

## ГОРНОЕ МАШИНОВЕДЕНИЕ

УДК 622.6

### ОБОСНОВАНИЕ РАЦИОНАЛЬНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ МНОГОПРИВОДНЫХ ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНЫХ ЛЕНТОЧНЫХ КОНВЕЙЕРОВ

А. А. Ордин<sup>1,2</sup>, А. М. Никольский<sup>1</sup>, Е. В. Подугольников<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН,  
E-mail: ordin@misd.ru, Красный проспект, 54, 630091, г. Новосибирск, Россия  
<sup>2</sup>ФИЦ информационных и вычислительных технологий,  
просп. Академика Лаврентьева, 6, 630090, г. Новосибирск, Россия  
<sup>3</sup>ОАО “Анжеро-маш”, ул. Войкова, 6а, 652456, г. Анжеро-Судженск, Россия

Изложена постановка и приведено решение задачи по обоснованию рациональных технических параметров многоприводных высокопроизводительных ленточных конвейеров для транспортирования насыпной угольной массы. Рассмотрены теоретические основы тягового расчета ленточных конвейеров, включающие в себя основное уравнение динамики работы ленточных конвейеров, особенности расчета при стационарном и пусковом режимах работы с учетом кривизны трассы в плане и по профилю. Дано обоснование рациональной ширины ленты и производительности ленточного конвейера. Рассчитаны силы тяги и мощности электродвигателей многоприводного ленточного конвейера. Осуществлена проверка выбранной конвейерной ленты по условиям прочности. Приведен пример расчета с помощью разработанной программы “ЛЕНТА 1.0” многоприводного ленточного конвейера шахты “Инаглинская” Южно-Якутского угольного бассейна.

*Шахта, ленточный конвейер, угольная масса, тяговый расчет, трение качения, ролики, сила натяжения, производительность, прочность, стрела прогиба*

DOI: 10.15372/FTPRPI20230209

В связи с увеличением производительности очистных забоев угольных шахт произошли существенные изменения в конструкции шахтных ленточных конвейеров, типах конвейерных лент, пусковых системах. Для обеспечения высокой пропускной способности ленточных конвейеров появилась необходимость использования многоприводных систем транспортирования. Применение резинотканевых лент с механической стыковкой возросло до 90% в отличие от резинотросовых лент с вулканизацией стыка. Вследствие эксплуатации высокопроизводительных лавных скребковых конвейеров, перегружателей и дробилок ударного действия горная масса, приходящая на ленточный конвейер, стала более однородной, в результате снизилось сопротивление от деформации груза. Благодаря установке на приводных барабанах керамиче-

ского футеровочного покрытия с увеличенным на 30–40 % коэффициентом сцепления ленты с барабаном, появилась возможность уменьшить натяжение в контуре ленты и исключить пробуксовку на приводном барабане. Изменения в конструкции роликов, в частности применение лабиринтных неконтактных уплотнений, обеспечили резкое снижение массы вращающихся частей, а уменьшение радиального биения подшипников за счет точности их изготовления — снижение сопротивления от вращения и повышение ресурса конвейера.

Указанные положительные изменения не позволили ощутимо увеличить машинное время работы конвейеров, при котором создается стабильная загрузка поперечного сечения ленты с насыпной массой, т. е. использовать оптимальную ширину ленты и конвейерного става. Следовательно, при тяговом расчете необходимо обращать внимание на максимальную кратковременную производительность, зачастую превышающую параметры сечения ленты с насыпной массы, зависящей от расчетной рабочей ширины ленты.

Существующие методики расчета технических параметров ленточных конвейеров [1–8] разработаны в 1960–1990 гг. Конструкции ленточных конвейеров не всегда соответствуют современным требованиям к тяговому расчету [9–13], поэтому необходимо дополнить и усовершенствовать существующие методики.

Анжерский машиностроительный завод (ОАО “Анжеромаш”) обратился в Институт горного дела СО РАН с просьбой провести разработку теоретических основ программы тягового расчета многоприводных высокопроизводительных ленточных конвейеров, основные результаты которой изложены в настоящей работе.

### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В общей постановке задача обоснования и выбора рациональных технических параметров ленточного конвейера заключается в минимизации суммарных расходов на его изготовление и эксплуатацию в виде целевой функции

$$\sum_{t=1}^T \frac{C_t[Q(\bar{x}, \bar{y})]}{(1+E)^t} + K(\bar{x}, \bar{y}) \rightarrow \min \quad (1)$$

при ограничениях:

— по пропускной способности конвейера

$$Q(\bar{x}, \bar{y}) \geq Q_{\max};$$

— по условию прочности конвейерной ленты

$$\sigma_{\max} \leq [\sigma] = \frac{\sigma_p}{k_z};$$

— по допускаемой стреле прогиба ленты между роликотпорами

$$\lambda(\bar{x}, \bar{y}) \leq [\lambda],$$

где  $C_t[Q(\bar{x}, \bar{y})]$  — зависимость эксплуатационных затрат на транспортирование угольной массы ленточным конвейером от его производительности и влияющих факторов, руб./год;  $\bar{x}$  — вектор управляемых, оптимизируемых технических параметров ленточного конвейера;  $\bar{y}$  — вектор неуправляемых, заданных заказчиком переменных, для которых проводится проектирование конвейера;  $Q(\bar{x}, \bar{y})$  — производительность или пропускная способность проектируемого ленточного конвейера, т/ч;  $E$  — норма дисконта;  $T$  — ресурс работы конвейера, лет;  $K(\bar{x}, \bar{y})$  —

капитальные затраты на изготовление конвейера, зависящие от длины ленты и длины конвейера, руб.;  $Q_{\max}$  — максимальная расчетная производительность очистного забоя, определяемая по методике и программе “ПРОЗА-4.1” [14], учитывающей горно-геологические, технологические и экономические факторы, т/мин;  $\sigma_{\max}$  — максимальное нормальное напряжение, возникающее в поперечном сечении ленты, зависящее от силы натяжения ленты, типа и количества прокладок и их прочности, МПа;  $[\sigma]$  — допускаемое нормальное напряжение в ленте, МПа;  $\sigma_p$  — предельное напряжение разрыва ленты, МПа;  $k_z$  — нормативный коэффициент запаса прочности ленты;  $\lambda$  — фактическая стрела прогиба ленты между роlikоопорами, зависящая от пропускной способности конвейера, типа ленты и расстояния между роlikоопорами, мм;  $[\lambda]$  — допускаемая по нормативам стрела прогиба ленты, мм.

Для решения задачи (1) требуется формализовать действующие ограничения. Первоначально необходимо провести тяговый расчет, в который входит оценка сил натяжения грузовой и холостой ветвей конвейера по контуру трассы и расчет сил тяги и мощностей электродвигателей многоприводного ленточного конвейера.

*Основное уравнение динамики работы ленточных конвейеров.* В соответствии с законами теоретической механики [15] основное уравнение динамики стационарного движения ленты конвейера в алгебраической форме имеет вид:

$$M \frac{\partial v}{\partial t} = F_T - (F_0 + (F_{G1} \pm F_{G2}) + (F_{X1} \pm F_{X2}) + 2f F_0 + F_r + F_u). \quad (2)$$

Здесь  $M$  — суммарная насыпная угольная масса и масса ленты конвейера, кг;  $v$  — скорость движения ленты конвейера с насыпной массой, м/с;  $t$  — время, с;  $F_T$  — сила тяги электродвигателя конвейера, Н;  $F_0$  — сила предварительного натяжения ленты, Н;  $F_{G1}$ ,  $F_{X1}$  — сила трения качения между лентой и роlikоопорами соответственно грузовой и холостой ветвей, Н;  $F_{G2}$ ,  $F_{X2}$  — скатывающая составляющая веса соответственно грузовой и холостой ветвей, Н;  $f$  — коэффициент трения качения в подшипниках барабана;  $F_r$  — сила трения отклоняющих барабанов, роликков и бортов конвейера, Н;  $F_u$  — дополнительная сила, возникающая при изгибе конвейера в плане и профиле, Н. Скатывающая составляющая веса ленты и насыпной массы берется со знаком “+” при движении ленты снизу вверх и со знаком “–” при движении ленты сверху вниз.

При установившемся равномерном движении ускорение ленты равно нулю и соблюдается условие силового равновесия:

$$M \frac{\partial v}{\partial t} = F_T - (F_0 + (F_{G1} \pm F_{G2}) + (F_{X1} \pm F_{X2}) + 2f F_0 + F_r + F_u) = 0,$$

откуда сила тяги электродвигателя конвейера в общем виде равна

$$F_T = F_0 + (F_{G1} \pm F_{G2}) + (F_{X1} \pm F_{X2}) + 2f F_0 + F_r + F_u. \quad (3)$$

При пусковом периоде лента конвейера совершает равноускоренное движение и, соответственно, силу тяги электродвигателя конвейера необходимо увеличить. Из (2) следует:

$$F_{Tn} = F_0 + (F_{G1} \pm F_{G2}) + (F_{X1} \pm F_{X2}) + 2f F_0 + F_r + F_u + Ma, \quad (4)$$

где  $a = v / T_n$  — ускорение ленты конвейера в пусковой период, м/с<sup>2</sup>;  $T_n$  — период пуска конвейера, с.

При установке конвейера под углом  $\alpha$  к горизонтальной плоскости сила трения качения между лентой и роlikоопорами определяется силой давления, действующей перпендикулярно направлению движения ленты, а скатывающая составляющая является проекцией веса ленты и насыпной массы на ось  $OX$ , направленной вдоль ленты:

$$F_T = F_0 + (P_1 + P_2)L(f_1 \cos \alpha \pm \sin \alpha) + P_1L(f_2 \cos \alpha \pm \sin \alpha) + 2fF_0 + F_{tr} + F_u, \quad (5)$$

где  $L$  — длина конвейера, м;  $P_1 = \gamma_l S_l = \gamma_l bh$  — вес 1 м ленты, кг/м;  $\gamma_l$  — плотность ленты, кг/м<sup>3</sup>;  $S_l = bh$  — площадь поперечного сечения ленты, м<sup>2</sup>;  $b$  — ширина ленты, м;  $h$  — толщина ленты, м;  $P_2 = \gamma_c S$  — вес 1 м насыпной угольной массы, кг/м;  $\gamma_c$  — средневзвешенная плотность насыпной угольной массы, кг/м<sup>3</sup>;  $S$  — площадь поперечного сечения насыпной угольной массы на ленте, м<sup>2</sup>;  $f_1, f_2$  — коэффициенты сопротивления или трения качения грузовой и холостой ветвей ленты.

В тяговом расчете силы натяжения ленты обычно используется метод обхода по контуру трассы ленточного конвейера. При этом следует использовать правило: сила  $F_{i+1}$  сопротивления в  $i+1$ -й точке трассы равна силе  $F_i$  сопротивления в предыдущей  $i$ -й точке с добавлением силы сопротивления участка  $(i, i+1)$  трассы между этими точками, а сила натяжения  $F_i$  ленты равна сумме сил сопротивления по всей трассе конвейера:

$$F_{i+1} = F_i + F_{i,(i+1)}, \quad F_l = \sum_{i=1}^n F_i,$$

$n$  — количество характерных точек трассы конвейера.

При установившемся равномерном движении ленты многоприводного конвейера сила тяги  $j$ -го электродвигателя равна суммарной силе натяжения ленты на участке между  $j$ -м и  $j-1$  приводами:

$$F_{Tj} = \sum_{i=1}^{n_j} (f_1(P_1 + P_2)l_i \cos \alpha_i \pm (P_1 + P_2)l_i \sin \alpha_i + \Delta F_{1i} + \Delta F_{2i}) + \sum_{i=1}^{n_j} P_1 l_i (f_2 \cos \alpha_i \pm \sin \alpha_i) + \Delta F_{1i} + \Delta F_{2i} + 2fF_0 + F_{tr}, \quad (6)$$

где  $l_i$  — длина  $i$ -го участка ленточного конвейера, м;  $\alpha_i$  — угол наклона  $i$ -го участка конвейера к горизонтальной плоскости, который берется со знаком “+” или “-” при подъеме или спуске угольной массы соответственно;  $\Delta F_{1i}, \Delta F_{2i}$  — дополнительные силы натяжения ленты, вызванные изгибом конвейера соответственно по профилю и в плане;  $n_j$  — количество участков трассы до  $j$ -го привода.

После окончания тягового расчета определяются силы тяги и мощности электродвигателей всех приводов конвейера. Мощность  $j$ -го электродвигателя определяется по формуле

$$N_j = \frac{KF_{Tj}v}{\eta}. \quad (7)$$

Здесь  $K = K_1 K_2 K_3$  — коэффициент запаса мощности;  $\eta$  — КПД механической передачи;  $F_{Tj}$  — сила тяги  $j$ -го электродвигателя, кН;  $v$  — скорость движения ленты, м/с. Коэффициент  $K$  принимается в зависимости от угла наклона конвейера [1]: 1.2 — угол от  $-3$  до  $+18$ ;

1.5 — угол от  $-16$  до  $-3$ ,  $K_2 = 1$  — при мощности более 315 кВт,  $K_2 = 1.1$  — при мощности менее 315 кВт,  $K_3$  — принимается в зависимости от числа двигателей приводного барабана (1.1 — для приводного барабана с числом двигателей более одного, 1.0 — для однодвигательного приводного барабана) [9]. Мощности электродвигателей в пусковой период увеличивают в среднем на 50% [7, 8].

При расчете мощности необходимо учитывать КПД  $\eta$  передачи от электродвигателя до приводного барабана:

$$\eta = \eta_1 \eta_2 \eta_3 \eta_4,$$

где  $\eta_1$  — КПД редуктора;  $\eta_2$  — КПД быстроходной муфты;  $\eta_3$  — КПД гидромуфты (при наличии);  $\eta_4$  — КПД тихоходной муфты.

*Особенности расчета силы натяжения ленты на наклонном конвейере.* Рассмотрим условие силового равновесия ленты с углом наклона конвейера  $\alpha$  к горизонтальной плоскости при подъеме груза и расположении привода в верхней части конвейера (рис. 1).

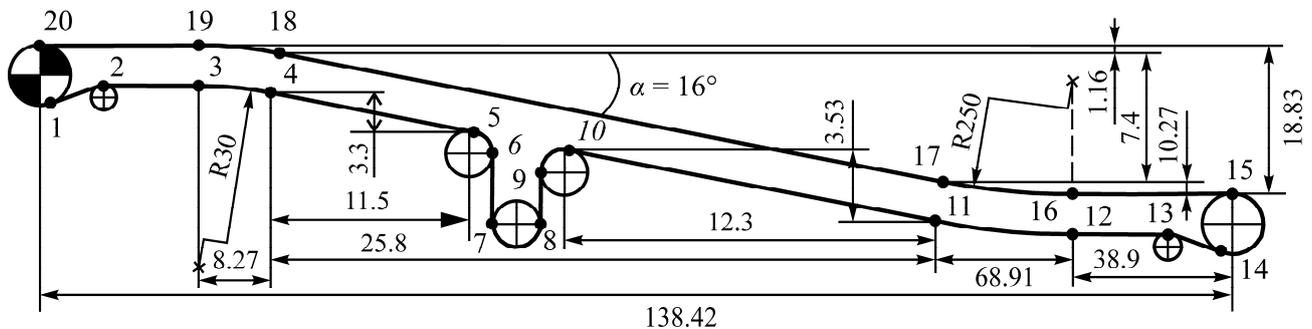


Рис. 1. Техническая схема ленточного наклонного конвейера обогатительной фабрики разреза “Нерюнгринский”: 1–20 — характерные точки трассы. Обозначения даны в метрах

При неработающем конвейере и отсутствии груза в грузовой и холостой ветвях действуют одинаковые силы предварительного натяжения и составляющей веса ленты, направленной вдоль конвейера. Сумма моментов этих сил относительно оси  $OX$  приводного барабана равна нулю:

$$M_O(F_{G1}) = M_O(F_{X1}), \quad 0.5F_{G1}D = 0.5F_{X1}D,$$

откуда

$$F_{G1} = F_{X1} = F_0 + P_1 L \sin \alpha = F_0 + \gamma_l S_l L \sin \alpha,$$

$D$  — диаметр приводного барабана, м.

В данном случае незагруженная, неподвижная лента находится в силовом равновесии. При полной загрузке неподвижной ленты силовое равновесие нарушается, появляется составляющая веса груза, направленная вдоль грузовой ветви. В результате сила натяжения грузовой ветви  $F_G$  становится больше силы натяжения холостой ветви  $F_X$ :

$$F_G = F_0 + (P_1 + P_2)L \sin \alpha > F_X = F_0 + P_1 L \sin \alpha$$

на величину  $P_2 L \sin \alpha = \gamma_c S L \sin \alpha$ . Грузовая ветвь ленты удерживается в неподвижном состоянии только силой трения скольжения между лентой и приводным барабаном и при значительном весе груза лента может самопроизвольно перемещаться вниз.

Чтобы не произошло самопроизвольного движения ленты с грузом к холостой ветви, необходимо приложить удерживающую силу, которая определяется по формуле Л. Эйлера [15]:

$$F_X = F_G e^{-f_c \varphi}, \quad (8)$$

где  $e$  — основание натурального логарифма;  $f_c$  — коэффициент трения скольжения между лентой и приводным барабаном;  $\varphi$  — угол обхвата лентой барабана, рад.

Так как сила предварительного натяжения и составляющая веса ленты одинаковы в грузовой и холостой ветвях, то для уравнивания насыпной массы к холостой ветви необходимо дополнительно приложить силу, равную

$$\Delta F_X = P_2 \sin \alpha e^{-f_c \varphi} = \gamma_c S L \sin \alpha e^{-f_c \varphi}. \quad (9)$$

Для нормальной работы наклонного ленточного конвейера в холостой ветви требуется увеличить натяжение ленты установкой дополнительных барабанов и натяжных роликов, обеспечивающих силу предварительного натяжения (рис. 1).

Использование натяжного устройства при углах обхвата лентой трех барабанов  $90^\circ$ ,  $180^\circ$ ,  $90^\circ$  приводит к увеличению силы натяжения холостой ветви в точке 10 по сравнению с натяжением в точке 5 с коэффициентом трения качения  $f = 0.04$ :

$$F_{10} = F_5 e^{0.5 f_c \pi} e^{f_c \pi} e^{0.5 f_c \pi} = F_5 1.06 \cdot 1.13 \cdot 1.06 = 1.27 F_5.$$

Далее необходимо сравнить, достаточно ли увеличения натяжения холостой ветви на  $1.27 F_X$ , чтобы обеспечить удерживающую силу (9).

#### РАСЧЕТ ПЛОЩАДИ ПОПЕРЕЧНОГО СЕЧЕНИЯ НАСЫПНОЙ УГОЛЬНОЙ МАССЫ И СКОРОСТИ ДВИЖЕНИЯ ЛЕНТЫ

Пропускная способность стационарно установленного ленточного конвейера должна быть больше максимально возможной по технологическим и техническим факторам производительности очистного забоя. Данное ограничение с учетом (1) запишем в виде

$$60 \gamma_c S k_1 v \geq Q_{\max}. \quad (10)$$

Из этого условия определяется требуемая скорость движения ленты:

$$v \geq \frac{Q_{\max}}{60 \gamma_c S(b, \beta, l(b), \rho) k_1}, \quad 0 < v < v_{\max}, \quad (11)$$

где  $Q_{\max}$  — максимально возможная производительность очистного комбайна, определяемая по условиям: резания угольного пласта, пропускной способности скребкового конвейера и допустимой концентрации метана на исходящей струе лавы, т/мин;  $S$  — максимальная площадь поперечного сечения угольной массы на ленте в зависимости от рабочей ширины ленты  $b$ , угла наклона  $\beta$  и длины боковых роликов  $l(b)$ , угла естественного откоса насыпной массы на ленте  $\rho$ ;  $k_1 = 1$  — при установке ленточного конвейера в конвейерном штреке;  $k_1 = 0.95$  — при установке ленточного конвейера в уклоне, наклоне стволе или бремсберге [1];  $v_{\max}$  — максимально допустимая по правилам безопасности скорость движения ленты (для грузоподъемных конвейеров  $v_{\max} = 3.15$  м/с, для грузовых —  $v_{\max} = 5$  м/с).

Максимальная площадь поперечного сечения угольной насыпной массы на ленте определяется как сумма площадей трапеции и треугольника с учетом длины боковых роликов  $l(b)$ , угла их установки  $\beta$  и угла естественного откоса насыпной массы на ленте  $\rho$  (рис. 2):

$$S(b, \beta, l(b), \rho) = 0.5[(b - 2l(b)) + [b + 2l(b) \cos \beta]]l(b) \sin \beta + 0.25[b + 2l(b) \cos \beta]^2 \operatorname{tg} \rho. \quad (12)$$

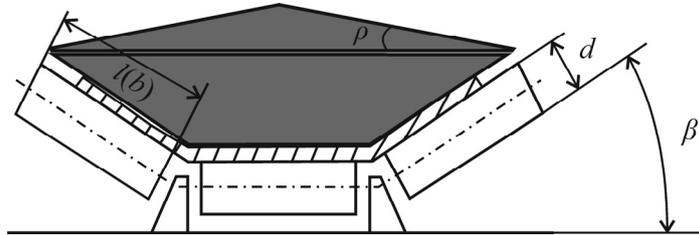


Рис. 2. Схема четырехприводного ленточного конвейера шахты “Инаглинская”:  
 $d$  — диаметр ролика

По данным [2, 3] с коэффициентом аппроксимации  $R^2 = 0.99$  определена линейная зависимость длины  $l$  боковых роликов от ширины  $b$  ленты:

$$l(b) = 0.38b - 0.015. \quad (13)$$

Площадь поперечного сечения и производительность ленточного конвейера зависит от угла его наклона  $\alpha$  к горизонтальной плоскости и определяется линейной убывающей зависимостью с коэффициентом аппроксимации  $R^2 = 0.95$  [15]:  $K = 1.038 - 0.0063\alpha$ .

Предлагается алгоритм расчета максимальной площади поперечного сечения насыпной угольной массы и скорости движения ленты:

- 1) принимается минимальная нормативная ширина ленты;
- 2) определяется длина боковых роликов в зависимости от угла их наклона и ширины ленты;
- 3) рассчитывается максимальная площадь поперечного сечения насыпной угольной массы на конвейере;
- 4) вычисляется скорость движения ленты с учетом максимальной производительности очистного забоя и расчетной площади поперечного сечения насыпной массы;
- 5) полученная скорость движения ленты округляется до большего номинального значения и сравнивается с максимальной допустимой скоростью;
- 6) если расчетное значение скорости движения ленты превышает максимально допустимое значение, необходимо увеличить ширину ленты до следующего номинального значения и перейти на п. 2. данного алгоритма;
- 7) расчет заканчивается при выполнении условия (11).

В результате определяется ширина ленты, площадь поперечного сечения насыпной угольной массы и скорость движения ленты, при которой обеспечивается необходимая пропускная способность конвейера. Принятая по данному алгоритму ширина ленты обеспечивает минимальную стоимость изготовления и эксплуатации конвейера, обозначенную в (1).

#### ТЕХНИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ И УСЛОВИЕ ПРОЧНОСТИ ЛЕНТЫ

При расчете параметров и типоразмеров конвейерной ленты использованы нормативные материалы [12]. Толщина резинотканевой ленты определяется по суммарной толщине прокладок, обкладок и резинотканевого каркаса. Вес 1 м резинотканевой ленты в этом случае находится по формуле [11]:

$$P_1(b) = \gamma b h = \gamma b (h_1 n + h_2 + h_3), \quad (14)$$

где  $b$  — ширина ленты, м;  $\gamma$  — плотность ленты, кг/м<sup>3</sup>;  $h$  — общая толщина ленты, м;  $h_1$  — толщина прокладок, мм;  $n$  — количество прокладок;  $h_2$  — суммарная толщина верхней и нижней обкладок, мм;  $h_3$  — толщина резиноканевого каркаса, мм. Толщина одной прокладки по [1] составляет 1.35–2.50 мм в зависимости от ее прочности.

В настоящее время для рядового угля угольных и сланцевых шахт применяются трудно-воспламеняющиеся резиноканевые ленты с толщиной наружных обкладок рабочей и нерабочей поверхностей 4.5 и 3.5 мм соответственно. Масса 1 м шахтной резиноканевой трудно-гораемой ленты ТС (ТГ) ПВР с цельнотканым каркасом, пропитанным поливинилхлоридной композицией, приведена в табл. 1 [12].

ТАБЛИЦА 1. Технические параметры резиноканевой ленты

Тип ленты	Номинальная прочность ленты 1 мм прокладки, Н/мм	Толщина ленты, мм	Масса 1 м <sup>2</sup> ленты, кг/м <sup>2</sup>
ШТС (ТГ) ПВР-800	800	12.0	15
ШТС (ТГ) ПВР-1000	1000	13.0	17
ШТС (ТГ) ПВР-1250	1250	14.0	19
ШТС (ТГ) ПВР-1400	1400	15.0	21
ШТС (ТГ) ПВР-1600	1600	17.5	23
ШТС (ТГ) ПВР-1800	1800	20.0	25

Примечание. Количество прокладок — 1; толщина верхней обкладки — 3 мм, нижней — 2 мм для всех представленных типов ленты.

Необходимое количество прокладок в ленте выбирается в зависимости от силы натяжения и ширины ленты, прочности прокладки, угла наклона конвейера по формуле [13]:

$$n = \frac{F_{\max} k_z}{BF_{pr}}$$

Здесь  $F_{\max}$  — максимальное натяжение ленты, Н;  $B$  — ширина ленты, мм;  $F_{pr}$  — разрывное усилие (прочность) одной прокладки ленты, Н/мм;  $k_z = 8.5$  — коэффициент безопасности для конвейерных грузоподъемных лент. В данной формуле количество прокладок округляется до большего целого числа.

При выборе ленты необходимо проверить условие ее прочности, которое по [12] заключается в сравнении разрывного усилия ленты с расчетным максимальным натяжением в ее контуре с учетом коэффициента запаса прочности:

$$F_{\max} \leq \frac{F_p}{k_z} = \frac{F_p}{k_1 k_2 k_3 k_4}, \quad (15)$$

где  $F_p$  — разрывное усилие ленты конкретного типоразмера;  $F_{\max}$  — максимальное натяжение ленты;  $k_z$  — коэффициент запаса прочности;  $k_1$  — коэффициент, учитывающий перегрузку ленты при пуске;  $k_2$  — коэффициент, учитывающий тип ленты и угол наклона конвейера;  $k_3$  — коэффициент, учитывающий изменение длины конвейера при эксплуатации;  $k_4$  — коэффициент, учитывающий тип стыкового соединения ленты.

В формуле (15) не учитывается площадь поперечного сечения ленты, которая влияет на ее прочность. Условие прочности ленты корректно рассчитывать по нормальным напряжениям, возникающим в ленте [13]:

$$\sigma_{\max} = \frac{F_{\max}}{S_l} = \frac{F_{\max}}{bh} \leq [\sigma] = \frac{\sigma_p}{k_z}, \quad (16)$$

здесь  $S_l$  — площадь поперечного сечения ленты,  $m^2$ ;  $b$ ,  $h$  — соответственно ширина и толщина ленты,  $m$ ;  $[\sigma]$  — допускаемое нормальное напряжение в ленте,  $MПа$ ;  $\sigma_p$  — предел прочности ленты на разрыв,  $MПа$ .

Пример расчета многоприводного ленточного конвейера для шахты “Инаглинская” Южно-Якутского угольного бассейна. Четырехприводный грузолодской ленточный конвейер для выдачи угольной массы по наклонному стволу шахты “Инаглинская” соответствует технической схеме на рис. 3.

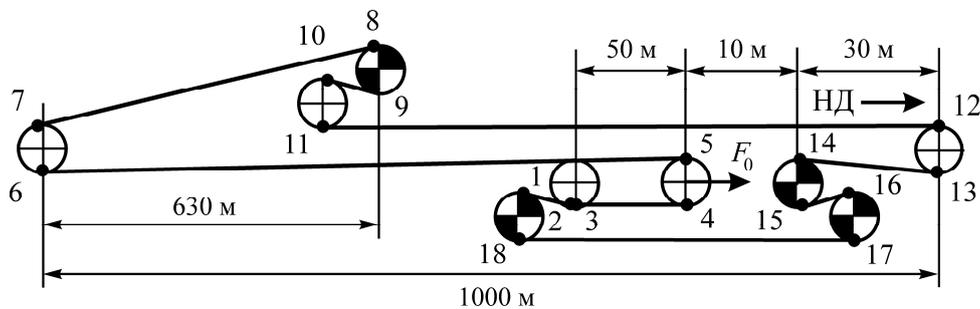


Рис. 3. Многоприводный ленточный конвейер: 1–18 — характерные точки трассы; ⊕ — электроприводы конвейера; ⊕ — натяжные барабаны; НД — направление движения ленты

Основные исходные данные для расчета конвейера:

- максимальная производительность очистного забоя 1400 т/ч (23.3 т/мин);
- длина конвейера 1000 м с углом наклона  $10^\circ$ ;
- угол естественного откоса насыпной массы  $15^\circ$ ;
- угол наклона боковых роликов  $35^\circ$ ;
- коэффициент трения качения между лентой и роликами 0.03;
- коэффициент трения скольжения между лентой и приводным барабаном 0.3;
- количество приводных футерованных барабанов 4;
- удельное разрывное усилие резиноканевой ленты 1630 кг/см;
- прочность прокладки 1000 Н/мм;
- коэффициент запаса прочности ленты 8.5.

Результаты решения задачи с помощью разработанной в ИГД СО РАН программы “ЛЕНТА 1.0” в сводном виде заключаются в следующем:

- оптимальная ширина ленты 1.2 м;
- площадь поперечного сечения насыпной массы на ленте  $0.169 m^2$ ;
- номинальная расчетная скорость движения ленты 3.15 м/с;
- вес 1 м насыпной массы 129.60 кг;
- вес 1 м резиноканевой ленты 20.15 кг.

В табл. 2 приведены результаты расчета сил натяжения ленты по участкам трассы.

ТАБЛИЦА 2. Силы сопротивления и натяжения ленты по участкам трассы, кН

Участок конвейера	Длина, м	Угол, град	Сопротивление движению	Натяжение ленты
Грузовая ветвь. Привод 1				
Участок 7–8	630	10	243.73	243.73
Сумма	—	—	243.73	243.73
Привод 2				
Участок 8–9	0	210	87.26	87.26
Участок 9–10	1.5	10	0.57	0.57
Участок 10–11	0	180	2.18	2.18
Участок 11–12	372	10	144.98	144.98
Сумма	—	—	235.00	235.00
Холостая ветвь				
Участок 12–13	0	180	5.87	240.87
Участок 13–14	30	5	0.31	241.19
Сумма	—	—	241.19	241.19
Привод 3				
Участок 14–15	0	210	87.55	87.55
Участок 15–16	1.5	5	0.07	87.63
Сумма	—	—	87.63	87.63
Привод 4				
Участок 16–17	0	210	31.81	31.81
Участок 17–18	92	0	1.16	32.97
Сумма	—	—	32.97	32.97
Дополнение к приводу 1				
Участок 18–1	0	210	0.99	33.96
Участок 1–2	1.5	0	0.02	33.98
Участок 2–3	0	180	1.02	34.99
Участок 3–4	50	0	0.63	35.62
Участок 4–5	0	180	1.07	36.25
Участок 5–6	910	–10	–55.01	–18.76
Участок 6–7	0	180	–0.56	–19.32
Сумма	—	—	–51.85	–19.32

Ниже приведены расчетные силы тяги и мощности на приводном барабане электродвигателя конвейера:

Сила тяги 1; 2; 3; 4, кН	137.15; 153.63; 55.82; 32.97
Мощность 1; 2; 3; 4, кВт	545.72; 611.29; 222.09; 131.18
Суммарная мощность электродвигателей, кВт	1510.27

## ВЫВОДЫ

Силы натяжения грузовой и холостой ветвей ленты и соответствующие реакции связей вблизи приводного барабана создают моменты сопротивления, действующие против направления его вращения, поэтому по условию силового равновесия силу тяги электродвигателя следует определять как сумму сил натяжения грузовой и холостой ветвей конвейерной ленты с учетом всех сил сопротивления ее движению.

Проверка прочности ленты выполняется по условию допускаемого нормального напряжения в сечении ленты, которое в отличие от разрывного усилия учитывает площадь поперечного сечения ленты, включающую в себя ширину ленты, толщину и количество резиновых прокладок, а также их прочность.

Для тягового расчета многоприводного ленточного конвейера шахты “Инаглинская” Южно-Якутского угольного бассейна использована разработанная программа “ЛЕНТА 1.9”, с помощью которой установлены силы тяги и мощности четырехприводного ленточного конвейера.

Для дальнейшего развития методического подхода и разработки программного обеспечения автоматизированного тягового расчета ленточных конвейеров необходимо провести дополнительные исследования упругопластического деформирования лент и использовать опыт работы ОАО “Анжеромаш” по созданию и эксплуатации ленточных конвейеров.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Зенков Р. Л., Петров М. М.** Конвейеры большой мощности. — М.: Машиностроение, 1964. — 426 с.
2. **ОСТ 12.14.130-79.** Конвейеры ленточные шахтные. Методика расчета. — М.: МУП СССР, 1980. — 70 с.
3. **ГОСТ 20-85.** Ленты конвейерные резиноканевые. Технические условия. — М.: Госстандарт, 1985.
4. **Шахмейстер Л. Г., Солод Г. И.** Подземные конвейерные установки. — М.: Недра, 1976. — 432 с.
5. **Шахмейстер Л. Г., Дмитриев В. Г.** Расчет ленточных конвейеров для шахт и карьеров. — М.: МГИ, 1972. — 298 с.
6. **Пертен Ю. А.** Конвейеры, справочник. — М.: Машиностроение, 1984. — 155 с.
7. **Солод В. И., Гетопанов В. Н., Рачек В. М.** Проектирование и конструирование горных машин и комплексов. — М.: Недра, 1982. — 350 с.
8. **Конвейеры ленточные.** Проектирование и расчеты. НВ-542-90. — Новосибирск: ООО “Сибгипрошахт”, 1990.
9. **Пертен Ю. А.** Конвейерные системы. — СПб.: Профессионал, 2008. — 230 с.
10. **Госстандарт РФ № 476-ст.** Конвейеры шахтные ленточные. — М.: Госстандарт, 2002. — 27 с.
11. **Рудничный транспорт** и механизация вспомогательных работ / Ю. А. Кондрашин, В. К. Колояров, С. И. Ястремский, Г. Г. Меграбян, Н. Н. Саетов. — М.: Горн. кн., 2010. — 534 с.
12. **Руководство эксплуатации конвейерных лент.** — Курск: Резинотехника, 2007. — 93 с.
13. **Расчет ленточного транспортера.** — Томск: ТПУ, 2014. — 35 с.
14. **Ордин А. А., Никольский А. М., Метельков А. А.** Моделирование и оптимизация технологических параметров очистных и подготовительных работ в панели угольной шахты // ФТПРПИ. — 2013. — № 6. — С. 117–127.
15. **Тарг С. М.** Краткий курс теоретической механики. — М.: Высш. шк., 1998. — 415 с.

*Поступила в редакцию 15/IX 2022  
После доработки 12/III 2023  
Принята к публикации 16/III 2023*