

УДК 621.867.2

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЛЕНТОЧНЫХ КОНВЕЙЕРОВ

О.Л. МИРАНОВИЧ, С.Н. КОЛДАЕВА

(Солигорский Институт проблем ресурсосбережения с Опытным производством)

Исследованы ленточные конвейеры как высокопроизводительные транспортные машины. Установлено, что динамические нагрузки на роликкоопору зависят от скорости движения и натяжения ленты, формы кусков и состава груза, расположения груза на ленте, бокового смещения ленты, динамической неуравновешенности, радиального биения роликов и других факторов

Основным направлением развития горной промышленности предусматривается создание высокопроизводительных транспортных машин. Одним из наиболее прогрессивных видов транспорта, обеспечивающих высокую производительность и технико-экономическую эффективность при больших грузопотоках, является конвейер. В современном массовом и крупносерийном производстве конвейеры – неотъемлемая часть технологического процесса. Они регулируют темп производства, обеспечивают его ритмичность, способствуют повышению производительности труда и увеличению выпуска продукции, позволяют решать вопросы комплексной механизации и автоматизации транспортно-технологических процессов. Непосредственная связь конвейерных машин с общим технологическим процессом производства предъявляет к ним особые требования в отношении прочности и способности работать в автоматических режимах.

Производительность ленточных конвейеров при скорости движения 5...8 м/с и ширине ленты 2400...3000 мм может быть доведена до 20000...25000 т/ч. Длина отдельных горизонтальных конвейеров с высокопрочными лентами составляет 5...10 км.

Область применения ленточных конвейеров может быть разносторонняя, зависящая от вида и свойств транспортируемых грузов. В зависимости от наименования груза может быть подобран ленточный конвейер, транспортируемый различные грузы, отличающиеся по массе и размеру кусков (табл. 1, 2).

Таблица 1

Применение ленточных конвейеров для транспортировки насыпных грузов
(вид груза – кусковой)

Наименование груза	Размер кусков, мм
Крупнокусковой	160...500
Среднекусковой	60...160
Мелкокусковой	10...60
Порошкообразный	0,05...0,5
Пылевидный	0,05

Таблица 2

Применение ленточных конвейеров для транспортировки штучных грузов

Группа груза	Масса, кг
Легкие	до 15
Средние	15...50
Тяжелые	50...200

Влияние крупности кусков на величину динамической нагрузки подтверждено многочисленными экспериментами. Во всех существующих методиках выбора роликов кусковатость является одним из определяющих факторов.

Экспериментальные исследования шахтных ленточных конвейеров и анализ таблиц 1 и 2 показывает, что большинство ленточных конвейеров транспортируют породу, размеры кусков которой превышают 200 мм, а иногда и 500 мм. Распределение по кусковатости транспортируемого материала для подземных разработок показывает, что преобладающими являются куски породы с размерами от 200 до 500 мм, что составляет соответственно 60 и 72 % от общей транспортируемой массы.

Большой вклад в исследование динамических нагрузок на ролики ленточных конвейеров внесли авторы А.О. Спиваковский, Н.С. Поляков, А.Э. Андреев, М.В. Васильев, Л.М. Алотин, В.С. Бондарев, В.Г. Дмитриев Л.Г. Шахмейстер, Е.В. Новиков, В.К. Дьячков, Л.Н. Колобов, Г.В. Приседский и другие.

Так, например, работы В.С. Бондарева, Л.Н. Колобова, Л.М. Алотина [1, 2, 7 – 9] посвящены определению величин максимальных нагрузок, при которых происходит повреждение или пробой ленты, а также установлению амортизирующей способности ленты при транспортировании крупнокусковых грузов ленточными конвейерами с роликовыми опорами различных типов. Большое внимание уделено методам определения контактных усилий при взаимодействии транспортируемого груза с лентой и роликом.

Используя положения теории Герца для описания процессов соударения и экспериментальную зависимость приложенной силы от глубины местного сжатия контактирующих тел при статическом нагружении, автор получил формулы для определения величины контактной силы P_g и глубины внедрения α :

$$P_g = \beta \alpha^3 + b \alpha, \quad (1)$$

$$\alpha = \sqrt{\frac{-0,5b \pm \sqrt{0,25b^2 + 10\beta \frac{mv_y^2}{2}}}{0,5\beta}}, \quad (2)$$

где v_y – скорость удара груза о ролик; m – приведенная масса роликовой опоры; b, β – экспериментально определяемые коэффициенты, зависящие от упругих свойств ленты и формы падающего штампа.

С помощью полученных зависимостей (1) и (2) проведены расчеты нагрузок в опорах загруженной линейной части ленточного конвейера, оборудованного шарнирными и гибкими роликоопорами. Показано, что при транспортировании крупнокусковых грузов роликовые опоры линейных секций воспринимают значительные динамические усилия, вызванные тем, что в момент наезда на опору скорости куска и ленты имеют различные направления. В этих работах Бондарева приведены графики зависимости силы удара от скорости и натяжения ленты. Отмечено, что повышение натяжения в ленте уменьшает динамические нагрузки. Определена точка соударения крупного куска груза с роликом через ленту по рассчитанной кривой прогиба ленты от распределенной, сосредоточенной и центробежной нагрузок. Производительность конвейера рекомендуется находить из теоретически определенной скорости движения, при которой отсутствует повреждение ленты. Установлено, что ударная прочность ленты не зависит от натяжения.

Для определения силы удара куска груза по рядовой роликовой опоре с канатным ставом рассмотрен вопрос о соударении шаровой массы m_1 с телом массы m_2 , равной массе ролика, установленным на упругом основании, имевшем идентичную с роликоопорой жесткость c . Без учета упруговязких параметров конвейерной ленты, через которую на практике передается нагрузка на ролик, получена зависимость силы удара от угла встречи γ и скорости движения v в виде:

$$P_g = \left(\frac{m_1 v^2 \sin \gamma \cdot c}{1 + \frac{m_2}{m_1}} \right)^{\frac{1}{2}}.$$

Динамические нагрузки на ленту и жесткие роликоопоры в пункте погрузки и на линейной части определены по формулам (1) и (2). Для различных типов лент экспериментально найдены коэффициенты b и β . Разработана методика определения напряженного состояния сечений конвейерной ленты, нагруженной крупнокусковым грузом. В расчетах лента рассматривалась как гибкий брус малой жесткости.

Даются ориентировочные рекомендации по выбору типов роликовых опор и ставов при перемещении крупнокусковых грузов. Нагрузки на ленту и ролики рассчитываются по вышеупомянутым зависимостям (1) и (2). Определены параметры линейной секции, приводятся данные экспериментальных исследований динамических нагрузок на ролики в пунктах загрузки и линейных секциях. Так, при ширине ленты 1,2 м, натяжении 15 кН, расстоянии между опорами 1 м и скорости 2 м/с коэффициент динамичности для жесткой роликовой опоры был равен 6, а для гибкой на жестком ставе 4. Экспериментально доказано, что применение гибких роликовых опор способствует уменьшению ударных нагрузок на ролики в 1,5...2,7 раза по сравнению с жесткой опорой.

Экспериментальные исследования ленточных конвейеров с канатным ставом и подвесными роликоопорами линейных секций, транспортирующих вскрышную породу, проведены немецкими учеными. Отмечено, что при наличии в основной мягкой массе тяжелых крупных включений в виде валунов округлой формы, ролики опор воспринимают динамические нагрузки, величины которых на порядок больше веса самых крупных кусков. Экспериментально установлено влияние скорости движения и натяжения в ленте на динамические нагрузки в роликах опор. Дан теоретический анализ этих нагрузок, ре-

зультаты которого аналогичны выводам, сделанным В.С. Бондаревым.

Работы В.Г. Дмитриева посвящены исследованию ленточных конвейеров с подвесными роликоопорами при транспортировке крупнокусковых пород. В ней автором обосновывается необходимость рассматривать нагрузки на опору как результат воздействия не единичного груза, а непрерывного грузопотока со случайными характеристиками. Разработаны основы корреляционной теории для решения динамических задач, связанных с процессами перемещения грузов ленточными конвейерами. Экспериментальные исследования динамических нагрузок от потока скального груза в местах загрузки и на ставе показали, что нагрузки являются случайными воздействиями и могут быть описаны как случайные процессы с определенными статистическими характеристиками: математическим ожиданием $F(t)$, корреляционной функцией $R_F(\tau)$ и нормированной корреляционной функцией вида:

$$R'_n(\tau) = e^{-\alpha|\tau|} \quad (3)$$

или в некоторых случаях

$$R'_n(\tau) = e^{-\alpha'|\tau|} \cos \beta' \nu \tau. \quad (4)$$

Приводится решение динамической контактной задачи для случая соударения тела с осевой симметрией и плоскости. Получены характеристики для определения наиболее рациональных футеровок роликов. Подчеркивается, что увеличение натяжения ленты способствует уменьшению стоимости транспортирования. Дан практический пример расчета амортизаторов подвесных роликовых опор, установленных в пунктах загрузки. Сделаны рекомендации по выбору типа и конструкции роликовых опор для загрузочного устройства. Показано, что наличие подсыпки из мелкокусковой фракции уменьшает величину динамической ударной нагрузки.

Осуществлен энергетический анализ процесса соударения падающего груза через ленту с роликом. В результате получена экспериментальная зависимость для силы удара F :

$$F = 0,816\sqrt{m}c\nu_T e^{-0,11\nu_s + 0,00785\nu_s^2},$$

где m – масса падающего куска породы; c – жесткость системы, воспринимающей подводимую энергию; ν_T – конечная скорость свободного падения тела; ν_s – скорость движения ленты. При определении величины c учтены жесткости ленты и обечайки ролика.

Исследована выносливость конвейерных лент при динамических нагрузках в пунктах погрузки. В ней приводятся эмпирические зависимости силы удара от формы куска. Определены коэффициенты ударостойкости, по которым подбирается подходящая лента. Отмечается, что сила удара по жестко установленной опоре примерно в 5 раз больше силы удара между роликоопорами при одинаковой энергии падающего груза.

Экспериментальные исследования нагрузок на ленту, жесткие и подвесные шарнирные роликоопоры выполнены в институте Горного машиностроения Фрейбергской горной академии. Было установлено, что использование подвесных шарнирных роликовых опор при транспортировании крупнокусковых грузов позволяет снизить динамические нагрузки на ролики как в месте погрузки, так и на линейных секциях ства конвейера. Существенное влияние на величину нагрузки оказывает масса подвесной опоры. Поскольку в ударе участвует приведенная масса M , равная

$$M = \frac{M_1 M_2}{M_1 + M_2},$$

где M_1 – масса груза; M_2 – масса подвесной роликовой опоры, то при уменьшении M_2 уменьшаются нагрузки на ролики и ленту.

Автором этой работы подчеркивается, что при транспортировании крупнокусковых грузов в элементах линейных секций ленточного конвейера возникают дополнительные динамические нагрузки, которые могут быть определены только экспериментальным путем, так как постоянно меняющийся по характеристикам грузопоток приводит к появлению переменных нагрузок.

Результаты экспериментов показали, что динамическая сила F , действующая на роликоопору, зависит от натяжения ленты S , приведенной массы M и скорости ленты ν :

$$F \approx \frac{M\nu^2}{S}.$$

Установлено, что при перемещении крупнокусковых грузов на конвейере с жесткими опорами скорость ленты не может превышать 7 м/с, так как в этом случае начинается интенсивная деформация груза, а отдельные крупные куски отрываются от ленты, что приводит к появлению значительных дина-

мических нагрузок на ленту и ролики, а также к возможности схода груза с ленты конвейера.

Определены нагрузки на ролики при транспортировании тяжелых единичных грузов. Получена экспериментальная зависимость силы удара от скорости движения ленты, установлено влияние формы груза и диаметра опорных роликов на величину динамических усилий. Показано, что вертикальная составляющая примерно на порядок больше горизонтальной составляющей нагрузки.

Изучением влияния формы единичных грузов на величину динамических усилий занимались немецкие ученые. При скорости движения ленты $v_d = 1...6$ м/с и натяжении $S = (0,8...0,2)S_{разр}$ измерялись динамические нагрузки при транспортировании мерных бетонных грузов в форме шара, прямоугольного бруса и эллипсоида, причем для последнего зарегистрированы наибольшие усилия.

Приведены результаты экспериментальных исследований различных типов роликовых опор при транспортировании скальной породы. Сделан вывод о том, что жесткие роликовые опоры непригодны для транспортирования скальных грузов со скоростями более 2 м/с.

Описаны результаты экспериментального моделирования транспортировки единичных крупных кусков. Определены динамические нагрузки на роликовую опору в зависимости от массы груза, скорости движения ленты $v_d = 0,6...3,8$ м/с и шага установки роликовых опор $l_p = 0,8...2,25$ м. Отмечен отрыв груза от ленты при движении над опорой.

Для расчета динамических усилий предложена формула:

$$P = \left[\frac{(n+1)mv_c^2}{2K} \right]^{\frac{n}{n+1}} c^{\frac{1}{n+1}}, \quad (5)$$

где m – масса груза; v_c – скорость соударения; c – коэффициент жесткости системы; n – коэффициент нелинейности; K – коэффициент поглощения энергии.

По результатам экспериментальных исследований сделаны выводы по ограничению размеров кусков и скорости движения ленты для конвейеров с жестким и канатным ставом.

Исследованию опорных элементов ленточных конвейеров транспортирующих крупнокусковые грузы посвящена работа А.В. Ковалея. Автором подчеркивается, что при определенных «критических» скоростях движения ленты происходит отрыв крупных кусков от ленты и появляется опасность их скатывания. Такие режимы работы конвейера возможны, когда уровень динамических нагрузок в два раза больше статических, т.е. коэффициент динамичности $K_g = 2$. Механизм формирования динамической нагрузки объясняется тем, что при подходе куска груза к ролику передаваемое лентой давление распределено равномерно по длине ролика l_p , а при прохождении грузом опоры, начиная с некоторого расстояния Δ , по малой площади. Для жесткой роликоопоры выведено выражение для коэффициента динамичности:

$$K_g = 1 + \frac{V_d^2 l_p}{12g\Delta^2} \cdot \frac{P_{сп}}{\alpha EI},$$

где α – коэффициент, учитывающий замену ролика балкой с жесткостью EI .

Для подвесных роликовых опор получено аналогичное выражение, но с учетом податливости опоры. Скорость движения ленты рекомендовано ограничивать так, чтобы коэффициент динамичности K_g был меньше двух. Экспериментальные исследования проводились на жестких и подвесных роликовых опорах конструкции украинских ученых. Материал с включениями крупных кусков массой 25, 40, 60 кг размещался на участке ленты длиной 1,5...2 м и транспортировался со скоростями не более 3,15 м/с при натяжении до 15 кН. Отмечалось подпрыгивание кусков на высоту до 200...300 мм и полет на расстояние 300...500 мм от опоры. Указано, что наблюдаемый разброс величин динамических нагрузок есть следствие стохастичности процесса. Подчеркивалась зависимость величины K_g от фракционного состава груза. По экспериментальным данным вертикальная составляющая нагрузки на порядок больше горизонтальной. Установлено, что на средний ролик действует 80 % всей нагрузки. До определения гранулометрического состава материала сделаны фотопланограммы распределения груза по кусковатости.

Исследованы загрузочные устройства для ленточных конвейеров, транспортирующих скальные грузы. Динамические воздействия от грузопотока на криволинейный лоток, установленный на упругих опорах, рассматривались как стационарный случайный процесс с корреляционной функцией вида (3) и (4).

Динамические нагрузки на подвесные и жесткие роликоопоры от единичного груза исследованы В.И. Галкиным [11]. Установлено, что поперечные колебания груза в пролете между опорами влияют на величину динамических нагрузок на роликоопоры линейных секций. Из уравнения Лагранжа 2-го рода получено дифференциальное уравнение движения куска груза совместно с лентой в пролете между опорами:

$$\ddot{x} + \omega^2(y)x = 0, \tag{6}$$

где x и y – соответственно, вертикальная и горизонтальная координаты; $\omega(y)$ – частота собственных колебаний груза, при движении в пролете между опорами, равная

$$\omega^2(y) = \frac{1}{Ml_p} \left[\frac{S_{нат} l'_p}{y(l'_p - y)} + E_\lambda F_\lambda \left(\frac{x_{max}}{0,5l'_p} \right)^2 \right].$$

В результате решения уравнения (6) при аппроксимации частоты собственных колебаний $\omega(y)$ ступенчатой функцией получены выражения для определения угла встречи груза с роликом и величины контактного динамического усилия. Экспериментально исследовано влияние натяжения и скорости ленты, шага установки роликовых опор на величину динамической нагрузки. Установлены границы применения различных типов роликовых опор в зависимости от вышеперечисленных факторов. Рассмотрен ряд вопросов, касающихся работы загрузочного участка ленточных конвейеров.

Изучению процесса соударения единичного груза с жесткой роликовой опорой с учетом упруго-вязких свойств ленты посвящена работа Б.Д. Семенова. Для описания колебательного движения груза в пролете между опорами из физических соображений составлено дифференциальное уравнение с переменными коэффициентами:

$$\ddot{z} + 2n(t)\dot{z} + P^2(t)z = 0, \tag{7}$$

где $n(t) = \frac{\delta}{2\pi} P(t)$;

$$P(t) = \sqrt{\frac{g}{\Phi_1 v^2 [0,25t_p^2 - (t - 0,5t_p)^2]}}, \tag{8}$$

где δ – логарифмический декремент колебаний; v – скорость движения ленты; t_p – время, за которое груз,двигающийся со скоростью v , проходит расстояние между опорами l_p ;

$$\Phi_1 = \frac{2G + gl_p}{2Sl_p}.$$

Здесь G – вес единичного груза; S – натяжение ленты; g – ускорение свободного падения; q – погонный вес ленты.

Решение этого уравнения позволило найти параметры наезда груза на опору: скорость удара и место встречи груза с роликом. Контактная динамическая нагрузка определялась по формуле:

$$P_q = K_i \left(K_v \frac{mv_{on}^2}{2} \right)^{n_i}, \tag{9}$$

где K_i и n_i – коэффициенты, учитывающие геометрические характеристики и физические свойства соударяемых тел; K_v – коэффициент, зависящий от скорости движения ленты и угла встречи груза с роликом; v_{on} – вертикальная составляющая скорости удара, определяемая из уравнения (7).

Результатом исследований явилась разработка уточненной методики расчета нагрузки на подшипниковые узлы роликовых опор ленточных конвейеров при транспортировании сыпучих материалов с отдельными включениями крупных кусков, а также создание методики определения упруго-вязких параметров конвейерных лент. Проведены эксперименты по установлению траекторий движения единичного груза, упруго-вязких параметров лент и величин динамических нагрузок.

В связи с разрушающим воздействием крупных кусков при расчете пунктов загрузки и линейной части предлагается учитывать следующие условия:

- энергия взаимодействия куска груза с роликом опоры загрузочного устройства не должна превышать 600 Дж;
- скорость транспортирования крупных кусков ленточными конвейерами не должна превышать скорости, приводящей к отрыву кусков груза от ленты и скатыванию с конвейера;
- интервал прохождения крупных кусков должен выбираться так, чтобы не возникал максимальный суммарный импульс, что возможно при расстоянии между кусками $l_{cp} = (1...2)l_p$.

Динамические нагрузки в основном возникают из-за локального прогиба в районе контакта куска груза с лентой. Поэтому процесс взаимодействия единичного груза и роликоопоры рассматривается как соударение движущегося по кривой, заданной конфигурацией местного прогиба, куска груза с роликом.

Представлены результаты испытаний различных типов роликовых опор. Скорость несущей ленты шириной 1200 мм варьировалась в пределах 1,5...3,6 м/с. Скальный груз имел крупность до 500 мм, масса крупных кусков достигала 70 кг. Исследования позволили выявить характер и динамику взаимодействия груза с роликоопорами. Средние значения динамических нагрузок на роликоопоры при транспортировании кусков крупностью 400 мм, массой 30...55 кг представлены в таблице 3. С увеличением массы куска груза динамическая нагрузка возрастает, но неодинаково для различных типов роликоопор.

Таблица 3

Динамические нагрузки на роликоопору при транспортировании крупнокусковых грузов

Тип роликоопоры	Нагрузка на роликоопоры при скоростях движения ленты (м/с) кН			
	2,0	2,5	3,0	3,5
Жесткая трехроликовая	10,0	10,5	12,5	16,0
Гирляндная трехроликовая	9,5	9,5	10,5	12,5
Податливая трехроликовая	6,3	6,6	7,9	10,2
Гирляндная пятироликовая	7,9	7,9	8,3	10,0

В Германии на карьере Профер на двух конвейерах были проведены измерения нагрузок, действующих на подшипниковые узлы гирляндных роликоопор. Анализ полученных осциллограмм показал периодическое увеличение нагрузок с частотой, соответствующей скорости вращения роликов. В результате исследований установлено, что динамические нагрузки на роликоопору зависят от скорости движения и натяжения ленты, формы кусков и состава груза, расположения груза на ленте, бокового смещения ленты, динамической неуравновешенности, радиального биения роликов и других факторов.

Таким образом, при транспортировании кусковых грузов роликовые опоры ленточных конвейеров, установленные в местах загрузки и на линейной части, воспринимают значительные динамические нагрузки, зависящие от параметров конвейера: скорости и натяжения ленты, расстояния между роликовыми опорами; упруговязких свойств ленты, гранулометрического состава и физических свойств перемещаемого материала.

ЛИТЕРАТУРА

1. Алотин Л.М., Мерцалов Р.В., Жеребцов В.М. Исследование грузопотоков из комплексных механизированных лав // Труды КНИУИ. – М.: Недра, 1970. – Вып. 35. – С. 116 – 120.
2. Алотин Л.М., Степанов П.Б. Моделирование и расчет транспортных систем горных предприятий. – Алма-Ата: Наука, 1979. – 216 с.
3. Бабаков И.М. Теория колебаний. – М.: Гостехиздат, 1958. – 628 с.
4. Бар И. Ленточные конвейеры с подвесными шарнирными роликоопорами // Транспорт шахт и карьеров. – М.: Недра, 1971. – С. 328 – 337.
5. Барабанов В.Я. Исследование основных элементов ленточных конвейеров для перемещения крупнокусковых горных пород: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – М., 1965. – 22 с.
6. Барон Л.И. Кусковатость и методы ее измерения. – М.: Изд-во АН СССР, 1960. – 124 с.
7. Бондарев В.С. Исследования воздействия динамических нагрузок на ленту и роликоопоры конвейера при транспортировке крупнокусковых грузов: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – М., 1963. – 24 с.
8. Бондарев В.С. Ударные нагрузки на ленту и роликовые опоры при транспортировании тяжелых крупнокусковых грузов // Горные машины и автоматика. – 1964. – № 47. – С. 33 – 36.
9. Бондарев В.С. Особенности расчета линейной части наклонных ленточных конвейеров с подвесными роликоопорами // Горнотранспортное оборудование карьеров. – К.: Техника, 1971. – С. 103 – 109.
10. Волотковский В.С., Кармаев Г.Д., Соболев А.В. Эффективность работы различных роликоопор на ленточных конвейерах при транспортировании скальной горной массы // Горный журнал. – 1978. – № 8. – С. 51 – 53.
11. Галкин В.И. Исследование динамических нагрузок и выбор конструктивных параметров роликоопор шахтных ленточных конвейеров: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – М., 1975. – 24 с.