

УДК 621.867

**А.П. Егоров**

## **ОЦЕНКА ВЕРТИКАЛЬНЫХ УСКОРЕНИЙ КОНВЕЙЕРНОЙ ЛЕНТЫ ТРУБЧАТОГО КОНВЕЙЕРА НА ПРЯМОЛИНЕЙНЫХ УЧАСТКАХ ТРАССЫ**

*Дается оценка ускорений, возникающих при движении ленты по стволу трубчатого конвейера. При выполнении расчетов учтены модуль упругости ленты и её ширина, условная плотность, скорость движения ленты, натяжение ленты, расстояние между роlikоопорами.*

*Ключевые слова: трубчатый конвейер, конвейерная лента, продольная скорость, динамические нагрузки*

**В** ленточном трубчатом конвейере ширина ленты используется нерационально. Трубчатый конвейер имеет производительность примерно в два раза меньшую, чем ленточный конвейер традиционной конструкции с той же скоростью движения ленты и её шириной. Повысить производительность трубчатого конвейера можно путем увеличения скорости движения ленты также примерно в 2 раза; так, для конвейера с лентой шириной 1400 мм эта скорость должна составить 6÷8 м/с. При такой скорости движения возможно изменение параметров конвейера, в частности, распределенных сил сопротивления движению на грузовой и порожней ветвях, определяющих величину тягового усилия.

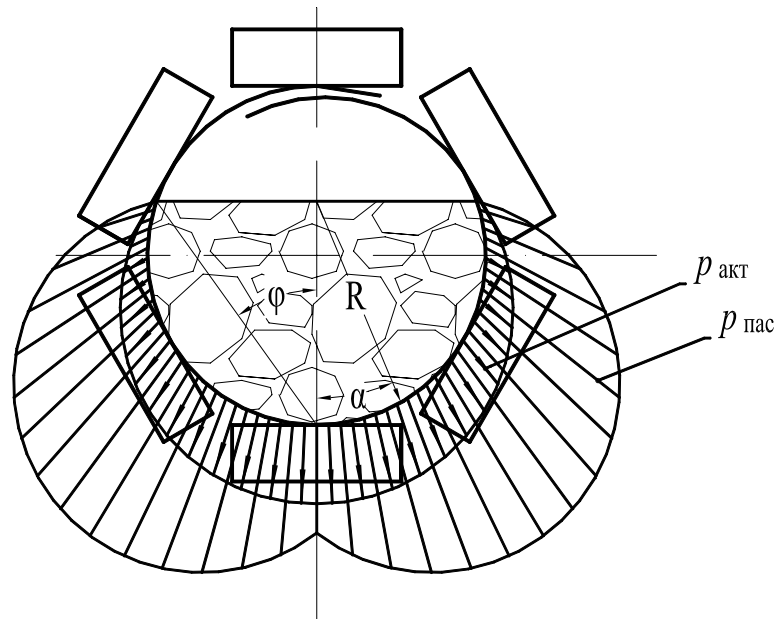
Рассмотрим влияние скорости движения ленты на одну из составляющих распределенной силы сопротивления движению – силу сопротивления от деформирования груза и ленты –  $U_{деф}$ .

Лента с грузом, двигаясь внутри кольцевых роlikоопор, постоянно деформируется. Это приводит к необратимым потерям энергии, эквивалентным некоторой силе сопротивления движению. Деформированное состояние груза при небольших скоростях движения ленты ( $v \leq 3$  м/с) исследовано в работе [1]. Показано, что груз в пролете между роlikоопорами находится последовательно в активной (после прохождения роlikоопоры, примерно до середины пролета) и пассивной (от середины пролета до входа в следующую роlikоопору) фазах и создает по поперечному сечению трубообразной ленты соответствующие статические распределенные нагрузки:

$$p_{пасс} = R \cdot \rho_{г} \cdot g \int (\cos 2\phi + \cos \alpha) \cdot \left( \cos^2 \alpha + \frac{\sin^2 \alpha}{m} \right) d\alpha, \quad (1)$$

$$p_{акт} = R \cdot \rho_{г} \cdot g \int (\cos 2\phi + \cos \alpha) \cdot (\cos^2 \alpha + m \cdot \sin^2 \alpha) d\alpha,$$

где  $\phi$  – угол, характеризующий степень заполнения поперечного сечения ленты (рис. 1);  $\alpha$  – текущий угол наклона рассматриваемой площадки к горизонту;  $m$  – коэффициент подвижности груза,  $\rho_{г}$  – насыпная плотность груза, кг/м<sup>3</sup>,  $R$  – радиус трубообразной ленты, м.



**Рис. 1. Диаграмма распределенных статических нагрузок  $p_{акт}$  и  $p_{пас}$ , действующих на ленту трубчатого конвейера**

Приведенная на рис. 1 диаграмма распределенных статических нагрузок  $p_{акт}$  и  $p_{пас}$  соответствует случаю, когда можно пренебречь вертикальными ускорениями, возникающими из-за прогибов ленты между поддерживающими роlikоопорами. При высоких скоростях движения ленты наличие даже малых прогибов может вызвать значительные вертикальные ускорения груза и изменение как результирующих нагрузок на ленту, так и её деформированного состояния, а следовательно, и силы сопротивления движению.

Рассматривая движущуюся ленту с грузом как упругую балку трубообразного сечения, уравнение её вертикальных прогибов с учетом статической нагрузки запишем в виде [2]:

$$EJ \frac{\partial^4 z}{\partial x^4} - S_0 \frac{\partial^2 z}{\partial x^2} + \rho F_L \frac{d^2 z}{dt^2} = q(t), \quad (2)$$

где  $E$  – поперечный модуль упругости ленты, Па;  $J$  – момент инерции поперечного сечения ленты,  $m^4$ ;  $S_0$  – натяжение ленты, Н;  $z$  – поперечная деформация ленты с грузом как балки, м;  $x$  – координата вдоль ленты, м;  $\rho$  – условная плотность ( $kg/m^3$ ), равная

$$\rho = \frac{\rho_L F_L + \rho_G F_G}{F_L} = \rho_L + \rho_G \frac{F_G}{F_L},$$

где  $F_L$ ,  $F_G$  – площади поперечного сечения ленты и груза,  $m^2$ ;  $q(t)$  – погонная нагрузка на ленту, Н/м. Считаем её постоянной и определяем следующим образом:

$$q(t) = q = q_L + q_G$$

где  $q_L$ ,  $q_G$  – погонные нагрузки от ленты и груза.

Учитывая выражение для полного дифференциала

$$\frac{d^2 z}{dt^2} = \frac{\partial^2 z}{\partial t^2} + 2v \frac{\partial^2 z}{\partial t \partial x} + v^2 \frac{\partial^2 z}{\partial x^2}, \quad (3)$$

уравнение (2) для случая стационарного движения запишем в виде:

$$EJ \frac{\partial^4 z}{\partial x^4} - I \rho' v^2 \frac{\partial^4 z}{\partial x^4} - (S_0 - \rho F v^2) \frac{\partial^2 z}{\partial x^2} = q(x, t), \quad (4)$$

где  $I$  – приведенный момент инерции груза и ленты относительно поперечной линии контакта груза с лентой  $\text{м}^4$ ;  $v$  – скорость движения ленты  $\text{м/с}$ ;  $\rho'$  – погонная масса ленты и груза на ней, отнесенная к сумме поперечных сечений ленты и груза  $\text{кг/м}^3$ ,  $F = F_L$ .

Решение уравнения (4) находим в виде  $z = C \cdot e^{\lambda x}$ , где  $\lambda$  – действительное число. Подставляя решение в уравнение (4), получим следующее характеристическое уравнение:

$$(EJ - I \rho' v^2) \lambda^4 - (S_0 - \rho F v^2) \lambda^2 = 0. \quad (5)$$

Два корня уравнения (5) нулевые  $\lambda_3 = \lambda_5 = 0$ , остальные два корня определяются из уравнения

$$EJ \lambda^2 - (S_0 - \rho F v^2) = 0. \quad (6)$$

Рассмотрим случай действительных корней, т.е. когда  $S_0 \geq \rho F v^2$ . Тогда решение уравнения (3) имеет вид:

$$z = A + Bx + C e^{\lambda_1 x} + D e^{\lambda_2 x} + \frac{q x^2}{2(S_0 - \rho F v^2)}, \quad (7)$$

$$\text{где, } \lambda_1 = \sqrt{\frac{S_0 - \rho F v^2}{EJ}}, \lambda_2 = -\lambda_1.$$

Коэффициенты А, В, С, D определяем из следующих граничных условий:

$$z|_{x=0} = 0; \quad 2. \quad z|_{x=l} = 0; \quad 3. \quad \frac{dz}{dx}|_{x=0} = 0; \quad 4. \quad \frac{dz}{dx}|_{x=l} = 0, \quad (8)$$

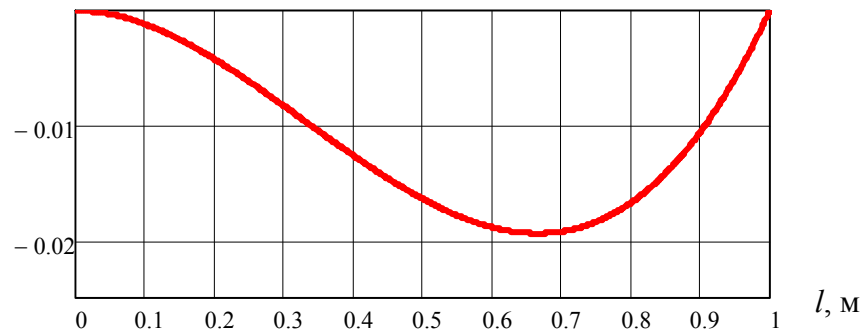
где  $l$  – расстояние между роликкоопорами.

На основании граничных условий (8) получаем из решения (7) следующие соотношения:

$$A + C + D = 0;$$

$$A + Bl + C e^{\lambda_1 l} + D e^{\lambda_2 l} + \frac{q l^2}{2(S_0 - \rho F v^2)} = 0;$$

$$B + C \lambda_1 + D \lambda_2 = 0;$$



**Рис. 2. Характер изменения вертикального прогиба ленты  $z(x)$  трубчатого конвейера**

$$B + Ce^{\lambda_1 l} \lambda_1 + De^{\lambda_2 l} \lambda_2 + \frac{ql^2}{2(S_0 - \rho Fv^2)} = 0.$$

Численное решение данной системы уравнений относительно коэффициентов  $A, B, C, D$  выполнено в программе Mathcad при следующих исходных данных:  $B = 2000$  мм;  $S_0 = 30000$  Н;  $l = 1$  м;  $\eta = 0,2$  м;  $\rho = 3500$  кг/м<sup>3</sup>;  $E = 1 \times 10^8$  Па;  $v = 8$  м/с;  $q = 5000$ , Н/м.

Получены следующие числовые значения коэффициентов  $A = 2,08$ ;  $B = -3,238$ ,  $C = 2,179$ ;  $D = -4,26$ . В соответствии с полученными коэффициентами на рис. 2 показан характер изменения вертикального прогиба ленты  $z(x)$  в пролете между роликкоопорами трубчатого конвейера. Располагая величиной  $z(x)$ ,

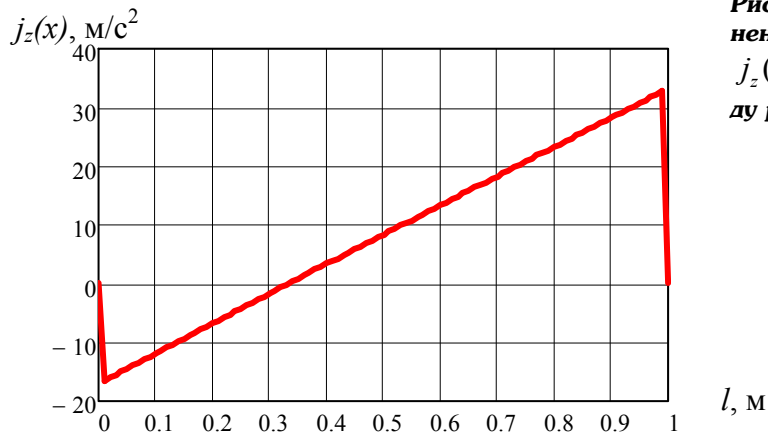
можно определить вторую производную  $\frac{d^2z}{dx^2}$ , а по ней и величину вертикального ускорения  $j_z(x)$ . Используя выражение (3) имеем для случая стационарного

движения ленты –  $j_z(x) = v_l^2 \frac{d^2z}{dx^2}$  (рис. 3).

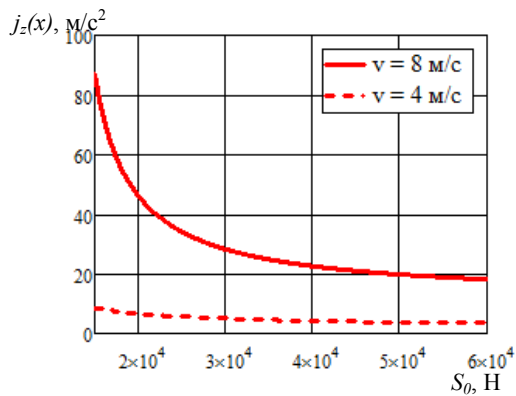
Как видно из приведенного графика, груз, стационарно движущийся в трубообразной ленте, испытывает в пролете между роликкоопорами знакопеременные ускорения, изменяющиеся от  $j_{z\ min}$  до  $j_{z\ max}$  (рис 3). Амплитуда этих ускорений зависит от многих факторов и, в значительной степени, от продольной скорости движения ленты, а также от её натяжения и поперечной жесткости.

На рис. 4 и 5 приведены зависимости максимальных ускорений  $j_z(x)$  от скорости и натяжения ленты трубчатого конвейера при следующих исходных данных:  $B = 2000$  мм;  $l = 1$  м;  $\eta = 0,2$  м;  $\rho = 3500$  кг/м<sup>3</sup>;  $E = 1 \times 10^8$  Па;  $q = 5000$  Н/м.

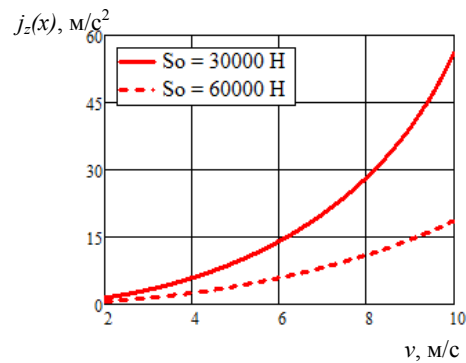
Известно, что при движении с некоторым ускорением  $\ddot{j}_z$  сосуда, содержащего сыпучее тело, возникают силы инерции, которые геометрически суммируются с силами тяжести и переводят сыпучее в новое состояние с удельным весом, определяемым:



**Рис. 3. График изменения ускорения  $j_z(x)$  в пролете между роlikоопорами**



**Рис. 4. График зависимости ускорения  $j_z(x)$  от натяжения ленты  $S_0$ , при  $v = 4$  м/с и  $v = 8$  м/с**



**Рис. 5. График зависимости ускорения  $j_z(x)$  от скорости движения ленты  $v$  при  $S_0 = 30000$  Н и  $S_0 = 60000$  Н**

$$\gamma' = \gamma \frac{g + j_z}{g},$$

где  $g$ - ускорение свободного падения.

Динамические напряжения могут быть рассчитаны по формулам, в которых статический объемный вес заменяется динамическим объемным весом  $\gamma'$  [3].

Если ускорение  $j(t)$  меняется по некоторому закону, то и вертикальное давление на ленту меняется по этому же закону. Таким образом имеем:

$$p_{акт}(t) = p_{акт ст} \frac{g + j(t)}{g} = \left(1 + \frac{j(t)}{g}\right) p_{акт ст},$$

$$p_{nac}(t) = p_{nac\text{ ст}} \frac{g + j(t)}{g} = \left(1 + \frac{j(t)}{g}\right) p_{nac\text{ ст}},$$

где  $p_{акт\ ст}$  и  $p_{nac\ ст}$  – статические активное и пассивное давления груза на ленту, вычисляемые по формуле (1).

В дальнейшем, полученные значения динамических нагрузок  $p_{акт}(t)$  и  $p_{nac}(t)$  необходимо ввести в модель пролета трубчатого конвейера, затем определить деформированное состояние ленты и найти силу сопротивления от деформирования груза трубчатого конвейера.

---

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Сергеева Н.В.* Определение силы сопротивления от деформирования груза на ленте трубчатого конвейера. Горный информационно-аналитический бюллетень – 2008 – №8 – стр 35-38.
2. *Панкратов С.А.* Динамика машин для открытых горных и земляных работ. Изд. «Машиностроение», М., 1969.
3. *Зенков Р.Л.* Механика насыпных грузов. – М: Недра, 1964. – 214 с. **ИЛАС**

---

#### Коротко об авторе

*Егоров А.П.* – аспирант кафедры Горная механика и транспорт,  
Московский государственный горный университет,  
Moscow State Mining University, Russia, ud@msmu.ru




---

#### РУКОПИСИ,

#### ДЕПОНИРОВАННЫЕ В ИЗДАТЕЛЬСТВЕ МОСКОВСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ГОРНОГО УНИВЕРСИТЕТА

**Палеев Д.Ю., Лукашов О.Ю., Костеренко В.Н., Тимченко А.Н.** Моделирование аварийных ситуаций в горных выработках угольных шахт России (734/02-10 от 01.10.09 г.) 6 с.

Впервые предложена новая система обеспечения промышленной безопасности, основанная на фундаментальных исследованиях сложных физических процессов и современных вычислительных технологиях. Внедрение программных комплексов «Вентиляция», «Водоснабжение» и «Ударная волна». Дано обоснование инженерных решений по улучшению технологических показателей работы угольной шахты или предотвращению возможных аварийных ситуаций.

**Paleev D.U., Lukashov O.U., Kosterenko V.N., Timchenko A.N.** MODELLING OF EMERGENCIES IN MINING COURSES OF COAL MINES OF RUSSIA

*For the first time the new system of maintenance of the industrial safety, based on basic researches of difficult physical processes and modern computing technologies is offered. Introduction of program complexes "Ventilation", "Water supply" and "Shock wave". The substantiation of engineering decisions on improvement of technological indicators of work of a coal mine or prevention of possible emergencies is given.*