

В.И. Тарасов

## ОЦЕНКА СОВЕРШЕНСТВА ЛЕНТОЧНОГО КОНВЕЙЕРА ПО ЭНЕРГЕТИЧЕСКОМУ ПОКАЗАТЕЛЮ

*Получено аналитическое описание КПД ленточного конвейера и оценено влияние конструктивных и режимных параметров на удельные затраты энергии при транспортировании угля.*

---

### ОЦІНКА ДОСКОНАЛОСТІ СТІЧКОВОГО КОНВЕЄРА ЗА ЕНЕРГЕТИЧНИМ ПОКАЗНИКОМ

*Отримано аналітичний опис ККД стрічкового конвеєра й оцінено вплив конструктивних та режимних параметрів на питомі витрати енергії при транспортуванні вугілля.*

---

### SCORE PERFECT BELT FOR THE POWER INDICATOR

*Analytic description of belt conveyor efficiency is given. The constructive and operational parameter influences on energy costs while coal transportation are estimated.*

---

#### ВВЕДЕНИЕ

Мотивацией к экономии электроэнергии на транспорте шахты является Закон Украины «Об энергосбережении». Стоимость электроэнергии в общей стоимости угля составляет 20% и более. Задача построения энергоэкономной транспортной системы сводится к обоснованию схемы перевозки угля от забоев до бункера ствола, расчету грузопотоков, выбору средств транспорта с максимально возможным КПД, определению режимных и эксплуатационных параметров средств транспорта.

Основным направлением в развитии транспортных систем на угольных шахтах является переход их на полную конвейеризацию основного грузопотока. На шахтах с пологими пластами основной грузопоток транспортируется разветвленными конвейерными линиями, длина которых доходит до 15 км, а производительность до 5 тыс. т в сутки. Число конвейеров в них доходит

до 15 – 20, а длина отдельного конвейера колеблется от 0,2 до 1,5 км и в каждом конкретном случае определяется результатом кусочно-линейной аппроксимации извилистой выработки. Расход энергии на подземном транспорте составляет 12% от общешахтных расходов. Структурное построение транспортных систем угольных шахт определяется принятой системой разработки, схемами подготовки и вскрытия, углами падения пластов. В силу ограничений по предельному углу наклона в 18° конвейерный транспорт получил применение на шахтах с пологими и наклонными пластами.

При сплошной конвейеризации шахты транспортирование угля от очистных забоев до околоствольного двора осуществляется разветвленными конвейерными линиями.

По выемочным штрекам обычно устанавливают конвейеры с шириной ленты 0,8 м, а по магистральным выработкам –

1,0 – 1,2 м, которые имеют постоянную скорость ленты и работают независимо от количества груза на ней. При их недогрузке расход электроэнергии на тонну перевезенного угля и пробег ленты увеличиваются.

В качестве тягового и несущего органа применяют ленты как с тросовым, так и тканевым каркасом. Тканевые ленты имеют линейную массу в 1,5 – 1,7 раза меньшую, чем тросовые. Ленты с тросовым каркасом конструктивно имеют один предел прочности на разрыв. Зачастую на горизонтальных конвейерах они имеют излишний запас прочности в 20 – 30 при норме 8 – 10.

К настоящему времени известны научные разработки о влиянии недогрузки ленты по ее приемной способности на расход электроэнергии конвейером, однако систематический анализ электропотребления ленточным конвейером отсутствует. Конвейеры часто работают с недогрузкой и вхолостую.

*Целью работы* является обоснование понятия КПД ленточного конвейера и оценка влияния его конструктивных и режимных параметров на удельные затраты энергии при транспортной работе.

Под конструктивными параметрами понимают линейные массы ленты и вращающихся частей роликов, а под режимными – скорость ленты и степень ее заполнения грузом. Количество груза на ленте при постоянном поступающем грузопотоке определяется скоростью ленты.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В установившемся движении двигатель конвейера преобразовывает электроэнергию в механическую энергию вращения его вала. Потери энергии в этом процессе оценивают стандартно с помощью КПД электродвигателя –  $\eta_{эл}$ . Механическая энергия вала двигателя трансформируется в энергию вращения приводного блока с помощью редуктора, энергетические потери на трение в котором оценивают КПД

редуктора –  $\eta_m$ , с выходным валом редуктора соединен приводной блок, который посредством фрикционного взаимодействия передает энергию поступательно движущейся ленте, замкнутой в непрерывный контур. Потери энергии от релаксационных процессов в ленте при ее изгибе на барабане и упругом скольжении на дуге обхвата оценивают с помощью КПД приводного барабана –  $\eta_b$ .

Лента несет на себе груз и, опираясь на ролики, вращает их. Понятие КПД ленточного конвейера в литературе отсутствует из-за неопределенности понятия «полезная работа» по причине того, что для горизонтального конвейера, если считать полезной работу подъема груза, то КПД равно нулю. Если же полезной считать работу сил трения, то КПД равно единице.

Загрузка конвейера полезным грузом оценивается линейной массой груза на ленте, которая может меняться от нуля до номинальной по приемной способности ленты

$$q = \frac{Q}{3,6v},$$

где  $q$  – линейная масса груза, кг/м;

$Q$  – производительность конвейера, т/ч;

$v$  – скорость ленты, м/с.

Этот параметр практически всегда меньше или равен номинальной приемной способности ленты, а работа конвейера перемежается с периодами его остановки. В этих условиях параметром адаптации конвейера к поступающему грузопотоку является скорость ленты. Меняя ее соответственно изменениям поступающего грузопотока можно поддерживать режим работы с номинальной загрузкой ленты грузом по ее приемной способности.

Если принять за «полезную работу» ленточного конвейера при любом угле его установки к горизонту –  $\beta$ , работу по горизонтальному перемещению и подъему груза, а «вредной» – работу сил по горизонтальному перемещению, подъему или опусканию несущего органа, а также вращению

роликоопор верхней и нижней ветвей, то в этом случае понятие КПД конвейера принимает вполне определенный смысл.

Энергия приводного блока конвейера расходуется на работу сил трения при горизонтальном перемещении полезного груза на длину  $l \cos \beta$  и его подъем на высоту  $l \sin \beta$ , а также на работу сил трения при движении «мертвых масс», которые представлены лентой и поддерживающими ее роликоопорами. На подъем и опускание ленты энергия не затрачивается, поскольку продольные составляющие «мертвых масс» холостой и рабочей ветвей наклонного конвейера всегда уравниваются.

Если привести действующие силы к поступательному движению ленты, то необходимая сила для перемещения полезного груза будет

$$F_z = q \cdot l \cdot g (w_2 \cos \beta + \sin \beta), \quad (1)$$

где  $l$  – длина конвейера, м;

$g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;

$w_2$  – интегральный коэффициент трения для груза;

$\beta$  – угол наклона конвейера к горизонту, град.

Угол подставляют со знаком: если транспортирование вверх, то знак «+», если вниз, то знак «-».

Сила, необходимая для перемещения ленты по замкнутому контуру

$$F_l = q_l \cdot 2 \cdot l \cdot g \cdot w_l \cdot \cos \beta, \quad (2)$$

где  $q_l$  – линейная масса ленты, кг/м;

$w_l$  – интегральный коэффициент трения для ленты.

Сила, необходимая для вращения опорных роликов лентой за счет их фрикционной связи, определяется следующим выражением

$$\eta_l = \frac{q(w_2 \cos \beta + \sin \beta)}{q(w_2 \cos \beta + \sin \beta) + 2q_l w_l \cos \beta + w_p(q_{pv} + q_{pn})}. \quad (6)$$

$$F_p = (q_{pv} + q_{pn}) \cdot l \cdot g \cdot w_p, \quad (3)$$

где  $q_{pv}$  и  $q_{pn}$  – приведенные к поступательному движению ленты линейные массы роликов верхней и нижней ветвей соответственно, кг/м;

$w_p$  – интегральный коэффициент трения для роликов.

Сумма трех составляющих (1) – (3) дает общую силу тяги на приводном блоке для выполнения работы ленточным конвейером

$$F_{H-C} = F_z + F_l + F_p,$$

где  $F_{H-C}$  – сила тяги приводного блока, кН.

Вся затраченная мощность на приводном блоке будет

$$N_0 = F_{H-C} \cdot v, \quad (4)$$

где  $N_0$  – затраченная мощность, кВт;

$v$  – скорость ленты, м/с.

Полезная мощность определяется выражением

$$N_n = F_z \cdot v. \quad (5)$$

Расход энергии на валу приводного блока, отнесенный к 1 т перевезенного груза

$$E_z = \frac{N_0}{Q},$$

где  $E_z$  – удельный расход энергии,

кВт·ч/т.

Удельный расход энергии на валу приводного блока, отнесенный к 1 т·км транспортной работы

$$E = \frac{(F_z + F_l + F_p)}{1000 \cdot Q \cdot l},$$

где  $E$  – удельный расход энергии при транспортной работе, кВт·ч/т·км;

$l$  – длина транспортирования, км.

Частное от деления выражения (5) на (4) дает аналитическое описание КПД перемещения груза на ленте

Из выражения (6) следует, что КПД конвейера определяется углом его наклона к горизонту –  $\beta$ , линейными массами груза –  $q$ , ленты –  $q_l$ , роликов –  $q_{рв}$ ,  $q_{рн}$  и интегральными коэффициентами трения –  $w_2$ ,  $w_l$ ,  $w_p$ .

В целом для конвейера коэффициент полезного действия можно определить с помощью

$$\eta = \eta_{эл} \cdot \eta_m \cdot \eta_б \cdot \eta_l,$$

где  $\eta_{эл} = 0,95 - 0,98$  – КПД электродвигателя;

$\eta_m = 0,95 - 0,98$  – КПД редуктора;

$\eta_б = 0,95 - 0,98$  – КПД приводного блока;

$\eta_l = 0,25 - 0,9$  – КПД транспортирования груза на ленте.

Зависимости КПД механизма перемещения груза на ленте от угла наклона конвейера к горизонту при различных сочетаниях его конструктивных и режимных параметров приведены на рис. 1. С увеличением угла наклона конвейера его КПД повышается с 0,3 – 0,58 при  $\beta = 0^\circ$  до 0,8 – 0,91 при  $\beta = 18^\circ$ . Это объясняется существенным увеличением энергии на полезную работу по подъему груза.

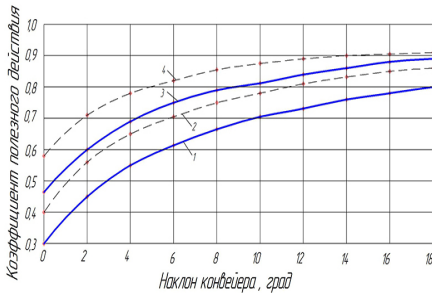


Рис. 1. КПД перемещения груза на ленте шириной 1 м: 1,3 – лента тросовая с  $q_n = 26$  кг/м; 2, 4 – лента тканевая с  $q_n = 15$  кг/м; 1,2 –  $q = 27,75$  кг/м; 3, 4 –  $q = 55,5$  кг/м; 1, 2 – ролики штатные; 3, 4 – ролики облегченные в 2,5 раза

Увеличение линейной массы груза на ленте  $q$  приводит к повышению КПД, т.к. соотношение ее с постоянными массами ленты  $q_l$  и вращающихся частей роликов  $q_{рв}$  и  $q_{рн}$  меняется в большую сторону.

Чем меньше линейная масса ленты, тем больше значение КПД. Лента с тросовым каркасом 2РТЛО-1500 имеет линейную массу в 1,7 раза большую, чем лента ПВХ-120 с тканевым каркасом.

Лента с тканевым каркасом позволяет повысить КПД на 25% при  $\beta = 0^\circ$  и на 8% при  $\beta = 18^\circ$  по сравнению с резинотросовой лентой.

При уменьшении количества груза на ленте в 2 раза КПД снижается на 20 – 25%. Снижение линейной массы вращающихся частей роликоопор в 2,5 раза ведет к увеличению КПД на 30 – 45 %.

Вторым направлением экономии энергии является адаптация конвейера к поступающему грузопотоку за счет изменения скорости ленты. Это позволяет использовать полностью приемную способность ленты и существенно уменьшить ее пробег.

Оценку энергоэффективности регулируемого привода следует выполнять в условиях меняющегося во времени грузопотока. Количественная оценка регулирования скорости ленты при изменении грузопотока от 0 до максимального значения выполнена для конвейера с шириной ленты 0,8 м.

Зависимости удельных затрат энергии привода на 1 т перевезенной горной массы для конвейера с постоянной скоростью ленты 1 и с переменной скоростью 2 приведены на рис. 2. При регулировании скорости по массе груза на ленте удельные затраты постоянны (кривая 2). В случае постоянной скорости ленты удельные затраты энергии существенно растут с уменьшением загрузки ленты горной массой (кривая 1).

С уменьшением полезной нагрузки затраты энергии на транспортирование с постоянной скоростью ленты растут по сравнению с регулируемой скоростью конвейера.

ера по массе груза на ленте. При половинной загрузке ленты по приемной способности у конвейера с регулируемой по массе груза скоростью ленты энергозатраты привода снижаются на 33%. Чем меньше загрузка ленты горной массой, тем больше выигрыш по затратам энергии привода с изменяющейся скоростью ленты.

Если поступающий на конвейер грузопоток представляет собой стационарный случайный процесс, то адаптировать конвейер по критерию  $q = \max$  проще всего изменением передаточного числа редуктора привода, которое определяет скорость ленты.

В случае нестационарности поступающего на конвейер грузопотока целесообразно применять асинхронный частотно регулируемый привод с задающим параметром  $q = \text{const}$ .

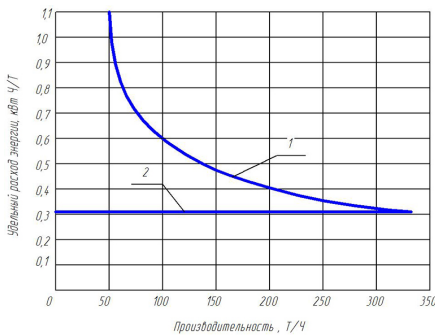


Рис. 2. Удельный расход энергии при изменении грузопотока: 1 –  $v = \text{const}, Q = \text{var}, q = \text{var}$ ; 2 –  $v = \text{var}, Q = \text{var}, q = \text{const}$

На горных предприятиях в одних и тех же условиях принимают ленты как с тканевым, так и с тросовым каркасом. Очевидно, что в определенных условиях работы конвейера, ленты с тканевым каркасом являются более эффективными.

Расчеты энергетической эффективности транспортирования, выполненные для конвейера Л100 с тканевой лентой ПВХ-120 и резинотросовой 2РТЛО-1500 с полной нагрузкой для различных углов наклона, приведены на рис. 3.

Конвейер с тканевой лентой имеет удельные затраты энергии на 0,026 кВт·ч/т·км меньше, чем с тросовой. Для горизонтальных конвейеров это составляет 20%. С уменьшением загрузки ленты грузом экономия энергии возрастает, т.к. изменяется соотношение между линейными массами ленты и груза.

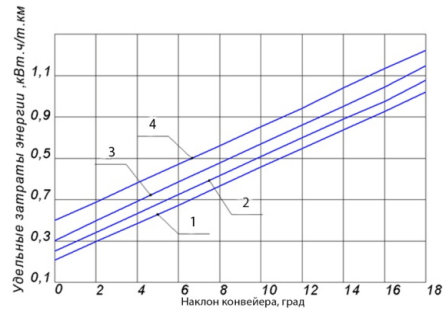


Рис. 3. Удельные энергозатраты в функции угла наклона конвейера для разной линейной массы ленты: 1, 3 – лента тканевая ПВХ; 2, 4 – лента тросовая 2 РТЛО-1500; 1, 2 –  $q = 55,5 \text{ кг/м}$ ; 3, 4 –  $q = 27,75 \text{ кг/м}$

При увеличении угла наклона конвейера абсолютное значение уменьшения удельных затрат энергии сохраняется. Относительная экономия снижается до 4% на предельном уклоне в 18°. Это объясняется тем, что увеличиваются существенно затраты энергии на подъем груза.

Областью применения лент с тканевым каркасом следует считать горизонтальные и слабонаклонные конвейеры. Эти ленты могут быть изготовлены с числом прокладок каркаса от 2-х до 6-ти, что существенно повышает их нагрузочную адаптивность к условиям работы.

Ленты с тросовым каркасом имеют один предел прочности. Их следует применять на крутонаклонных конвейерах, где прочностные характеристики ленты имеют первостепенное значение.

Движение ленты и роликов является обеспечивающим условием перемещения полезного груза. Чем меньше энергии будет затрачиваться конвейером на вращение

масс роликов по отношению к перемещению полезного груза, тем выше будет его энергетическое совершенство. Затраты энергии на преодоление сил трения вращения роликов не зависят от угла наклона конвейера, т.к. сила тяжести вращающейся части ролика при любом угле наклона конвейера к горизонту всегда проходит через центр вращения ролика.

Суммарная масса вращающихся частей роликов определяется с одной стороны металлоемкостью ролика, а с другой – количеством роликов на трассе транспортирования. Если литые боковины ролика, в которых установлены подшипники и их уплотнения, заменить штампованными из листа толщиной 3 – 4 мм или прессованными из полимера, то масса его вращающейся части может быть уменьшена в 1,5 – 2,5 раза.

При проектировании конвейера шаг расстановки роликов по его длине принимают постоянным. Определяют его для участка ленты с минимальным натяжением по допустимой стреле провеса ленты, которая составляет 2,5% от расстояния между опорами. Очевидно, что по длине конвейера натяжение ленты увеличивается и при постоянном шаге расстановки роликов стрела провеса с увеличением натяжения ленты будет уменьшаться.

Если принять за основу постоянное значение стрелы провеса ленты между роликами, то шаг их установки будет расти в зависимости от натяжения ленты. В этом случае понадобится меньшее количество поддерживающих роликов, и общая масса их вращающихся частей может быть уменьшена. Шаг роликоопор в функции натяжения ленты определяется выражением

$$l_p = 0,02F(q + q_n),$$

где  $l_p$  – шаг роликоопор, м;

$F$  – натяжение ленты в месте установки опоры, Н.

Для определения общей массы вращающихся частей роликов, начиная с точки минимального натяжения, последовательно по ходу движения определяют шаг установ-

ки каждой опоры и натяжение ленты в точке ее установки. Суммируя в цикле значения натяжения ленты и расстояния между роликами, получают диаграмму натяжения ленты в функции длины конвейера.

Расчеты энергоэффективности транспортирования, выполненные для конвейера Л100 с тканевой лентой ПВХ-120 и резинотросовой 2РТЛО-1500 для углов наклона от 0 до 18° со штатными роликами и облегченными в 1,5 раза на холостой и в 2,5 раза на грузовой ветвях, приведены на рис. 4.

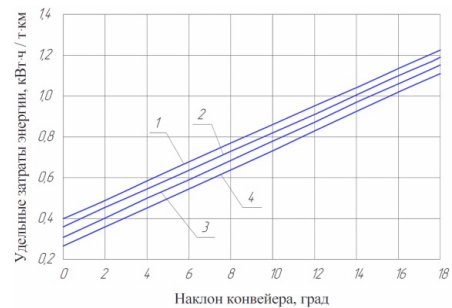


Рис. 4. Удельные энергозатраты конвейера Л100 с различной массой вращающихся частей роликов в функции угла наклона конвейера: 1, 2 – лента тросовая 2РТЛО-1500; 3, 4 – лента тканевая ПВХ-120; 1, 3 – ролики штатные; 2, 4 – ролики облегченные; линейная масса груза на ленте  $q = 27,75$  кг/м

Конвейер с облегченными роликами имеет удельные затраты энергии на 0,04 – 0,05 кВт·ч/т·км меньше чем со штатными роликами. Для горизонтальных конвейеров выигрыш составляет 10% для конвейера с тросовой лентой и 16% – с резинотканевой лентой.

При увеличении угла наклона конвейера абсолютное значение уменьшения энергозатрат сохраняется, однако из-за того, что существенно растут затраты энергии на подъем груза, а на вращение роликов остаются неизменными, относительные затраты энергии на предельном уклоне в 18° снижаются до 3,15% для тросовой ленты и до 5,5% для ленты с тканевым каркасом.

На длине конвейера Л 100 в 1500 м по нормативам изготовителя устанавливают

1000 трехроликовых опор грузовой ветви и 500 однороликовых опор холостой ветви, общая масса вращающихся частей которых составляет соответственно 23000 и 8500 кг. Если устанавливать опоры по условию допустимого провеса ленты между опорными роликами в 2,5%, т.е. с переменным шагом в функций натяжения ленты, то их число и общую массу вращающихся частей можно уменьшить на грузовой ветви в 5,5 – 6,8 раза, а на холостой ветви в 2,5 – 4,3 раза. Такое решение может дать дополнительную экономию энергии на горизонтальном конвейере в зависимости от линейной массы полезного груза для ленты ПВХ-120 в 16 – 21%, а для ленты 2РТЛЮ-1500 в 12 – 16%. Кроме того, соответственно снижается металлоемкость поддерживающих ленту конструкций. Возможности снижения энергозатрат путем расстановки опорных роликов с переменным шагом в функции натяжения ленты целесообразно реализовывать на стадии проектирования транспортной системы для конкретных условий горного производства.

## ВЫВОДЫ

Обосновано понятие КПД ленточного конвейера, что позволяет оценить его энергетическое совершенство в сопоставлении с другими транспортными машинами в различных условиях работы.

Показано, что масса ленты существенно влияет на удельный энергетический показатель транспортной работы. На горизонтальных конвейерах следует применять ленты с тканевым каркасом, т.к. они имеют линейную массу в 1,7 раза меньшую по

сравнению с резинокроссовыми лентами той же ширины.

При переменном грузопотоке целесообразно применять привод конвейера с регулируемой скоростью ленты по массе груза на ней. Это обеспечит загрузку ленты грузом по приемной способности, уменьшит ее пробег и снизит удельные затраты энергии на транспортирование.

Уменьшение масс вращающихся частей роликоопор может дать снижение энергозатрат при транспортировании груза на 10 – 16%. На стадии проектирования и изготовления конвейера это можно реализовать путем замены литых боковин ролика штампованными из листа или прессованными из полимера.

В конкретных условиях эксплуатации можно дополнительно уменьшить массу вращающихся частей роликов за счет переменного шага их расстановки по трассе. Его определяют в функции натяжения ленты при нормативе ее провеса между опорами в 2,5%. Это дополнительно снизит удельные затраты энергии на 12 – 21%.

Энергосбережение при транспортировании ленточным конвейером сыпучего груза можно обеспечить как на стадиях проектирования и производства ленточного конвейера путем разработки его конструкции с максимальным КПД, так и на стадии его эксплуатации за счет выбора конструктивных и режимных параметров.

Если использовать в комплексе все рассмотренные пути снижения затрат энергии на транспортную работу конвейера, то удельный показатель энергозатрат можно уменьшить с 0,9 – 1,2 до 0,6 – 0,8 кВт·ч/т·км, т.е. на 33%.



## ОБ АВТОРАХ

*Тарасов Виктор Иванович – к.т.н., доцент кафедры горной механики Национального горного университета.*

