

УДК 622.867.2

**В.Ф. Монастырский, С.В. Монастырский, Р.В. Кирия**  
**ОПТИМИЗАЦИЯ ЭНЕРГОЕМКОСТИ**  
**ТРАНСПОРТИРОВАНИЯ НАСЫПНЫХ ГРУЗОВ**  
**ЛЕНТОЧНЫМИ КОНВЕЙЕРАМИ**

*Решена задача оптимизации энергоемкости транспортирования и, как следствие, повышения эффективности работы ленточных конвейеров и обоснования экономической целесообразности их применения.*

Семинар № 21

**Л**енточные конвейеры общего назначения получили широкое распространение на шахтах и карьерах, так как они являются связующим звеном между оборудованием карьеров, рудников (шахт) и обогатительных фабрик, а также неотъемлемой частью всех передовых технологий (циклично-поточной и поточной; любого комбинированного способа доставки горной массы большой производительности).

Опыт эксплуатации ленточных конвейеров в промышленных условиях показал, что на их эффективность работы оказывают существенное влияние горно-технические факторы, условия эксплуатации и параметры ленточных конвейеров. В этом случае наблюдаются как внезапные отказы (выход из строя роликкоопор, ленты, загрузочных устройств, элементов привода и др.), так и постепенные (износные, усталостные, повышение сопротивления вращению роликов и энергозатрат на транспортирование груза).

Однако до сих пор остаются нерешенными вопросы влияния многообразия условий эксплуатации, вибрации, структуры насыпных грузов, параметров конвейеров и загрузочных устройств, энергопотребления на показатели надежности и работоспособности ленточ-

ных конвейеров. В то же время энергозатраты на транспортирование насыпных грузов ленточными конвейерами являются основными эксплуатационными затратами. Поэтому для повышения эффективности работы ленточных конвейеров и обоснования экономической целесообразности их применения в данном разделе поставлена и решена задача оптимизации энергоемкости транспортирования насыпных грузов ленточными конвейерами.

**Постановка задачи оптимизации энергоемкости транспортирования насыпных грузов**

Согласно [1] энергоемкость транспортирования насыпных грузов в общем виде определяется:

$$\mathcal{E}_k = (S_{\max} - S_{\text{сц}}) V_{\text{л}} / 1000,$$

где  $S_{\max}$ ,  $S_{\text{сц}}$  - соответственно натяжение ленты при набегании на приводной барабан и необходимое для их сцепления.

Максимальное натяжение ленты при набегании на приводной барабан определяется [1]:

$$S_{\max} = S_{\text{сц}} + (q_p + q_{\text{л}} + q_{\text{гр}})L \sin\beta + W_{\text{pi}}(t), \quad (1)$$

где  $q_p$ ,  $q_{\text{л}}$ ,  $q_{\text{гр}}$  - соответственно погонные массы вращающихся частей, ленты, насыпного груза;  $L$  - длина конвейеров;  $\beta$  - угол наклона конвейера;  $W_{\text{pi}}(t)$  - сопро-

тивление движению ленты по роликоопорам ленточного конвейера.

При оптимизации энергоемкости транспортирования рассматривалась следующая расчетная схема: ленточный конвейер имеет  $N_p$  роликоопор, расстояние между которыми  $\ell_p$ ; длина ролика  $\omega_p$ ; угол наклона бокового ролика  $\beta_p$ ; коэффициент сопротивления вращению роликов  $\omega_p$ ; натяжение ленты  $S$  и ее скорость  $V_{л}$ ; на ленте транспортируется мелкокусковый груз (угол естественного откоса  $\rho$ ) с крупными кусками, размещенными в общем объеме по случайному закону. Под действием силы привода преодолевается сопротивление движению ленты, на каждой роликоопоре происходит процесс деформации ленты с грузом  $[q_{л} + q_{гр}(t)]$  и изменение формы поперечного сечения груза, сопровождающееся его подъемом в пределах площади  $\Delta F_i$ . Главными параметрами этого процесса являются переменный угол  $\alpha$  – угол набегания ленты на роликоопору и усилие протягивания – сила тяги привода.

Для конвейеров  $\beta = 0$ ,  $S_{max}$  зависит от  $W_{pi}(t)$ , значение которого определяется из выражения [2]:

$$W_{pi}(t) = \sigma_{сж} \Delta F_i (1 + \omega_p \text{ctg} \alpha) + [(q_{л} + q_{гр}) \ell_p + F_{pi}(t_i) + 4S \sin \alpha + \frac{2}{3} P_a] \omega_p, \quad (2)$$

где  $\sigma_{сж}$  – напряжение сжатия ленты с грузом роликами при ее протягивании;  $F_{pi}(t)$  – сила взаимодействия груза с роликоопорами;  $P_a$  – усилие на боковой ролик от изгиба ленты и бокового распора груза.

Уравнение цели для оптимизации энергоемкости транспортирования принималось в виде:

$$W_{pi} \rightarrow \min; \quad (3)$$

Ограничения к уравнению цели (3) являются:

$$5 \text{ кН} < S < 500 \text{ кН};$$

$$0,005F_{max} < \Delta F_i < 0,015F_{max}; \quad (4)$$

$$5^\circ < \alpha < 50^\circ,$$

где  $F_{max}$  – допустимая площадь поперечного сечения груза на ленте.

#### Решение задач оптимизации. Анализ и обобщение полученных результатов

В качестве метода оптимизации поставленной задачи был выбран однокритериальный метод нелинейного программирования [3], обладающий хорошей наглядностью и информативностью для проектировщика и позволяющий учесть специфику данной задачи:

$$\frac{dW_{pi}(\alpha)}{d\alpha} = -B / \sin^2 \alpha + 4S \cos \alpha = 0, \quad (5)$$

где  $B = \sigma_{сж} \Delta F_i \omega_p$ ;  $\sigma_{сж}$  – напряжение сжатия насыпного груза при протягивании ленты через сечение роликоопоры;  $\Delta F_i$  – площадь поперечного сечения груза, сопровождавшееся его подъемом при протягивании ленты с грузом через роликоопору. Преобразование выражения (1) для определения минимального угла  $\alpha$  примет вид:

$$\cos^3 \alpha_{min} - \cos \alpha_{min} + B / 4S = 0 \quad (6)$$

На рис. 1. представлено графическое решение уравнения (6) для значения  $B / 4S = 0,1$ .

В пределах ограничений для  $\alpha$ ,  $S$ ,  $\Delta F_i$  и принятого  $B / 4S = 0,1$  получены корни уравнения (6)  $\alpha_1 = -18,5^\circ$ ;  $\alpha_2 = 84,5^\circ$  (лишены физического смысла в рамках решаемой задачи) и  $\alpha_3 = 19,0^\circ$ , при котором вторая производная по  $\alpha$  больше нуля, что говорит о достижении минимального значения исследуемой функцией в точке  $\alpha_3$ .

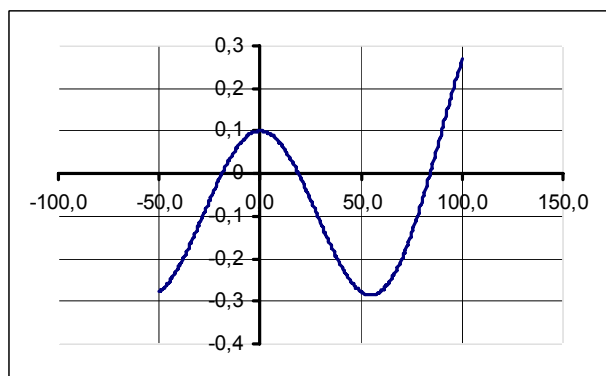
На рис. 2 представлены зависимости изменения минимального угла  $\alpha$  от параметров  $B/4S = 0,2, 0,3, 0,35$ . (кривая 1). Нетрудно видеть, что решение задачи определения минимальных углов  $\alpha$ , соответствующих различным значениям  $B/4S$ , аналогично рис. 2, но при этом изменятся пределы  $\alpha_{\min}$  от  $8-50^0$  (кривая 1).

Для конвейера с заданными параметрами  $B, S$  величина  $B/4S \rightarrow 0$  при  $S \rightarrow \infty$ , но в реальных условиях натяжение ленты допустимо в пределах:

$$S_{\text{сц}} < S < S_{\text{макс}}$$

где  $S_{\text{сц}}$  – натяжение ленты, при котором обеспечивается отсутствие проскальзывания ленты на приводном барабане;  $S_{\text{макс}}$  – возникающее на приводном барабане конвейера максимальное натяжение ленты, при котором величина её пластической деформации за весь период ее эксплуатации не должна превышать ход натяжного устройства.

Эксплуатация конвейера экономически целесообразна, если энергоёмкость транспортирования груза при заданной производительности не превосходит стоимости роликов на протяжении срока их службы [2]. Исходя из этого условия, с учетом (2.) получим систему уравнений для определения  $S$ :



$$\left\{ \begin{aligned} \omega_p &= \frac{Z - A}{A \operatorname{ctg} \alpha_{\min} + 4S \sin \alpha_{\min} + (q_n + q_{ap}) l_p + F_{pl}(t_i) + 2 / 3 P_a} \\ A &= \sigma_{\text{сжс}} \Delta F(S) \\ \Delta F(S) &= 2 \Delta F_{\text{бi}} + \Delta F_{\text{сi}} \end{aligned} \right. \quad (7)$$

где  $\Delta F_{\text{бi}}$  и  $\Delta F_{\text{сi}}$  – соответственно площади сечения деформаций боковой и средней части ленты (рис. 3);

$Z = 1000 N_p C_p / (C_3 V_l L_p)$ ;  $L_p$  – срок службы роликов;  $C_p, C_3$  – стоимости соответственно ролика и электроэнергии.

Взаимосвязь  $\Delta F = f(S)$  определялась из решения следующей задачи (рис. 3). Конвейерную ленту представляли в виде короба, состоящего из трех частей, разделенных между собой ребрами, деформациями которых можно пренебречь [4]. Каждая боковая часть ленты представляет собой пластину шириной  $B/3$  и длиной  $l_p$ , на которую оказывают давление силы бокового распора груза  $P_a$ . На среднюю часть ленты действует равномерно распределенная нагрузка  $(q_l + q_{gr})$ . Для боковых пластин расчетную схему представляем в виде упругой нерастяжимой нити, жестко защемленной на боковых роликах и растянутой силами  $S$ . Для средней пластины расчетную схему представляем в виде двух параллельных пружин, нагруженных одновременно насыпным грузом, общую

жесткость которых находим из условия, что лента шириной  $B/3$  и длиной  $l_p$  опирается на роликоопору, растянута силами  $S$  и  $c$

Рис. 1. Графическое решение уравнения (6) при  $B/4S = 0,1$

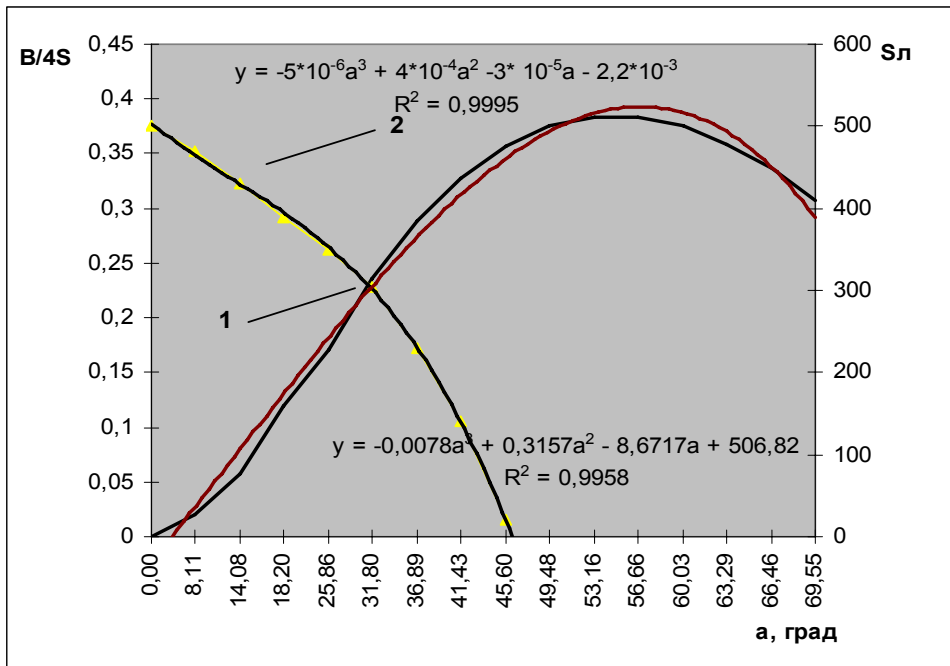


Рис. 2. Зависимость минимального угла набегания ленты на роликкоопору от  $B/4S$  (кривая 1) и натяжения ленты  $S$  (кривая 2)

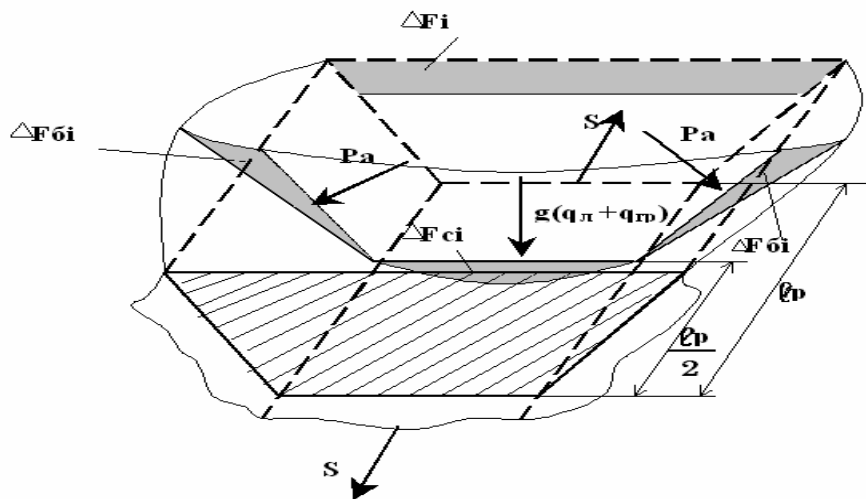


Рис. 3. Формоизменение поперечного сечения ленты с грузом при протягивании через роликкоопоры

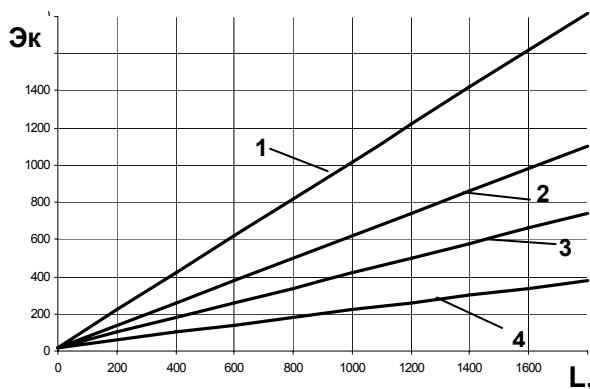


Рис. 4 Зависимости изменения потребляемой электроэнергии ленточным конвейером от его длины

$$A_2 = \sigma_{сж} \frac{B_l}{3} (M_{изб} + M_{изс} / 2).$$

На рис. 2 (кривая 2) представлена зависимость минимального угла от натяжения ленты. Область изменения минимальных углов набегающей ленты на роликоопору в пределах (4) составляет  $10^\circ \dots 40^\circ$ . Согласно [1, 4, 5]

двух сторон по ширине шарнирно закреплена к ребрам. В каждом из указанных случаев максимальный прогиб пластины можно определить из выражений:

$$Y_b = \frac{M_{изб}}{S};$$

$$Y_c = \frac{M_{изс}}{S} + \frac{(q_l + q_{cp})}{KC_{np}}; \quad (8)$$

где  $M_{изб}$  и  $M_{изс}$  - соответственно «балочные» изгибающие моменты на боковую и среднюю часть ленты;  $K$  - коэффициент, учитывающий снижение нагрузки из-за натяжения ленты;  $C_{np}$  - жесткость ленты на изгиб.

В общем виде площадь поднимаемого груза при протягивании его через роликоопору определяется из выражения:

$$\Delta F(S) = \frac{B_l}{3S} \left[ M_{изб} + \frac{M_{изс}}{2} \right]. \quad (9)$$

Решая совместно (7) с учетом (6), (9) получим выражение для  $S$ :

$$S^4 + \frac{A_2 ctg \alpha_{min}}{4 S \sin \alpha_{min}} S^2 - \frac{A_2 Z}{16 K S \sin \alpha_{min}} S - \frac{A_2^2}{16 K S \sin \alpha_{min}} = 0$$

где

для обеспечения постоянного угла набегающей необходимо устанавливать роликоопору с переменным шагом (0,5–2 м), соблюдая условие:

$$0,01 < \frac{Y_{max}}{l_p} < 0,02,$$

где  $Y_{max}$  - максимальный прогиб ленты между роликоопорами с выбранным  $l_p$ .

На рис. 4 представлены зависимости энергоемкости транспортирования насыпных грузов конвейером при  $\beta=14^\circ$  (кривая 1),  $\beta=8^\circ$  (кривая 2),  $\beta=0^\circ$  (кривая 3 при  $\alpha_{min}=30^\circ$ ),  $\beta=0^\circ$  (кривая 4 при  $\alpha_{min}=10^\circ$ ). При этом сопротивление вращению роликов определялось из выражения (7), а угол  $\alpha_{min}$  из (6).

Кривые: 1 ( $V_l=3$  м/с;  $\beta=14^\circ$ ), 2 ( $V_l=3$  м/с;  $\beta=8^\circ$ ), 3 ( $\beta=0^\circ$ ;  $\alpha_{min} = 30^\circ$ ), 4 ( $\beta=0^\circ$ ;  $\alpha_{min} = 10^\circ$ ).

Расчетные значения коэффициента сопротивления вращению роликов составляют  $\omega_{pmin}=0,004 \dots 0,008$ , а  $\omega_{pmax}=0,015 \dots 0,025$  и зависят от стоимости роликов, электроэнергии, чистого времени эксплуатации конвейера в год.

#### Выводы

1. Установлено, что при  $\beta=0$  (горизонтальный конвейер) и оптимальных углах набегающей ленты на роликоопору энергозатраты на транспортирование

насыпных грузов снижаются в 4...5 раз если обеспечивается  $\alpha_{\min}=10 \text{ м-}15^0$  (рис. 4, кривые 3, 4)

2. С повышением угла наклона конвейера (рис. 4, кривые 1, 2) энерго-

затраты резко увеличиваются, так как решающим фактором становится не сопротивление движению ленты, а подъем груза на заданную высоту.

---

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кузнецов Б.А. Транспорт на горных предприятиях. – М.: Недра, 1995.-530 с.

2. Монастырский В.Ф. Разработка методов и средств управления надежностью мощных ленточных конвейеров. Дисс. ... докт. техн. наук. – Днепропетровск., 1990, 545 с-машинопись.

3. Кукушкин А.О., Ларионов Г.И. К вопросу о многокритериальной оптимизации отвальных стрел отвалообразователей. Киев Нау-

кова думка. Промышленный транспорт 1999 г. С. 121-128.

4. Шпакунов И.А. Исследование основных составляющих коэффициента сопротивления движению ленты на длинных горизонтальных ленточных конвейерах: Дисс. канд. техн. наук. – М., 1968.– Машинопись.

5. Биличенко Н.Я., Высочин Е.М., Загородний Е.Х. Эксплуатационные режимы ленточных конвейеров. – Киев: Госнаучтехиздат, 1964. - М.: Недра, 1975. – 350 с. **ГИАБ**

#### Коротко об авторах

Монастырский В.Ф., Монастырский С.В. – МПТИ (ф) ЯГУ, г. Мирный,  
Кирия Р.В. – ИГТМ НАНУ, Днепропетровск.

Доклад рекомендован к опубликованию семинаром № 21 симпозиума «Неделя горняка-2007».  
Рецензент д-р техн. наук, проф. Л.И. Кантович.



Файл: 17a\_Монастырский21  
Каталог: E:\С диска по работе в универе\ГИАБ\_2008\11\семинар  
Шаблон: C:\Users\Таня\AppData\Roaming\Microsoft\Шаблоны\Normal.dotm  
Заголовок: © В  
Содержание:  
Автор: Гитис Л.Х.  
Ключевые слова:  
Заметки:  
Дата создания: 04.09.2008 14:41:00  
Число сохранений: 4  
Дата сохранения: 04.09.2008 14:43:00  
Сохранил: Гитис Л.Х.  
Полное время правки: 2 мин.  
Дата печати: 25.11.2008 23:17:00  
При последней печати  
страниц: 6  
слов: 1 624 (прибл.)  
знаков: 9 257 (прибл.)