

3. Крутиков Г.А., Вурье Б.А. Выбор оптимального управления релейным многопозиционным пневмоприводом // Автоматизация и современные технологии. – М.: Машиностроение.- 1995. – №10. – с. 3-6.
4. Крутиков Г.А. Универсальная математическая модель свободнопрограммируемого пневмопривода с дискретным управлением // Вестник Национального технического университета «ХПИ». Сб. научн. трудов. – Темат. вып. «Технологии в машиностроении», Харьков, 2008, вып. 23. с. 98-103.
5. Техническая кибернетика. Теория автоматического регулирования. Книга 3. Под ред. В.В. Солодовникова. – М: Машиностроение, 1969. – 607 с.
6. Черкашенко М.В, Крутиков Г.А. Синтез свободнопрограммируемых пневмоагратов // Інтегровані технології та енергозбереження. – 2009. - №4 – с.100-112.

*У статті дано аналітичне обґрунтування процесів, що відбуваються на наклонному конвеєрі при обриві стрічки наклонного конвеєра. Розглянута взаємодія потоку руди із стрічкою та зміна величини стягуючого зусилля і швидкості стрічки у міру сходу її вниз, а також коливання обірваного кінця стрічки при русі його по роликкоопорам конвеєра*

*В статье дано аналитическое обоснование процессов, происходящих на наклонном конвейере при обрыве ленты наклонного конвейера. Рассмотрено взаимодействие потока руды с лентой и изменение величины стягивающего усилия и скорости ленты по мере схода её вниз, а также колебания обрванного конца ленты при движении его по роликкоопорам конвейера*

*The analytical ground of processes, what be going on on a sloping conveyer at the precipice of ribbon of sloping conveyer is given in the article. Co-operating of stream of ore is considered with a ribbon, and similarly change of size of tightening effort and speed of ribbon as far as the tails of it downward, and similarly vibrations of the ragged end of ribbon at motion of him on rolikkooporam of conveyer*

УДК 622.647.2+622.693

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ, ПРОИСХОДЯЩИХ ПРИ ОБРЫВЕ ЛЕНТЫ НАКЛОННОГО КОНВЕЙЕРА

**Т.В. Александрова**

Аспирант

Кафедра «Горное оборудование»

Криворожский технический университет

Контактный тел.: (0564) 90-18-96, 097-479-32-89

### Проблема и её связь с научными и практическими задачами

В процессе эксплуатации конвейеров иногда происходят непредвиденные сбои в их работе. Так, на наклонных магистральных конвейерах самопроизвольный сход ленты вниз при её поперечном порыве приводит к разрушению значительной части элементов этого конвейера, что приносит предприятию ощутимые экономические потери. Кроме этого, разлетающиеся с конвейера куски руды угрожают жизни обслуживающего персонала.

### Анализ исследований и публикаций

Проведение экспериментальных исследований процессов, происходящих на конвейере после поперечного порыва ленты, в производственных условиях практически проводить невозможно и весьма опасно. Поэтому те немногие исследования, которые были посвящены этой проблеме, проводились на экспериментальных конвейерах или их моделях, или же в информации о них просто констатировались последствия аварий [1,2]. В теоретическом отношении в этих работах рассматриваются лишь первые мгновения поведения ленты после

её обрыва. Для разработки мер по предотвращению таких аварийных ситуаций на наклонных конвейерах необходимо знать весь процесс самопроизвольного движения ленты вниз и на основании этого определить начальную скорость схода ленты вниз, продолжительность времени захвата оборванного конца ленты и параметры улавливающих устройств.

Для исследования процессов, происходящих при обрыве ленты наклонного конвейера, рассмотрим в первом приближении движение ленты с равномерно усредненной нагрузкой ленты без прогибов.

Как и ранее, обозначаем интенсивность продольной нагрузки (вес ленты и руды, приходящийся на один метр длины наклонного конвейера) через  $q_l + q_p$ , и находим общий вес  $Q$  руды и ленты, лежащих после обрыва на ниже расположенных роlikоопорах (рис. 1).

$$Q = \int_0^{L_1} (q_l + q_p) dl = (q_l + q_p) L_1 = (q_l + q_p) nl, \quad (1)$$

где  $n$  - число роlikоопор, на которых лежит оставшаяся нижняя часть ленты;

$l$  - длина ленты между двумя соседними роlikоопорами, м.

Аналогично для части ленты, свисающей с верхнего ролика в месте её обрыва, имеем

$$Q_1 = q_l l_c, \quad (2)$$

где  $l_c$  - длина свисающей части ленты, где  $l_c = 0,5l$ . Очевидно, выполняется неравенство

$$Q \gg Q_1. \quad (3)$$

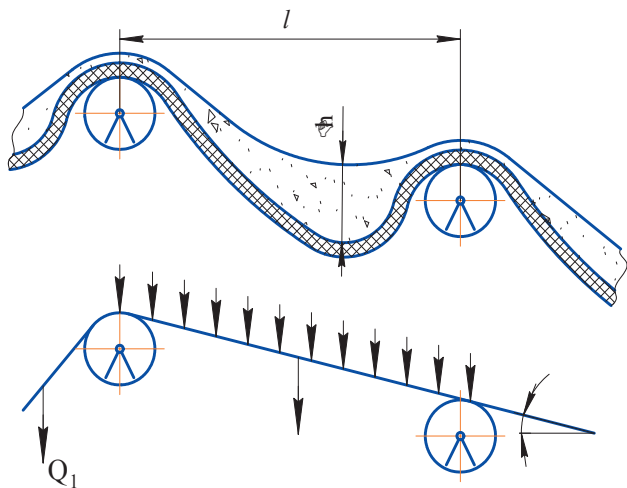


Рис. 1. Схема провисания ленты конвейера между роlikоопорами при её обрыве

После поперечного порыва ленты её верхний конец начинает прогибаться между роlikоопорами под влиянием собственного веса ленты и веса лежащей на ней руды (рис. 2).

Для определения скорости движения запишем основное уравнение динамики

$$m\bar{a} = \bar{F}. \quad (4)$$

где  $m$  - масса системы;  $\bar{a}$  - ускорение движения;  $\bar{F}$  - действующие на систему активные силы.

Умножим левую и правую части равенства (4) на элементарное перемещение  $d\bar{r}$

$$m \frac{d\bar{v}}{dt} d\bar{r} = \bar{F} d\bar{r}. \quad (5)$$

Отсюда

$$m \frac{d\bar{v}}{dt} d\bar{r} = m\bar{v} d\bar{v} = d\left(\frac{1}{2}mv^2\right)$$

$$\bar{F} \cdot d\bar{r} = dA,$$

$$\frac{1}{2}mv^2 = E_k$$

где

$E_k$  - кинетическая энергия всей системы, Дж;

$dA$  -элементарная работа, Дж.

После интегрирования уравнения

$$\int_0^v d\left(\frac{1}{2}mv\right)^2 = \int_0^A dA$$

находим

$$\frac{1}{2}mv^2 = A. \quad (6)$$

Из рис. 1 видно, что

$$A = (Qnl \sin \alpha - Q_1)nl_c; \quad (7)$$

$$m = \frac{Q + Q_1}{g}, \quad (8)$$

поэтому

$$\frac{1}{2} \left( \frac{Q + Q_1}{g} \right) v^2 = (Qnl \sin \alpha - Q_1)nl_c. \quad (9)$$

Максимальная скорость верхнего конца сходящей вниз ленты с учетом сил сопротивления равна

$$v^2 = \frac{2g(Q \sin \alpha - Q_1) \cdot nl}{Q + Q_1} \cdot (1 - k_c) \quad (10)$$

Где  $k_c$  - коэффициент, учитывающий сопротивление вращению роlikов, трение ленты о металлоконструкции конвейера, сопротивление от провисания ленты между роlikоопорами, затраты энергии на сброс руды с ленты и подбрасывание её над роlikоопорами и т.д. [1,2].

Равенство (10) становится очень простым при выполнении неравенства (3)

$$v^2 = 2gnl(1 - k_c) \sin \alpha. \quad (11)$$

Например, при  $\alpha = 17^\circ$ ;  $n = 600$ ;  $l = 1$  м;  $k_c = 0,8$

$$v = 32,6 \text{ м/с}$$

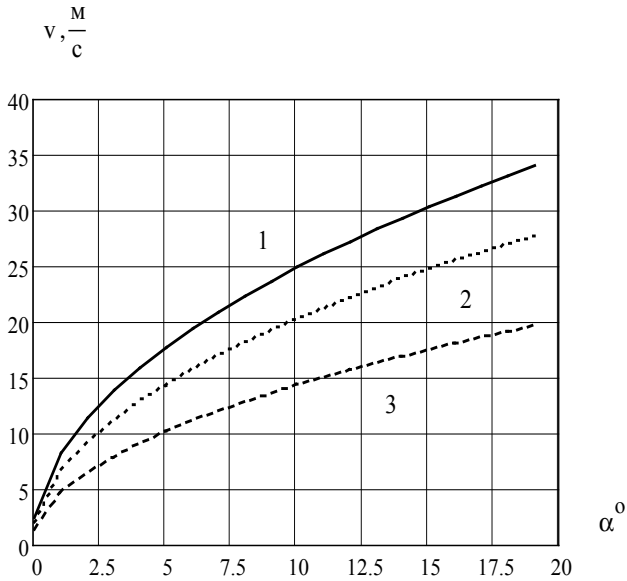


Рис. 2. Графики зависимости максимальной скорости схода вниз верхнего конца конвейерной ленты вниз после её обрыва в зависимости от угла наклона конвейера при его длине: 1). 600 м 2). 400 м 3). 200 м

При анализе этих графиков видно, что скорость самопроизвольного схода лены вниз под влиянием лежащей на ней руды вначале плавно увеличивается под влиянием стягивающего усилия руды и зависит от длины конвейера (рис. 3).

Так например, при  $\alpha = 17^\circ$ ;  $n = 600$ ;  $l = 1$  м и  $f = 0,7$  скорость ленты составляет  $v = 32,6$  м/с., а при длине оборванной ленты 200 м. на аналогичном конвейере она составляет всего 10,7 м/с.

На практике лента набирает максимальную скорость в начале своего движения. Это объясняется большим стягивающим усилием, складывающимся из веса ленты и веса лежащей на ней руды. После обрыва ленты с её верхнего конца уже в первые секунды её движения руда частично сбрасывается с конвейера, а нижняя часть ленты в это время начинает складываться на натяжной станции. Но это вначале незначительно уменьшает стягивающее усилие и лента продолжает свое ускоренное движение вниз.

Обозначим начальную массу руды и ленты в первое мгновение после обрыва ( $t = 0$ ) через  $m_0$ . Предположим, что эта масса со временем уменьшается по линейному закону.

$$m = m_0(1 - kt)$$

Где слагаемое  $m_0kt$  показывает сколько руды сбросилось с конвейера за время  $t$ . Коэффициент «сбрасывания» руды  $k$  имеет размерность  $1/c = c^{-1}$ .

Запишем уравнение движения тела (материальной точки) переменной массы [3,4].

$$\frac{d}{dt}(m\dot{x}) = F, \tag{12}$$

где ось  $x$  совпадает с плоскостью наклона ленты конвейера

$$F = mg \sin(\alpha) \tag{13}$$

Подставим равенство (12) в равенство (13) и произведем дифференцирование

$$\frac{d}{dt}(m\dot{x}) = mg \sin(\alpha);$$

$$m\dot{x} + m\ddot{x} = mg \sin(\alpha);$$

$$-m_0\dot{x} + m_0(1 - kt)\ddot{x} = m_0(1 - kt)g \sin(\alpha) \tag{14}$$

$$\ddot{x} - \frac{1}{1 - kt}\dot{x} = g \sin(\alpha)$$

Для определения скорости движения ленты из уравнения (14) находим

$$v(t) = \frac{c_1}{1 - kt} + \frac{gt \sin(\alpha) - 0,5kt^2 \sin(\alpha)}{1 - kt} \tag{15}$$

При обрыве ленты направление её движения совпадает с направлением стягивающего усилия и руда сразу же вниз сыпается с верхнего конца ленты (принимаем  $k = 0,1$ ). При этом, в момент обрыва лента имеет скорость, равную нулю и поэтому необходимо положить, что постоянная интегрирования  $C_1 = 0$  (рис. 3).

Тогда из (15) находим

$$v(t) = \frac{t - 0,5kt^2}{1 - kt} g \sin(\alpha) \tag{16}$$

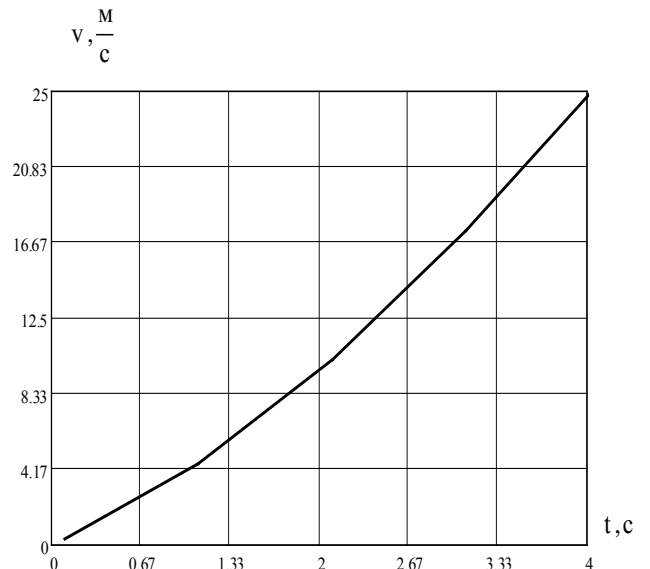


Рис. 3. График зависимости изменения начальной скорости схода верхнего конца конвейерной ленты вниз после её обрыва от времени её схода

Концы ленты отскакивают друг от друга и на мгновение замирают. Затем нижний конец ленты с ускорением начинает скатываться по роликоопорам вниз, совершая вертикальные колебания. (рис. 4).

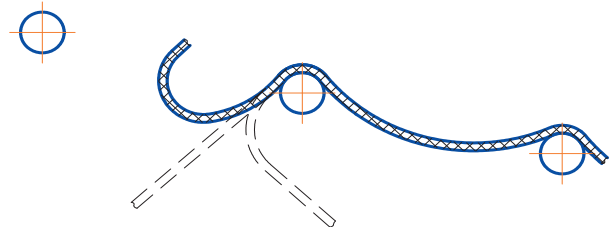


Рис. 4. Схема колебаний конца конвейерной ленты после её обрыва

Для исследования колебаний оборванного конца конвейерной ленты (рис. 5а), вначале в первом приближении пренебрегаем вертикальными перемещениями ленты между роlikоопорами после оборванного конца. Тогда такой оборванный конец ленты можно схематически представить балкой с зажатым одним концом (рис. 5б).

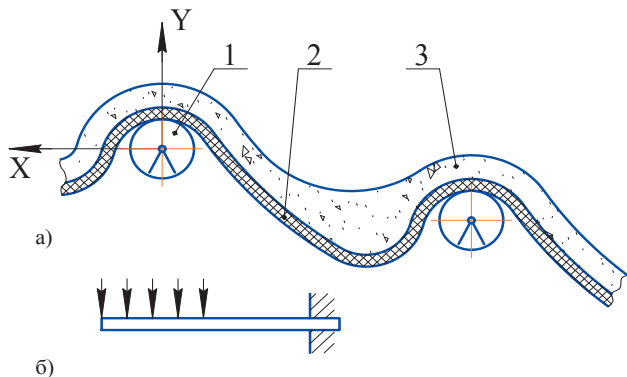


Рис. 5. Схема к расчету колебаний оборванного конца конвейерной ленты: 1 - роlikоопора; 2 - лента; 3 - руда

При колебаниях ленты на неё действуют распределенные силы инерции  $q$ . Как известно [5] уровни прогибов балки можно представить в следующем виде

$$EI \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} = q, \tag{17}$$

где  $EI$  - жесткость при изгибе ленты в плоскости колебаний,  $H \cdot m^2$ ;

$E$  - модуль упругости ленты, модуль Юнга,  $H/m^2$ ;

$I$  - момент инерционного сечения ленты,  $m^4$ ;

$y(x,t)$  - поперечное сечение ленты,  $m^2$ .

Интенсивность сил инерции равна

$$q = m \frac{\partial^2 y}{\partial t^2}, \tag{18}$$

где  $m_l$  - масса единицы длины ленты,  $кг/м$ .

Следовательно, дифференциальное уравнение изгибных поперечных колебаний ленты принимает вид (рис. 6).

$$E \cdot I \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} + m_l \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = 0. \tag{19}$$

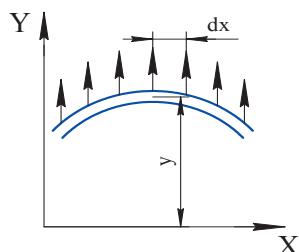


Рис. 6. Схема к выводу дифференциального уравнения движения оборванного конца ленты конвейера

Соответствующее собственным колебаниям решение уравнения (19) представляем в следующем виде

$$y(x,t) = u(x) \cdot \cos(\omega t + \varphi), \tag{20}$$

где:

$y(x,t) = y$  - перемещение оборванного конца ленты в процессе движения ленты вниз. Оно зависит от местоположения точки на этом конце ленты во времени,

$u(x)$  - амплитудная функция, она зависит от местоположения точки на этом конце ленты,

$\omega$  - циклическая частота колебаний ленты;

$\varphi$  - начальная фаза поперечных колебаний ленты.

Из уравнения (20) находим

$$\left. \begin{aligned} y^4(x,t) &= u^4(x) \cdot \cos(\omega t + \varphi) \\ \ddot{y}(x,t) &= \omega^2 u(x) \cdot \cos(\omega t + \varphi) \end{aligned} \right\} \tag{21}$$

Где

$$\ddot{y}(x,t) = \frac{\partial^2 y}{\partial t^2}$$

Подставим соотношения (21) в равенство (14) и получим

$$\frac{d^4 u(x)}{dz^4} - \theta^4 u = 0, \tag{22}$$

где

$$\theta^4 = \frac{\omega^2 m_l}{EI}, \tag{23}$$

Параметр  $\theta$  учитывает связь циклической частоты собственных колебаний ленты с массой единицы длины и её физикомеханическими свойствами.

Записываем характеристическое уравнение

$$z^4 = \theta^4. \tag{24}$$

Корни характеристического уравнения равны

$$z_1 = \theta; z_2 = -\theta; z_3 = \theta \cdot i; z_4 = -\theta \cdot i. \tag{25}$$

В соответствии с этим решение однородного дифференциального уравнения (22) выразим через тригонометрические и показательные функции, аргумент которых равен  $\theta \cdot x$ .

Значительное удобство представляет использование специальных функций, которые были введены А.Н. Крыловым [4]. Обозначим эти функции Крылова символами  $K_1, K_2, K_3, K_4$  и решение уравнения (22) запишем в следующей форме

$$u = C_1 K_1(\theta x) + C_2 K_2(\theta x) + C_3 K_3(\theta x) + C_4 K_4(\theta x), \tag{26}$$

Где

$C_1, C_2, C_3, C_4$  - постоянные интегрирования.

$$K_1(\theta \cdot x) = \frac{1}{2}(\text{ch}(\theta x) + \cos(\theta x)); K_2(\theta \cdot x) = \frac{1}{2}(\text{sh}(\theta x) + \sin(\theta x));$$

$$K_3(\theta \cdot x) = \frac{1}{2}(\text{ch}(\theta x) - \cos(\theta x)); K_4(\theta \cdot x) = \frac{1}{2}(\text{sh}(\theta x) - \sin(\theta x)); \tag{27}$$

$$\text{sh}(\theta x) = \frac{1}{2}(e^{\theta x} - e^{-\theta x}); \text{ch}(\theta x) = \frac{1}{2}(e^{\theta x} + e^{-\theta x}).$$

Последовательные производные функций Крылова связаны зависимостями

$$\begin{aligned} \frac{d}{dx} K_1(\theta x) &= \theta K_4(\theta x); \\ \frac{d}{dx} K_2(\theta x) &= \theta K_1(\theta x); \\ \frac{d}{dx} K_3(\theta x) &= \theta K_2(\theta x); \\ \frac{d}{dx} K_4(\theta x) &= \theta K_3(\theta x); \end{aligned} \quad (28)$$

Следовательно, при каждом дифференцировании номер функции Крылова понижается на единицу.

Соотношения (27) показывают, что при аргументе, равном нулю ( $\theta x=0$ )

$$K_1 = 1; K_2(0) = K_3(0) = K_4(0) = 0. \quad (29)$$

Отсюда следует, что постоянные величины в формуле (26) связаны с амплитудными значениями перемещений прогибов  $u(x)$  ленты, угла поворота  $\frac{du}{dx}$  изгибающего момента

$$M = EI \frac{d^2 u}{dx^2}$$

и поперечной силы

$$Q = EI \frac{d^3 u}{dx^3}$$

в начальном сечении  $x=0$  такими равенствами

$$\begin{aligned} C_1 = u_x = 0; \quad C_2 = \frac{1}{2} \left( \frac{du}{dx} \right)_{x=0}; \\ C_3 = \frac{1}{EI\theta^2}; \quad M_x = 0; \quad C_4 = \frac{1}{EI\theta^3} Q_{x=0}. \end{aligned} \quad (30)$$

В нашем случае граничные условия составляют

$$u_{x=0} = 0; \left( \frac{du}{dx} \right)_{x=0} = 0; \left( \frac{d^2 u}{dx^2} \right)_{x=1} = 0; \left( \frac{d^3 u}{dx^3} \right)_{x=1} = 0. \quad (31)$$

Из этих условий при  $x=0$  находим, что

$$C_1 = 0; C_2 = 0.$$

Из условий при  $x=l_c$  находим, что

$$C_3 K_1(\lambda) + C_4 K_3(\lambda) = 0; \quad (32)$$

$$C_3 K_4(\lambda) + C_4 K_1(\lambda) = 0,$$

где  $\lambda = \theta \cdot l_c$ ,

$l_c$  - длина участка свисающей части оборванной ленты.

$\lambda$  - параметр, учитывающий физические свойства ленты.

Коэффициенты  $C_3$  и  $C_4$  одновременно не равны нулю. Но определитель, составленный из коэффициентов  $K_1(\lambda)$ ,  $K_3(\lambda)$ ,  $K_4(\lambda)$ , равен нулю поэтому

$$\begin{vmatrix} K_1(\lambda) & K_3(\lambda) \\ K_4(\lambda) & K_1(\lambda) \end{vmatrix} = 0. \quad (33)$$

Отсюда получаем частное уравнение

$$K_1^2(\lambda) = K_4(\lambda) \cdot K_3(\lambda). \quad (34)$$

Подставив в уравнение (34) значения соответствующих функций Крылова из формул (27), найдем

$$\cos(\lambda) \cdot \operatorname{ch}(\lambda) = -1 \quad (35)$$

или

$$2 + \cos(\lambda) (e^\lambda + e^{-\lambda}) = 0. \quad (36)$$

Из графика (рис. 7) мы находим значения параметра  $\lambda$ , при котором функция  $f(\lambda) = 0$

$$\lambda_1 = 1,875; \quad \lambda_2 = 4,695$$

X, м

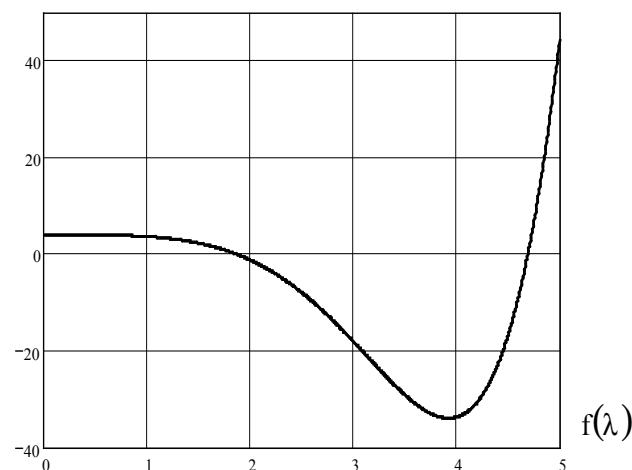


Рис. 7. График зависимости функции  $f(\lambda)$  от скорости движения ленты

Собственные частоты колебаний оборванного конца конвейерной ленты равны

$$\omega_1 = \lambda_1^2 \sqrt{\frac{EI}{m \cdot l_A^2}}; \quad \omega_2 = \lambda_2^2 \sqrt{\frac{EI}{m \cdot l_A^2}}. \quad (37)$$

При  $EI=50 \text{ Н}\cdot\text{м}^2$ , массе одного погонного метра ленты. ( для резиноканевой конвейерной лены шириной 2000 мм )  $32,7 \text{ кг}$  и  $x=0,5l_c = 0,5\text{м}$  (считаем, что лента оборвалась по середине пролета между роликоопорами)

$$\omega_1 = 24,6; \quad \omega_2 = 17,23 \text{ с}^{-1}$$

Из приведенных графиков (рис. 8) видно, что при увеличении жесткости конвейерной ленты и параметра  $\lambda$  происходит значительное увеличение её собственных колебаний.

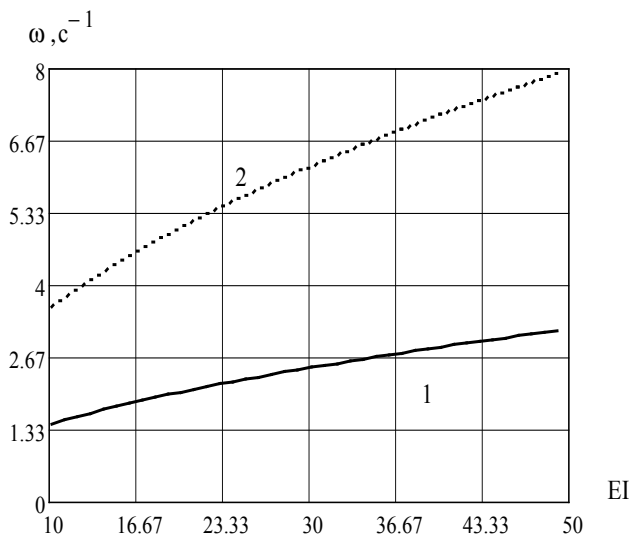


Рис. 8. График собственной частоты ω колебаний оборванного конца ленты в зависимости от её жесткости. (1.-Основные колебания оборванного конца ленты. 2.-Колебания оборванного конца ленты, наложенные на основные её колебания)

При известных значениях параметра λ определяем амплитудную функцию колебаний оборванного конца ленты из уравнений (35, 36)

$$u_1 = K_2(\lambda_1) \cdot K_3\left(\lambda_1 \cdot \frac{x}{l_c}\right) - K_1(\lambda_1) \cdot K_4\left(\lambda_1 \cdot \frac{x}{l_c}\right), \quad (38)$$

$$u_2 = K_2(\lambda_2) \cdot K_3\left(\lambda_2 \cdot \frac{x}{l_c}\right) - K_1(\lambda_2) \cdot K_4\left(\lambda_2 \cdot \frac{x}{l_c}\right). \quad (39)$$

Для практических задач достаточно исследовать колебания центра масс оборванного конца ленты, т.е. во всех формулах положить x = 0,5l.

При этом из формул (27), задавшись значениями параметров,

- параметр λ<sub>1</sub> = 1,875
- жесткость конвейерной ленты EI = 120 Н/м
- вес конвейерной ленты = 35 кг/м
- расстояние между роликоопорами = 1 м

$$\lambda_1 = \frac{x}{l} = 1,875 \cdot \frac{0,5l}{l} = 1,875 \cdot 0,5 = 0,9375$$

$$\lambda_2 = \frac{x}{l} = 4,695 \cdot \frac{0,5l}{l} = 4,695 \cdot 0,5 = 2,4375$$

В этом случае коэффициенты К при x=0,5 м будут составлять

$$K_2(\lambda_1) = \frac{1}{2} \cdot \{sh(\lambda_1) + sin(\lambda_1)\} =$$

$$= \frac{1}{2} \cdot \{sh(1,875) + sin(1,875)\} =$$

$$= 0,5 \cdot (3,1837 + 0,9541) = 2,0689$$

$$K_3(\lambda_1 \cdot \frac{x}{l}) = \frac{1}{2} \cdot \{ch(0,9375) - cos(0,9375)\} = 0,4404$$

$$K_1(\lambda_1) = \frac{1}{2} \cdot \{ch(1,875) + cos(1,875)\} = 1,5187$$

$$K_4(\lambda_1 \cdot \frac{x}{l}) = \frac{1}{2} \cdot \{sh(0,9375) - sin(0,9375)\} = 0,1374$$

а амплитудная функция U<sub>1</sub> колебаний оборванного конца ленты составит

$$U_1 = K_2(\lambda_1) \cdot K_3(\lambda_1 \cdot \frac{x}{l}) - K_1(\lambda_1) \cdot K_4(\lambda_1 \cdot \frac{x}{l}) =$$

$$= 2,0689 \cdot 0,4404 - 1,5187 \cdot 0,1374 = 0,7024$$

при параметре λ<sub>2</sub> = 4,695 и x=0,5 м коэффициенты К будут составлять

$$K_2(\lambda_2) = \frac{1}{2} \cdot \{sh(4,695) + sin(4,695)\} = 26,8475$$

$$K_3(\lambda_2 \cdot \frac{x}{l}) = \frac{1}{2} \cdot \{ch(2,4375) - cos(2,4375)\} = 3,2640$$

$$K_4(\lambda_1 \cdot \frac{x}{l}) = \frac{1}{2} \cdot \{sh(2,4375) - sin(2,4375)\} = 2,5156$$

$$K_1(\lambda_2) = \frac{1}{2} \cdot \{ch(4,695) + cos(4,695)\} = 27,3433$$

а амплитудная функция U<sub>2</sub> колебаний оборванного конца ленты составит

$$U_2 = K_2(\lambda_2) \cdot K_3(\lambda_2 \cdot \frac{x}{l}) - K_1(\lambda_2) \cdot K_4(\lambda_2 \cdot \frac{x}{l}) =$$

$$= 26,8475 \cdot 3,2640 - 27,3433 \cdot 2,5156 = 18,8454$$

Тогда из уравнения (21) при θ = 0 находим

$$y_1(x=0,5l; t) = u_1 \cos(\omega_1 \cdot t), \quad (40)$$

$$y_2(x=0,5l; t) = u_2 \cos(\omega_1 \cdot t). \quad (41)$$

Уравнение (40) описывает основное колебание центра масс оборванного конца ленты.

Этими величинами колебаний конца ленты можно ограничиться при инженерных расчетах. Уравнение (41) описывает колебания ленты, наложенные на её основные колебания.

При сходе ленты вниз роль натяжного усилия начинают выполнять собственный вес ленты и вес лежащей на ней руды. Величина этого стягивающего усилия значительно больше величины рабочего натяжного усилия и лента с большой скоростью скатывается вниз (рис. 9).

В случае, когда оборванная лента с рудой движется по роликам вниз и этих роликов достаточно много, необходимо учитывать работу, которая расходуется на их вращение [6,7].

Составим уравнение движения системы, пользуясь уравнением Лагранжа второго рода.

Кинетическая энергия системы, которая движется со скоростью, равна

$$E_k = \frac{1}{2} (M_p + M_n) v^2 + n \frac{1}{2} I_{пол} \omega^2 =$$

$$= \frac{1}{2} (M_p + M_n) v^2 + \frac{1}{4} n m_{пол} v^2, \quad (42)$$

где M<sub>p</sub> - масса руды, лежащая на нижнем участке ленты, кг

M<sub>n</sub> - общая масса нижнего участка ленты, кг;



$m_{рол}$  - масса одной роликоопоры, на которых лежит оставшаяся часть ленты.

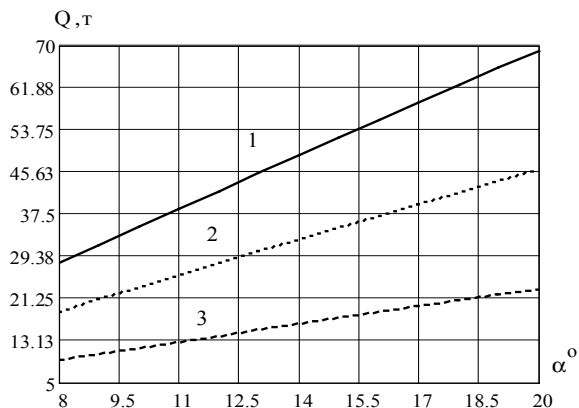


Рис. 9. Схема для определения стягивающего усилия

Берем в равенстве (42) соответствующие частотные и производные

$$\frac{\partial E_k}{\partial x} = \left( m_{ло} + M_{л} + M_p + \frac{1}{2} n \cdot m_{рол} \right) x ; \quad (43)$$

$$\frac{\partial E_k}{\partial E} = 0 ; \quad (44)$$

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial E_r}{\partial \dot{x}} \right) = \left( m_{ло} + M_{л} + M_p + \frac{1}{2} n m_{рол} \right) \ddot{x} ; \quad (45)$$

Сообщаем системе возможное перемещение  $\delta x$  и найдем элементарную работу активных сил, действующих на ленту

$$\delta A = \left[ (M_{л} + M_p) g \sin \alpha - m_{ло} g \right] \delta x . \quad (46)$$

Из равенства (46) находим обобщенную стягивающую силу  $P_c$

$$P_c = (q_{л} + q_p) n l \sin \alpha - q_{л} l_c . \quad (47)$$

Из графиков (рис. 10) следует, что величина стягивающего усилия в значительной мере зависит как от нагрузки на ленту так и от угла наклона конвейера и изменяется по линейному закону.

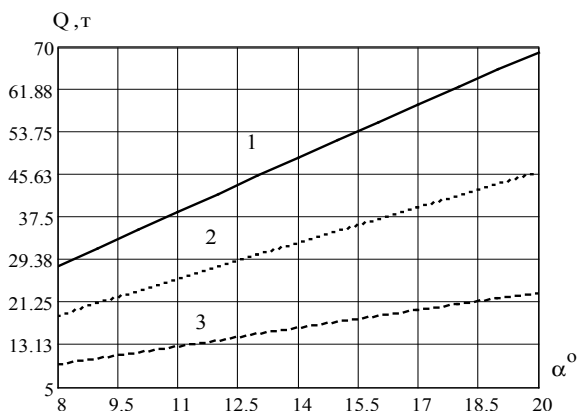


Рис. 10. График зависимости стягивающего усилия  $Q$   $P_c$  от угла наклона конвейера

где  $P_{ст}$  - величина стягивающего усилия при длине конвейера:

1)-600 м; 2)-400 м; 3)-200 м.

На практике лента при сходе вниз складывается в нижней части конвейера «гармошкой»

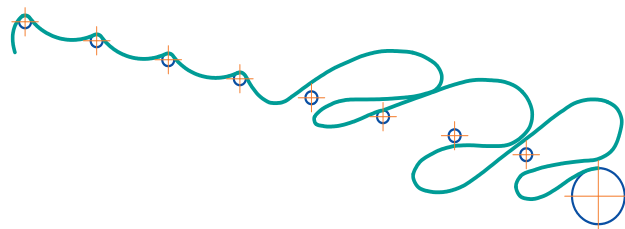


Рис. 11. Форма расположения ленты на нижнем конце конвейера после схода её вниз

Но хотя длина ленты и уменьшается, но некоторое верхний время конец ленты еще продолжает двигаться с набранной скоростью. Эта закономерность выражена следующей зависимостью и отображена на графике (рис. 12).

$$v^2 = \frac{2g(Qn_1 l \sin \alpha - Q_1 l_c)}{Q + Q_1} (1 - k_c) - \frac{2g(Qn_1 l \sin \alpha - Q_1 l_c)}{Q + Q_1} \quad (48)$$

где  $n_1$  - количество роликоопор, на которых продолжает лежать лента по мере её схода вниз. Оно изменяется от максимума до минимума,

$Q$  - вес одного метра ленты с лежащей на ней рудой,

$Q_1$  - вес одного метра оборванного конца ленты

$k_c$  - коэффициент сопротивления движению ленты

Изменение скорости ленты длиной 400 м в конце её схождения вниз представлена на нижеприведенном графике (рис. 12). При этом предполагается, что порыв ленты произошел на 50-ой роликоопоре от разгрузочного барабана.

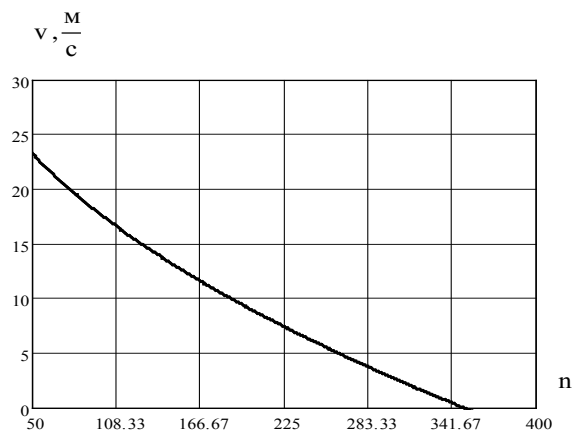


Рис. 12. График зависимости скорости движения ленты в конце её схода вниз от длины конвейера

Как уже отмечалось выше, после обрыва ленты в течении нескольких секунд с её верхнего конца сбрасывается часть руды, а нижний конец ленты начинает складываться на натяжной станции. Но в начале это мало сказывается на уменьшении стягивающего усилия, и лента движется вниз с ускорением. После достижения максимальной скорости лента продолжает

по инерции двигаться с набранной скоростью практически по линейному закону. Но дальнейшее снижение стягивающего усилия приводит к замедлению её движения, а затем и к её остановке.

Для определения времени схода ленты вниз составим уравнение Лагранжа второго рода

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial E_k}{\partial \dot{E}} \right) - \frac{\partial E_k}{\partial E} = P_c ;$$

$$\left( m_{ло} + M_l + M_p + \frac{1}{2} n m_{рол} \right) \ddot{x} = (M_l + M_p) g \sin \alpha - m_{ло} g . (49)$$

Равенство (49) позволяет найти ускорение движения системы  $\ddot{x} = a$  и скорость движения  $v_l$  ленты вниз после её обрыва

$$\ddot{x} = a = \frac{(M_l + M_p) g \sin \alpha - m_{ло} g}{\left( m_{ло} + M_l + M_p + \frac{1}{2} n m_{рол} \right)} (50)$$

$$\dot{x} = v_l = \frac{(M_l + M_p) g \sin \alpha - m_{ло} g}{\left( m_{ло} + M_l + M_p + \frac{1}{2} n m_{рол} \right)} \cdot t , (51)$$

Откуда

$$t = \frac{v_l \left( m_{ло} + M_l + M_p + \frac{1}{2} n m_{рол} \right)}{(M_l + M_p) g \sin \alpha - m_{ло} g} (52)$$

где  $t$  - время движения оборванной ленты вниз.

Иногда удобнее среднюю скорость оборванной ленты находить как функцию  $S$  пройденного пути, которая выражает закон сохранения энергии [8].

Для этого необходимо воспользоваться равенством (6)

$$\frac{1}{2} \left( m_{ло} + M_p + \frac{1}{2} n m_{рол} \right) v_l^2 = \left( (m_{ло} + M_l) g \sin \alpha - m_{ло} g \right) \cdot S . (53)$$

Отсюда находим зависимость скорости движения оборванного конца ленты наклонного конвейера в зависимости от пройденного пути.

$$v_l^2 = \frac{(M_l + M_p) g \sin \alpha - m_{ло} g}{\frac{1}{2} \left( m_{ло} + M_p + \frac{1}{2} n m_{рол} \right)} \cdot S . (54)$$

При большой протяженности конвейера и быстротечности процессов для определения их максимальных значений с достаточной точностью можно пользоваться вышеприведенными формулами, учитывая сопротивления движению ленты по роликоопорам конвейера.

## Выводы

1. Скорость полета кусков руды после поперечного порыва ленты наклонного конвейера и при переходе их через роликоопоры в основном зависит от суммарного веса ленты и лежащей на ней руды, угла наклона конвейера, расстояния между роликоопорами и их количества от нижнего конца конвейера до места нахождения куска руды.

2. После обрыва ленты её верхний конец движется с ускорением вниз. С уменьшением стягивающего усилия скорость верхнего конца ленты временно стабилизируется, а затем начинает резко падать до полной остановки ленты.

3. Величина стягивающего усилия зависит от массы ленты, массы руды, угла наклона конвейера и массы верхнего «хвоста» ленты, на котором уже нет руды. Оно изменяется во времени практически по линейному закону.

4. Частота собственных колебаний «хвоста» ленты после её обрыва зависит от жесткости ленты, массы этого «хвоста» и его длины.

## Литература

1. Курников Ю.А., Новиков В.И., Кузовкин В.А. Аналитическое исследование поведения ленты уклонного конвейера после её обрыва. Механизация горных работ. Сб. 75. 1975 г. Стр.283.
2. Проскурин В.И. К теоретическому анализу процесса обрыва ленты конвейера. Разработка месторождений полезных ископаемых. Вып. 20. 1970 г. Стр.53.
3. Мещерский И.В. Работы по механике тел переменной массы. 2 изд. М. «Наука». 1947 г. Стр. 182.
4. Космодемьянский А.А. Курс теоретической механики. 3 изд. Часть 2, М. «Просвещение», 1966, Стр.92.
5. Болотин В.В. Динамическая устойчивость упругих систем. - М., 1956 г Стр.76-80, 458-463.
6. Галкин В.И., Дмитриев В.Г., Дьяченко В.П., Зацепин И.В., Шешко Е.Е. Современная теория ленточных конвейеров горных предприятий. М. МГГУ. 2005 г. Стр. 50.
7. Иванченко Ф.К. Конструкция и расчет подъемно-транспортных машин. К. 1983 г. Стр. 263.
8. Лойцянский Л.Г., Лурье А.И. Курс теоретической механики. Том 2. Динамика. 1980 г. Стр.232.