \quad (3)$$

Граничные условия в середине пролета балки соответственно запишутся в виде

$$\text{при } x = a, : y_1 = y_2; \frac{dy_1}{dx_1} = \frac{dy_2}{dx_2}; \frac{d^2 y_1}{dx_1^2} = \frac{d^2 y_2}{dx_2^2}; \frac{d^3 y_1}{dx_1^3} = \frac{d^3 y_2}{dx_2^3}; \quad (4)$$

В результате решения уравнения (1) и (2) при граничных условиях (3) и (4) для случая $a = l_p / 2$ определены моменты на левом и правом концах балки.

На левом конце балки

$$M_1(0) = D_1 \frac{d^2 y_1}{dx^2} \Big|_{x=0} = D_1 \left[\frac{q_{\bar{\sigma}.n.} + q_{\bar{\sigma}.a.}}{2S} ua \frac{ch(ua)}{sh(ua)} + \frac{q_{\bar{\sigma}.n.} + q_{\bar{\sigma}.a.}}{2S} \frac{(1 - \frac{u^2 a^2}{2})sh(ua) - ua}{sh(ua) - uach(ua)} - \frac{q_{\bar{\sigma}.a.}}{S} \right] \quad (5)$$

На правом конце балки

$$M_2(l_p) = D_1 \frac{d^2 y_2}{dx^2} \Big|_{x=l_p} = D_1 \left[\frac{q_{\bar{\sigma}.n.} + q_{\bar{\sigma}.a.}}{2S} ua \frac{ch(ua)}{sh(ua)} - \frac{\sigma_a + \sigma_n}{2S} \frac{(1 - \frac{u^2 a^2}{2})sh(ua) - ua}{sh(ua) - uach(ua)} - \frac{q_{\bar{\sigma}.a.}}{S} \right] \quad (6)$$

где $u = \sqrt{\frac{S}{D_1}}$

Момент силы сопротивления на боковой роликоопоре определяется, как разность моментов на левом и правом концах балки

$$M_c = M_2(l_p) - M_1(0). \quad (7)$$

А сила сопротивления на боковом ролике определяется по формуле

$$F_c = \frac{M_c}{r}, \quad (8)$$

где r -радиус ролика.

Подставляя (5) и (6) в (7) и (8), в результате получим сопротивление на роликоопоре

$$F_c = \frac{(q_{\bar{\sigma}.n.} - q_{\bar{\sigma}.a.})}{ur} \cdot \frac{\frac{ua}{2} sh(ua) - ch(ua) + 1}{uach(ua) - sh(ua)} \quad (9)$$

Коэффициент сопротивления при движении ленты на роликоопоре ленточного конвейера от деформации груза определим по формуле

$$k_c = \frac{2F_c}{ql_p}, \quad (10)$$

где q – погонный вес груза и ленты.

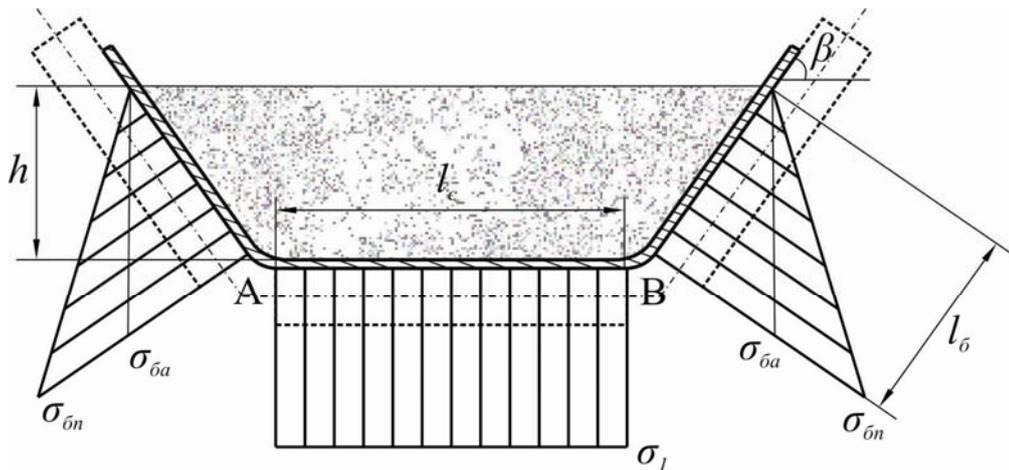
Подставив (9) в (10), в результате получим

$$k_c = \frac{(q_{\sigma.n.} - q_{\sigma.a.})}{uqr} \cdot \frac{\frac{ua}{2} sh(ua) - ch(ua) + 1}{uach(ua) - sh(ua)} \quad (11)$$

Из формулы (11) видно, что для определения коэффициента сопротивления k_c необходимо знать значение активного $q_{\sigma.a.}$ и пассивного $q_{\sigma.n.}$ бокового давления.

При движении ленты и груза по роlikоопорам под действием сил упругости ленты и груза происходит ее развал; при этом боковое давление груза на ленту резко уменьшается от пассивного значения $q_{\sigma.n.}$ до активного значения $q_{\sigma.a.}$ [2]. Активное боковое $q_{\sigma.a.}$ давление поддерживается вдоль конвейера до определенной точки между роlikоопорами. Затем с этой точки под действием упругих сжимающих сил со стороны ленты конвейера боковое давление на груз резко увеличивается от активного значения $q_{\sigma.a.}$ до пассивного значения $q_{\sigma.n.}$ и поддерживается постоянно до роlikоопоры. При этом давление на средний ролик при движении ленты по трехроlikовой опоре практически не меняется. Определим величины активного и пассивных боковых давлений действующих на груз на стороны ленты конвейера при ее движении по трехроlikовой опоре.

На рис. 1 дана схема напряженного состояния груза для трехроlikовой опоры ленточного конвейера.



Напряженное состояние в точках А и В

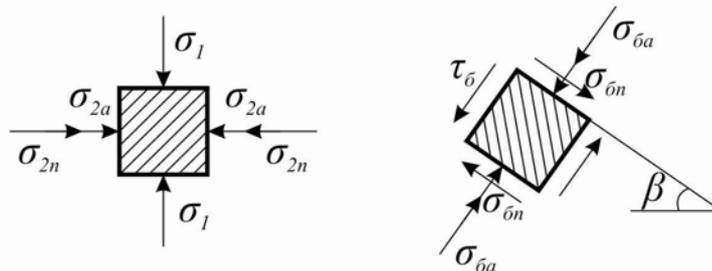


Рис. 1 - Схема напряженного состояния груза на ленте конвейера

Для горизонтального конвейера в силу небольшой глубины груза h на дно лотковой ленты со стороны насыпного груза действуют только нормальные напряжения σ_1 (касательное напряжение равно нулю) [1].

$$\sigma_1 = \gamma h, \quad (12)$$

где γ - удельный вес груза (кг/м^3)

Согласно [2], в точках A и B (см. рис 1) главные боковые активные и пассивные давления $\sigma_{2.a.}$ и $\sigma_{2.n.}$ определяются по формулам

$$\begin{aligned} \sigma_{2.a.} &= \gamma h m, \\ \sigma_{2.n.} &= \frac{\gamma h}{m}, \end{aligned} \quad (13)$$

где m – коэффициент подвижности сыпучего груза, определяемый по формуле

$$m = 1 + 2f^2 - 2f\sqrt{1+f^2} \approx \frac{0.18}{f}, (0.4 < f \leq 1.2),$$

где f – коэффициент внутреннего трения транспортируемого груза

Активное $\sigma_{\delta.a.}$ и пассивное $\sigma_{\delta.n.}$ напряжение действующее на боковую стенку лотка ленты определим по формуле [2]:

$$\begin{aligned} \sigma_{\delta.a.} &= \sigma_1 \cos^2 \beta + \sigma_{2.a.} \sin^2 \beta, \\ \sigma_{\delta.n.} &= \sigma_1 \cos^2 \beta + \sigma_{2.n.} \sin^2 \beta, \end{aligned} \quad (14)$$

β - угол наклона боковой стенки, град.

Подставляя (12) и (13) в (14), получим

$$\begin{aligned} \sigma_{\delta.a.} &= \gamma h (\cos^2 \beta + m \sin^2 \beta), \\ \sigma_{\delta.n.} &= \gamma h (\cos^2 \beta + \frac{\sin^2 \beta}{m}). \end{aligned} \quad (15)$$

Погонная нагрузка на дно лотка q_c активные и пассивные погонные нагрузки $q_{\delta.a.}$ и $q_{\delta.n.}$ на боковые стенки лотка определяются как площадь эпюр нормальных давлений на дно и боковые стенки лотка ленты, (см. рис. 1) в результате имеем

$$\begin{aligned}
 q_{\bar{o}.a.} &= \frac{1}{2} \sigma_{\bar{o}.a.} l_{\bar{o}.}; \\
 q_{\bar{o}.n.} &= \frac{1}{2} \sigma_{\bar{o}.n.} l_{\bar{o}.}; \\
 q_c &= \sigma_1 l_c.
 \end{aligned}
 \tag{16}$$

Подставляя (12) и (15) в (16), получим

$$\begin{aligned}
 q_c &= \gamma h l_c, \\
 q_{\bar{o}.a.} &= \gamma h \frac{l_{\bar{o}.}}{2} (\cos^2 \beta + m \sin^2 \beta), \\
 q_{\bar{o}.n.} &= \gamma h \frac{l_{\bar{o}.}}{2} (\cos^2 \beta + \frac{\sin^2 \beta}{m}).
 \end{aligned}
 \tag{17}$$

При этом согласно рис. 1 длина борта ленты, заполненного сыпучим грузом, определяется по формуле

$$l_{\bar{o}.} = \frac{h}{\sin \beta}
 \tag{18}$$

По заданной погонной нагрузке q определим высоту насыпного груза h на ленте. Производительность конвейера определяется по формуле [3]:

$$Q = q v_l = \gamma_l F,
 \tag{19}$$

где F – площадь сечения груза на ленте конвейера, v_l – скорость движения ленты конвейера

Площадь груза на ленте согласно рис. 1 определим по формуле

$$F = h l_c + \frac{h^2}{\operatorname{tg} \beta}.
 \tag{20}$$

Подставляя (20) в (19), получим

$$q = \gamma (h l_c + \frac{h^2}{\operatorname{tg} \beta}).
 \tag{21}$$

Определяя из (21) h , получим

$$h = \frac{\sqrt{l_c^2 \operatorname{tg}^2 \beta + 4 \frac{q}{\gamma} \operatorname{tg} \beta} - l_c \operatorname{tg} \beta}{2}. \quad (22)$$

Подставляя (18) в (17) окончательно получим

$$\begin{aligned} q_c &= \gamma h l_c, \\ q_{\text{б.а.}} &= \frac{\gamma h^2}{2 \sin \beta} (\cos^2 \beta + m \sin^2 \beta), \\ q_{\text{б.п.}} &= \frac{\gamma h^2}{2 \sin \beta} \left(\cos^2 \beta + \frac{\sin^2 \beta}{m} \right). \end{aligned} \quad (23)$$

Аналогично определим погонные нагрузки на ролики четырехроликовой опоры (см. рис 2).

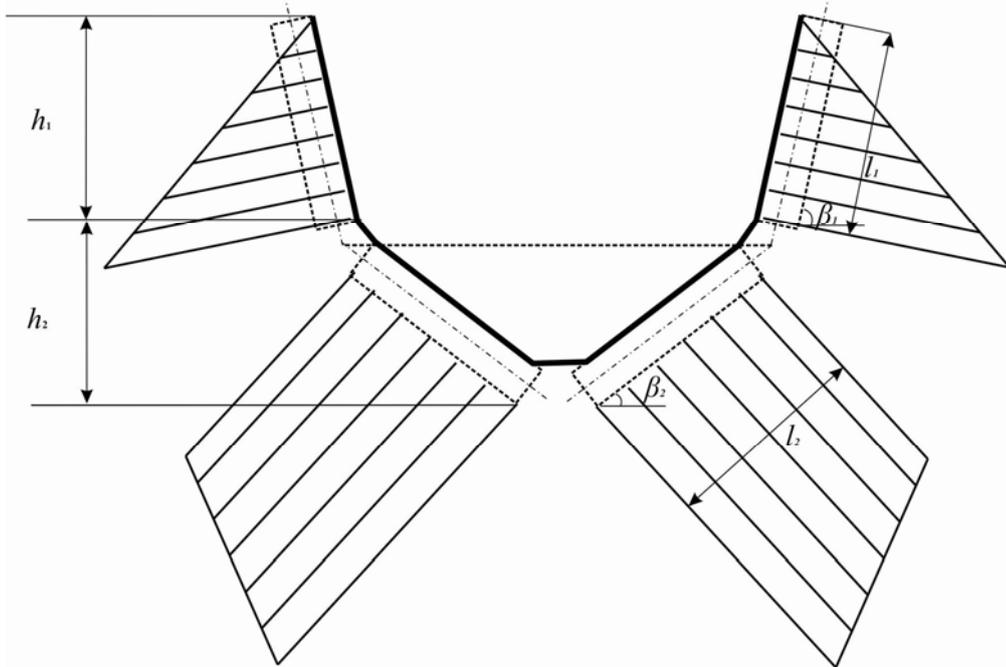


Рис. 2 - Схема напряженного состояния 4-х роликовой опоры.

Активные и пассивные нагрузки на верхние боковые ролики для четырехроликовой опоры определяется по порулам

$$\begin{aligned} q_{\text{б.а.}}^{(1)} &= \frac{\gamma h_1^2}{2 \sin \beta_1} (\cos^2 \beta_1 + m \sin^2 \beta_1), \\ q_{\text{б.п.}}^{(1)} &= \frac{\gamma h_1^2}{2 \sin \beta_1} \left(\cos^2 \beta_1 + \frac{\sin^2 \beta_1}{m} \right). \end{aligned} \quad (24)$$

Активные и пассивные нагрузки на нижние боковые ролики

$$q_{\delta.a}^{(2)} = \frac{\gamma h_2 (h_1 + h_2)}{2 \sin \beta_2} (\cos^2 \beta_2 + m \sin^2 \beta_2),$$

$$q_{\delta.n}^{(2)} = \frac{\gamma h_2 (h_1 + h_2)}{2 \sin \beta_2} \left(\cos^2 \beta_2 + \frac{\sin^2 \beta_2}{m} \right),$$
(25)

где $q_{\delta.a}^{(1)}, q_{\delta.n}^{(1)}$ - активная и пассивная нагрузка на верхний боковой ролик; $q_{\delta.a}^{(2)}, q_{\delta.n}^{(2)}$ - активная и пассивная нагрузка на нижний боковой ролик; h_1, h_2 - высота слоя груза действующего на верхний и нижние ролики.

Здесь h_1 и h_2 - определяются по формулам

$$h_1 = \frac{\frac{q}{\gamma} \operatorname{tg} \beta_2 - h_2^2}{\sqrt{l_2^2 + \frac{\operatorname{tg} \beta_1}{\operatorname{tg} \beta_2} \left(\frac{q}{\gamma} \operatorname{tg} \beta_2 - h_2^2 \right) + l_2}},$$

$$h_2 = l_2 \sin \beta_2,$$
(26)

где l_2 - длина нижнего бокового ролика.

В случае пятироликовой опоры (см. рис 3)

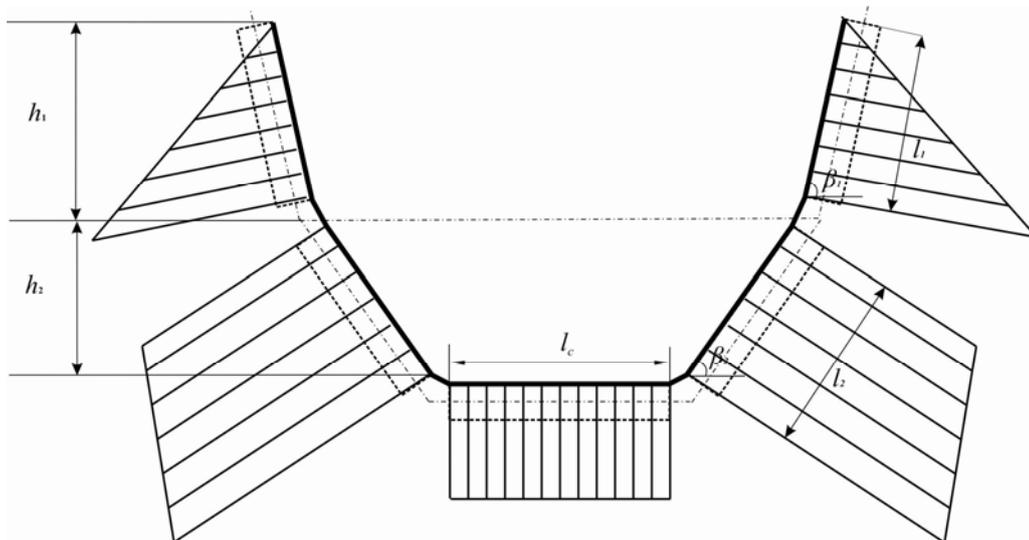


Рис. 3 - Схема напряженного состояния 5-ти роликовой опоры.

активная и пассивная погонные нагрузки на верхние и нижние боковые ролики определяется так же по формулам (24) и (25) лишь только величина h_1 определяется по формуле

$$h_1 = \frac{\frac{q}{\gamma} \operatorname{tg} \beta_2 - h_2^2 - h_2 l_c \operatorname{tg} \beta_2}{\sqrt{\left(l_2 + \frac{l_c}{2} \operatorname{tg} \beta_2\right)^2 + \frac{\operatorname{tg} \beta_2}{\operatorname{tg} \beta_1} \left(\frac{q}{\gamma} \operatorname{tg} \beta_2 - h_2^2 - h_2 l_c \operatorname{tg} \beta_2\right) - \left(l_2 + \frac{l_c}{2} \operatorname{tg} \beta_2\right)}}, \quad (27)$$

где l_c - длина среднего ролика пятироликовой опоры.

Подставляя значения $q_{\delta.a.}$, $q_{\delta.n.}$ из формул $q_{\delta.a.}^{(1)}$, $q_{\delta.n.}^{(1)}$, $q_{\delta.a.}^{(2)}$, $q_{\delta.n.}^{(2)}$ в формулу (11) получим значение коэффициента сопротивления при движении ленты и груза по роликоопорам ленточного конвейера от деформации груза для трехроликовой опоры. Подставляя $q_{\delta.a.}^{(1)}$, $q_{\delta.n.}^{(1)}$ из (24) и $q_{\delta.a.}^{(2)}$, $q_{\delta.n.}^{(2)}$ из (25) в формулу (9) получим силы сопротивления при движении на верхних F_{c1} и нижних F_{c2} боковых роликов четырех роликовых и пятироликовых опор. Общая сила сопротивления от деформации груза при движении ленты с грузом по роликоопорам определены по формуле

$$F_c = F_{c1} + F_{c2}. \quad (28)$$

Подставляя F_c из (28) в (10) получим коэффициент сопротивления движению ленты и груза для четырех роликовой и пятироликовой опоры конвейера обусловленного деформацией груза.

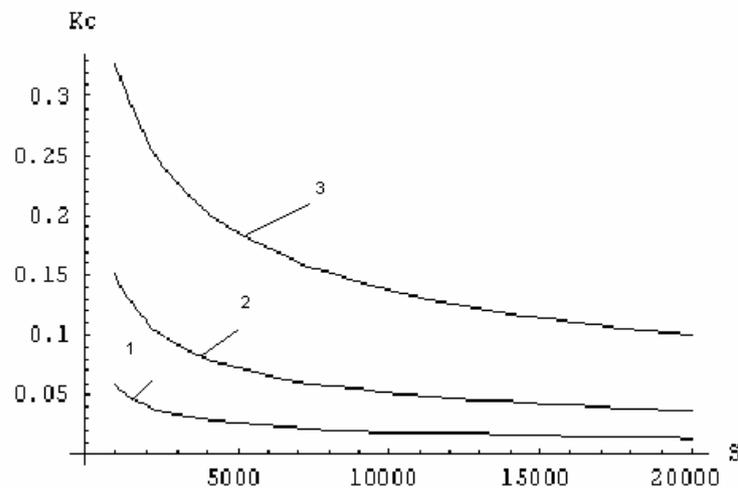


Рис.4 - Зависимость k_c от силы натяжения S при:
1) $D_1 = 0,25 \text{ н/м}^2$ 2) $D_1 = 2 \text{ н/м}^2$ 3) $D_1 = 16 \text{ н/м}^2$

На рис.4 показаны графики зависимости коэффициента сопротивления движению ленты и груза k_c по четырехроликовой опоре обусловленного деформацией груза от натяжения ленты конвейера S для различных значений изгибной

жесткости ленты $D_1 = 16; 2; 0,25 \text{ н/м}^2$. При этом параметры конвейера, ролик-опор и свойства груза принимают значения $q = 109 \text{ кг/м}$, $v = 1 \text{ м/с}$, $l_1 = l_2 = 0,456 \text{ м}$, $\beta_1 = 30^\circ$, $\beta_2 = 60^\circ$, $r = 0,06 \text{ м}$, $f = 0,7$, $l_p = 1 \text{ м}$.

Из графика видно, что с увеличением натяжения ленты коэффициент сопротивления k_c уменьшается, и при уменьшении жесткости ленты так же уменьшается.

На рис. 5 показаны графики зависимости коэффициента k_c сопротивления от угла наклона β_2 при различных погонных нагрузках $q = 100, 200, 300 \text{ кг/м}$. При этом параметры конвейера, ролик-опор и свойства груза принимают значения, $v = 1 \text{ м/с}$, $l_1 = l_2 = 0,456 \text{ м}$, $\beta_1 = 30^\circ$, $r = 0,06 \text{ м}$, $f = 0,7$, $S = 2000 \text{ кг}$, $D_1 = 16 \text{ н/м}^2$, $l_p = 1 \text{ м}$.

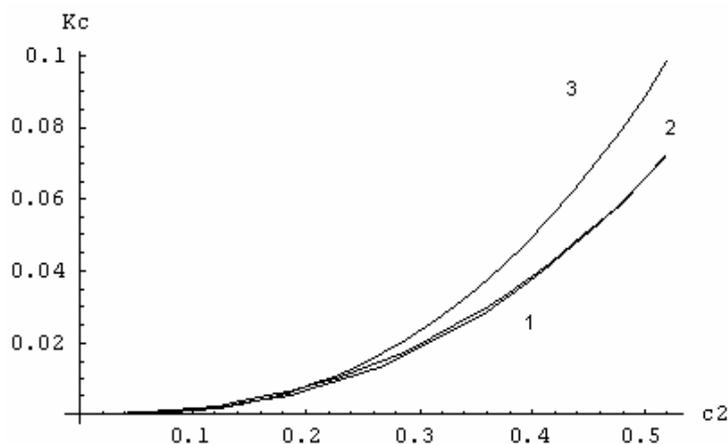


Рис. 5 - Зависимость k_c от β_2 при различных значениях 1) $q = 100 \text{ кг/м}$ 2) $q = 200 \text{ кг/м}$ 3) $q = 300 \text{ кг/м}$

Из графика видно, что с увеличением угла наклона нижнего ролика β_2 коэффициент сопротивления k_c увеличивается. В то же время с увеличением погонной нагрузки с 200 кг до 300 кг k_c увеличивается а при изменении q от 100 кг до 200 кг практически не изменяется.

На рис. 6 показаны графики зависимости коэффициента сопротивления ленты k_c от расстояния между ролик-опорами l_p при различных величинах радиусов роликов $r = 0,03; 0,06; 0,09 \text{ м}$. При этом параметры конвейера, ролик-опор и свойства груза принимают значения $v = 1 \text{ м/с}$, $l_1 = l_2 = 0,456 \text{ м}$, $\beta_1 = 30^\circ$, $\beta_2 = 60^\circ$, $f = 0,7$, $S = 2000 \text{ кг}$, $D_1 = 16 \text{ н/м}^2$.

Из графиков видно, что с увеличением расстояния между ролик-опорами l_p коэффициент сопротивления k_c вначале увеличивается а затем при расстояниях между ролик-опорами больше некоторой величины становится постоянным; коэффициент сопротивления уменьшается, когда радиус ролика увеличивается.

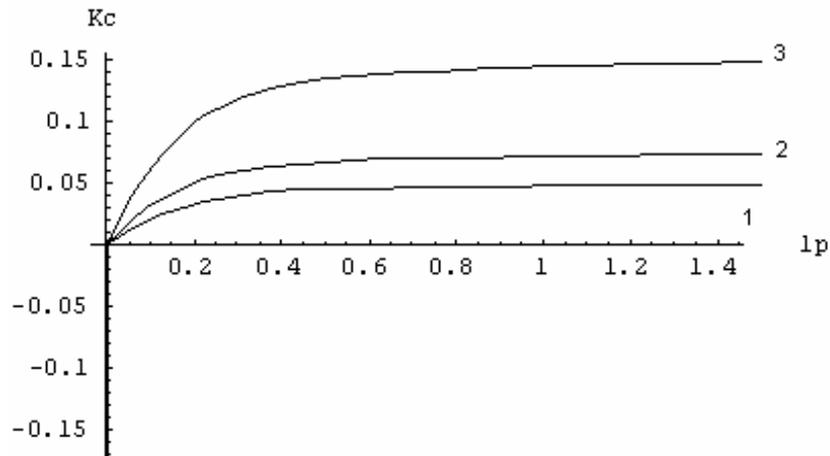


Рис. 6 - Зависимость k_c от l_p при различных 1) $r=0,09 м$, 2) $r=0,06 м$ 3) $r=0,03 м$

Выводы. На основании разработанной математической модели взаимодействия ленты и груза при движении по роликоопорам конвейера с лентой глубокой желобчатости найдены зависимости коэффициента сопротивления обусловленные деформацией груза, параметрами конвейера, роликоопор и свойств груза.

При этом было установлено, что с увеличением погонной нагрузки, изгибной жесткости, угла наклона боковых роликов, различных типов роликоопор, коэффициент сопротивления возрастает, а при увеличении расстояния между роликоопорами коэффициент сопротивления вначале увеличивается а затем с уменьшением расстояние между роликоопорами не изменяется.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кирия Р. В. Математическая модель взаимодействия ленты и груза с роликоопорами конвейера с лентой глубокой желобчатости / Р. В. Кирия, Н. Г. Ларионов // Геотехническая механика: межвед. сб. научн. тр. / ИГТМ НАН Украины. – Днепропетровск, 2012. – Вып. 103. – С. 119–126.
2. Зенков Р. Л. Механика насыпных грузов / Р. Л. Зенков. – М.:Недра,1964. – 214 с.
3. Шахмейстер Л. Г. Теория и расчет ленточных конвейеров / Л. Г. Шахмейстер, В. Г. Дмитриев – М.: Машиностроение, 1987. – 335 с.