

Для визуализации движения машины необходимо обеспечить введение ряда дополнительных параметров, обеспечивающих представление на экране графической информации. В первую очередь для обеспечения рисования элементов движителя на экране необходимо использование специальных "компонентов". В терминологии языков программирования компонентами называются поставляемые вместе со средой программирования библиотеки с визуальными элементами, обладающие определенными свойствами. Для обеспечения рисования элементов на экране мы предлагаем использовать компонент, поставляемый со средой Borland Delphi, именуемый "TImage". Этот компонент обладает свойствами, аналогичными свойствам известного редактора, входящего в стандартный набор Windows – "Paint". Теоретически, многие компоненты Borland Delphi имеют в библиотеках методов методы, предназначенные для рисования на экране, однако компонент "TImage" обладает, методами, позволяющими сохранить изображения в файл для дальнейшего анализа. Использование данного компонента несет в себе некоторые сложности, такие как фиксированный размер поля для рисования в виде ограничения поля по ширине и высоте в зависимости от размеров экрана и его разрешения. Еще одной из сложностей является несоответствие вертикальных осей декартовой системы координат, т.к. в данном компоненте, как впрочем и в других, отсчет от начала координат ведется сверху вниз.

УДК 621.867.2

**Прушак В.Я., Миранович О.Л.**

## ДЕЙСТВИЕ НАГРУЗКИ В СОЕДИНЕНИЯХ КОНВЕЙЕРНОЙ ЛЕНТЫ

### Введение

Проектируемые конвейеры должны быть достаточно прочными, надежными, долговечными и экономичными в эксплуатации, а изготовление их следует осуществлять с наименьшими затратами материалов и труда. Это требует проведения всесторонних теоретических и экспериментальных исследований и на базе их результатов – дальнейшего совершенствования конвейеров.

Как известно, основой конвейера является бесконечная вертикально замкнутая гибкая лента. В зависимости от типа роликкоопор лента может иметь плоскую или желобчатую форму. Верхняя рабочая и нижняя холостая ветви ленты поддерживаются роликкоопорами. Поступательное движение ленте конвейера сообщает приводной барабан, приводимый во вращение электродвигателем через редуктор. Постоянное натяжение ленты обеспечивается натяжным устройством. Груз поступает на ленту через загрузочное устройство, а разгружается через воронку приводного барабана либо в любом пункте вдоль конвейера, посредством разгрузочных устройств.

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 гори-

### Заключение

Несмотря на описанные проблемы, нам кажется, что поставленная задача вполне разрешима с помощью применения алгоритмов, позволяющих привести в соответствие оси координат и масштабные изображения реальности и экрана.

После создания программного продукта, обеспечивающего реализацию поставленной задачи, возможно его использование в системе автоматизированного проектирования гусеничных движителей. После подтверждения адекватности решений, полученных с использованием пакета программ, возможно проведение оптимизации основных параметров гусеничного движителя с использованием теории планирования эксперимента.

Объединение полученной модели с моделями двигателя, гидротрансформатора (сцепления), трансмиссии, микропрофиля опорной поверхности, рабочего оборудования сделает возможным проведение выбора основных параметров машины с использованием критериев скоростей, ускорений, плавности хода и т.д.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Лесковец И.В. Математическая модель гусеничного движителя СДМ // Вестник Могилевского государственного технического университета. – Могилев, № 2, 2003 – С. 83-87.

зонтальных конвейеров с высокопрочными лентами составляет 5...10 км. В связи с этим исследование распределения нагрузки в стыковом соединении конвейерной ленты определяет важное теоретическое и практическое значение.

### Аналитические исследования

Рассмотрим стыковое соединение конвейерной ленты при равномерном распределении натяжения по ширине ленты. В данном случае скобы одного поперечного ряда нагружены одинаково. Поэтому определим, как распределены усилия между рядами скоб на линейной части конвейера. Анализируя работу данного соединения, необходимо отметить, что под действием сил растяжения  $P$  происходит относительное микросмещение стыкуемых концов 1 и 2 ленты за счет податливости скоб 3, деформации обкладок конца ленты 1, за счет относительного проскальзывания поверхностей стыкуемых концов. Расчетная модель стыкового соединения, допускающая микросмещения стыкуемых концов ленты, приведена на рис. 1. Концы 1 и 2 ленты рассмотрим как стержни малой толщины с жесткостью, равной жесткости ленты. Поскольку смещения верхней и нижней частей конца 2 ленты одинаковы (рис. 2), то конец 2 можно рассматривать как единый стержень. Ряды скоб

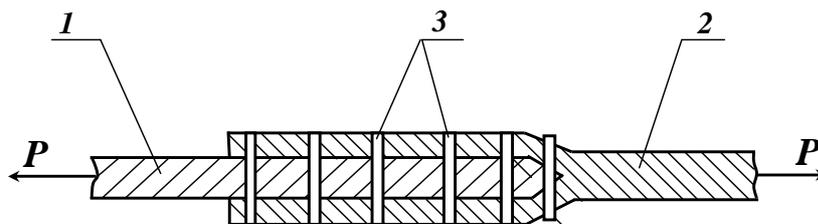


Рис. 1. Многорядное механическое соединение

**Миранович О.Л., Прушак В.Я.,** Солигорский Институт проблем ресурсосбережения с Опытным производством. Беларусь, СИПР с ОП, 223710, Минская область, г. Солигорск, ул. Козлова, 69.

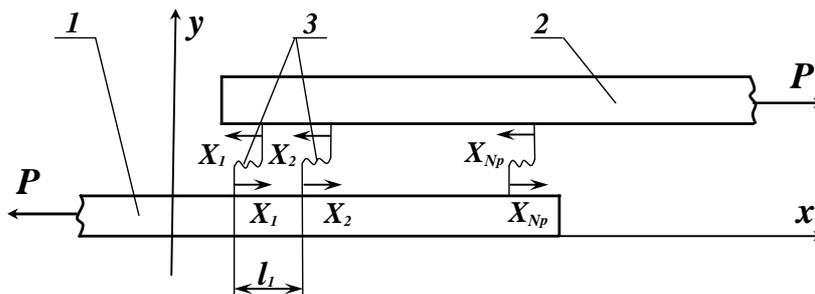


Рис. 2. Расчетная схема многорядного механического соединения

заменим упругими элементами 3, соединяющими концы 1 и 2 ленты. Жесткость каждого упругого элемента равна жесткости ряда скоб. Считаем также, что, вследствие опирания ленты на ролики, смещение стыкового соединения в направлении оси  $y$  и поворот отсутствуют.

Система, изображенная на рис. 2, имеющая  $N_p$  упругих элементов, является  $N_{p-1}$  раз статически неопределимой. Для определения неизвестных усилий в упругих элементах (усилий, воспринимаемых рядами скоб) применим метод сил. В соответствии с методом сил заменим лишние связи (упругие элементы) неизвестными усилиями  $X_1, X_2, \dots, X_{N_p}$ , возникающими в них (рис. 2). В местах установки скоб разность смещений стыкуемых концов равна относительному перемещению концов скобы. Все перемещения изменяются в направлении оси  $x$  и могут быть выражены через усилия  $X_1 - X_{N_p}$ . В интервале рабочих натяжений ленты можно использовать линейную зависимость перемещений от усилий.

Математическая модель для определения неизвестных усилий  $X_1 - X_{N_p}$  в упругих элементах соединения

$$\left. \begin{aligned} \Delta_{2k} - \Delta_{1k} &= \Delta_{ck}, \quad k=1,2,\dots,N_p; \\ \Delta_{2k} &= X_1 C_1 + P \sum_{i=1}^{k-1} \delta_{2i} - \sum_{j=2}^k X_j \left( \sum_{i=1}^{j-1} \delta_{2i} \right) - \\ &- \sum_{j=k+1}^N X_j \left( \sum_{i=1}^{k-1} \delta_{2i} \right), \\ \Delta_{1k} &= \sum_{j=2}^k X_j \left( \sum_{i=1}^{j-1} \delta_{1i} \right) + \sum_{j=k+1}^{N_p} \left( \sum_{i=1}^{k-1} \delta_{1i} \right), \\ \Delta_{ck} &= X_k C_k; \quad \sum_{i=1}^{N_p} X_i = P, \\ X_k C_k - X_1 C_1 + \sum_{j=2}^k X_j \sum_{i=1}^{j-1} (\delta_{1i} + \delta_{2i}) + \\ &+ \sum_{j=k+1}^{N_p} X_j \sum_{i=1}^{k-1} (\delta_{1i} + \delta_{2i}) = P \sum_{i=1}^{k-1} \delta_{2i}, \\ k &= 2,3,\dots,N_p \end{aligned} \right\} (1)$$

где  $\Delta_{2k}$  – перемещение конца 2 ленты в месте установки  $k$ -го ряда скоб;  $\Delta_{1k}$  – перемещение конца 1 ленты в месте установки  $k$ -го ряда скоб;  $\Delta_{ck}$  – относительное перемещение середины и конца скобы  $k$ -го ряда;  $\delta_{1i}, \delta_{2i}$  – податли-

вости растяжению участков ленты первого и второго концов между соседними  $i$  и  $i+1$  рядами скоб, м/Н;  $C_k$  – податливость  $k$ -го ряда скоб, м/Н.

Система уравнений (1) позволяет определить суммарную силу взаимодействия ленты и скоб любого ряда. Для этого необходимо вычислить податливости  $\delta_{mi}$  и  $C_k$ . Податливость участка ленты растяжению вычислим как податливость стержня.

$$\delta_{mi} = \frac{l_i}{E_{mi}}, \quad (2)$$

где  $l_i$  – расстояние между  $i$  и  $i+1$  рядами скоб, мм;  $E_{mi}$  – жесткость на растяжение поперечного сечения  $i$  конца  $m$  конвейерной ленты, Н.

Рассматривая силы взаимодействия скобы с соединяемыми концами ленты, сосредоточенными и приложенными по середине толщины ленты (рис. 3), на основании метода Мора [3] можно записать

$$C_k = \frac{k_g H_1^3}{48 E_C I_k M_k},$$

$$H_1 = H_0 + \frac{H_C}{2}, \quad I_k = \frac{\pi d_k^4}{32}, \quad (3)$$

где  $H_0$  – толщина ленты, мм;  $H_C$  – толщина сердечника ленты, мм;  $E_C$  – модуль упругости двух ножек скобы, МПа;  $I_k$  – момент инерции поперечного сечения двух ножек скобы;  $M_k$  – число скоб в  $k$ -том ряду,  $k_g$  – коэффициент, учитывающий увеличение податливости скоб за счет контактных деформаций ленты.

В дальнейшем при одинаковых податливостях рядов скоб и одинаковых податливостях участков ленты обозначения  $\delta_i$  и  $C_k$  будем использовать без индексов.

Из решения системы (1) следует, что нагрузка между рядами скоб распределена неравномерно. Крайние ряды скоб воспринимают большее усилие, чем средние ряды. Причем с увеличением жесткости скоб неравномерность распределения нагрузки между рядами скоб увеличивается. Зависимости относительного усилия  $X_k/P$  от номера ряда  $k$  для двенадцатирядного стыкового соединения с одинаковыми рядами скоб приведены на рис. 4.

Зависимости относительного усилия  $X_1/P$ , воспринимаемого первым рядом, от числа рядов  $N_p$  скоб стыкового соединения приведены на рис. 5. Из них видно, что увеличение числа рядов скоб при сопоставляемых податливостях

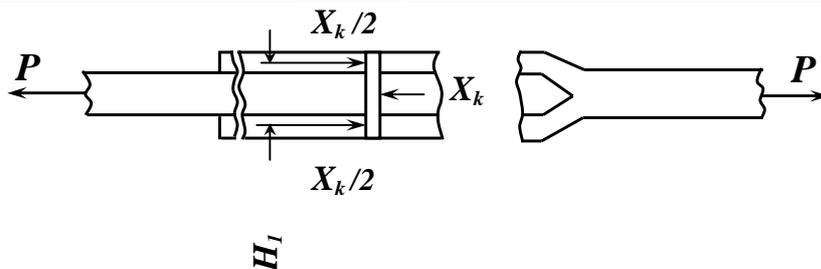


Рис. 3. Расчетная схема для определения податливости ленты

ленты и скоб не приводит к существенному уменьшению нагрузки на наиболее нагруженные крайние ряды скоб.

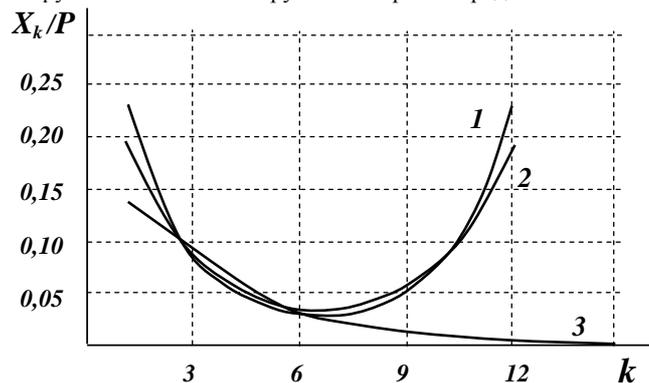


Рис. 4. Распределение нагрузки между рядами (1 -  $C_k = 5\delta_k$ , 2 -  $C_k = 8\delta_k$ , 3 -  $C_k \gg \delta_k$ )

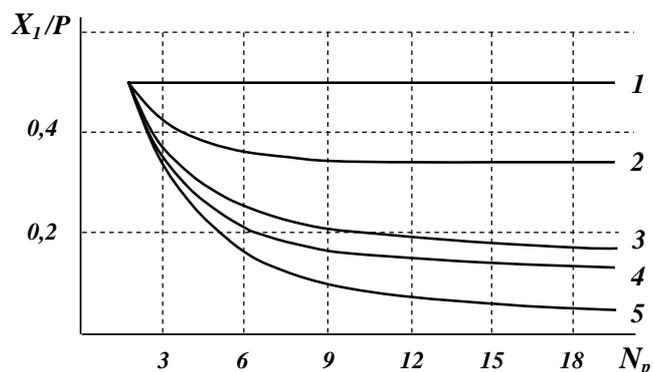


Рис. 5. Зависимость величины  $X_1/P$  от числа рядов  $N_p$  (1 -  $C \ll \delta$ , 2 -  $C = \delta$ , 3 -  $C = 8\delta$ , 4 -  $C = 16\delta$ , 5 -  $C \gg \delta$ )

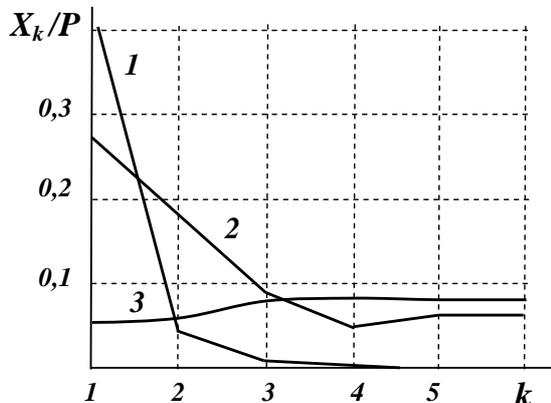


Рис. 6. Распределение растягивающей нагрузки между рядами 12-рядного механического соединения (1 - концы постоянного сечения, 2 - концы имеют три ступени (2, 3, 4 прокладки), 3 - концы разделаны на клин)

Наличие у цельного конца ленты скошенного клином или разделанного ступенькой участка приводит к уменьшению нагрузки на крайний ряд скоб в 1,10 – 1,15 раза. Однако, несмотря на это уменьшение нагрузки, напряжения в ленте возрастают, так как число прокладок в месте скоса уменьшилось.

Распределение усилий между рядами скоб при разделанных концах лент приведено на рис.6 (картина распределения усилий симметрична относительно шестого ряда).

В таблице 1 приведены расчетные значения податливостей скоб и участков ленты, используемых в угольной промышленности.

В таблице 2 даны результаты расчета силы взаимодействия одной скобы с лентой ( $X_1/M_1$ ) для соединений с рекомендуемыми [1,2] параметрами при  $K_{def} = 1,0$  и  $d_k = 2,0$  мм.

Данные таблицы 2 показывают, что у всех приведенных соединений имеют место пластические деформации скоб крайних рядов при номинальных нагрузках.

Расчет многорядных механических соединений с учетом пластической деформации скоб и в общем случае нелинейной зависимости податливости скобы от усилия на нее действующего, а также с учетом нелинейной зависимости растяжения ленты возможен при использовании метода переменных параметров упругости [4]. В основе этого метода лежит представление зависимостей деформаций от напряжений в форме обобщенного закона Гука, в котором параметры упругости зависят от напряженного состояния. Тогда расчет механических соединений в нелинейной постановке сводится к последовательности решений системы (1) с уточняющимися параметрами  $\delta_{mi}$  и  $C_k$ .

Для очередного решения (1) параметры  $\delta_{mi}$  и  $C_k$  определяют по формулам (2) и (3), в которых  $E_{mi}$  и  $E_C$  вычисляют, исходя из результатов предыдущего решения и эмпирических зависимостей.

Так, на начальной стадии малых пластических деформаций скобы модуль упругости определяется по формуле:

$$E_C = \left( \frac{\sigma_i}{\epsilon_i} \right) / \left( 1 + \frac{1-2\nu}{3E_{CO}} \frac{\sigma_i}{\epsilon_i} \right), \quad (4)$$

где  $\sigma_i$  и  $\epsilon_i$  – интенсивность напряжений и интенсивность деформаций в скобах,  $E_{CO}$  – значение модуля упругости в области упругих деформаций.

$E_{mi}$  вычисляют аналогичным образом на основании диаграммы растяжения ленты.

Рассмотрим, как влияет промазывание клеем соединяемых концов ленты на распределение усилий между рядами скоб. Учитывая, что для холодной вулканизации некоторых марок клея необходимо до 12 часов времени, а забивание скоб занимает около 1 часа, рассмотрим два различных случая взаимодействия клеевого соединения с соединением скобами.

Таблица 1. Значения податливости ленты и скоб

Тип ленты	$N_{пр}$	$H_c$ , мм	$H_0$ , мм	$E_0$ , МН	$\delta^*$ , мкм/Н	$C^{**}$ , мкм/Н
2ШБКНЛ-65	4	10,0	14,0	0,72	27,4	16,3
2ШТК-100	4	6,0	12,5	1,12	17,9	8,8
2ШТК-100	6	9,0	15,5	1,68	11,9	18,9
2ШТК-100	7	10,5	17,0	1,96	10,2	25,9
2ШТК-100	8	12,0	18,5	2,24	8,9	34,8
ПВХ-120	4	7,0	10,0	1,31	14,6	5,8
2ШТК-200-2	4	12,0	19,5	2,46	8,1	39,3
2ШБКНЛ-150	4	12,0	19,5	2,00	11,1	39,3
2ШБКНЛ-150	6	18,0	25,5	2,99	7,4	97,3

**Примечания:**

- \* – Участок длиной 20 мм, шириной 1,0 м.
- \*\* – Податливость 28 скоб при  $K_{деф} = 1,0$  и  $d_k = 2,0$  мм. Жесткость ленты на растяжение  $E_0$  определена с помощью экспериментальных данных [2]

Таблица 2. Величины усилий и напряжений изгиба в скобах

Тип ленты	$N_{пр}$	$P$ , кН	$N_p$	$C/\delta$	$X_1/M_1$ , кН
2ШБКНЛ-65	4	25	5	1,19	0,318 / 0,280
2ШБКНЛ-65	4	32	8	1,19	0,403 / 0,343
2ШТК-100	4	50	12	0,99	0,655 / 0,529
ПВХ-120	4	60	15	0,80	0,820 / 0,651
2ШТК-100	6	75	18	3,18	0,721 / 0,532
2ШТК-100	7	87	21	5,08	0,716 / 0,517
2ШТК-100	8	100	24	7,80	0,704 / 0,502
2ШТК-200-2	4	100	24	9,70	0,647 / 0,466
2ШБКНЛ-150	4	75	18	7,05	0,548 / 0,411
2ШБКНЛ-150	6	111	27	26,2	0,478 / 0,356

**Примечание.** В числителе указаны значения при постоянных значениях  $C_k/\delta_k = C/\delta = 9,7$ , в знаменателе – при переменных (при расчетно установленной зависимости  $C_k/\delta_k = C/\delta(1 + 0,002 X_k/M_k)$ )

**Первый случай.** Стыковое соединение выполнено без соблюдения технологических правил склейки и сразу же после забивания скоб запущено в работу. При этом не успевает произойти вулканизация клея, а стыковое соединение подвергается растяжению и в нем устанавливается распределение усилий между рядами скоб согласно (1). Вулканизация клея происходит в процессе эксплуатации соединения и на распределение усилий между рядами уже не влияет. Клеевое соединение выполняет в данном случае страхующую роль. Однако качество клеевого соединения невысоко, так как в процессе вулканизации соединяемые поверхности не очищались, не шероховались, подвергались изгибу и вибрации.

**Второй случай.** Стыковое соединение, выполненное с соблюдением правил склейки, после завершения сборки выдерживается необходимое по технологии время. При этом вулканизация клея происходит при ненагруженном соединении и образуется два соединения концов ленты (клеевое и посредством скоб), работающих параллельно.

Определим, как распределяется нагрузка между рядами скоб и клеевой прослойкой. Для этого непрерывную клеевую прослойку разобьем по длине соединения на дискретные участки, примыкающие к рядам скоб. Ряд скоб и примыкающий к нему участок клеевой прослойки рассмотрим как два параллельных упругих элемента. Заменим их одним упругим элементом с эквивалентной податливостью  $C_{эк}$ .

$$C_{эк} = \frac{C_k C_{nk}}{C_k + C_{nk}}, \quad (5)$$

$$k = 1, 2, \dots, N_p,$$

где  $C_{nk}$  – податливость участка клеевой прослойки, примыкающего к  $k$ -му ряду скоб, определяемая формулой:

$$C_{nk} = \frac{H_{BO} + H_{HO}}{G_p l_k B}, \quad (6)$$

где  $H_{BO}$  и  $H_{HO}$  – толщина верхней и нижней обкладок ленты, мм;  $G_p$  – модуль сдвига обкладочной резины, МПа;  $B$  – ширина ленты, м. Для другой конструкции соединения вместо толщин обкладок необходимо брать толщины прилегающих эластичных слоев вместе с толщиной клея. Подставив в (1)  $C_{эк}$  вместо  $C_k$ , определим усилие  $X_{эк}$ , воспринимаемое  $k$ -ым упругим элементом с эквивалентной податливостью. Усилие  $X_{эк}$  распределяется между рядом скоб и участком клеевой прослойки следующим образом:

$$X_k = X_{эк} / \left( 1 + \frac{C_k}{C_{nk}} \right), \quad (7)$$

$$X_{nk} = X_{эк} / \left( 1 + \frac{C_{nk}}{C_k} \right), \quad (8)$$

где  $X_{nk}$  – усилие, воспринимаемое  $k$ -ым участком клеевой прослойки.

Рассчитаем наибольшую силу взаимодействия скобы и конвейерной ленты для двух случаев работы клеевой про-

слойки. Рассмотрим двенадцатирядное соединение с одинаковыми рядами скоб и следующими параметрами:  $\delta = 5,0 \times 10^{-9}$  м/Н,  $C = 41,0 \times 10^{-9}$  м/Н,  $H_{BO} = 4,5$  мм,  $H_{HO} = 2$  мм,  $G_p = 1,5$  МПа,  $B = 0,8$  м,  $I_k = 20$  мм.

Приведя все данные к системе единиц СИ, получим  $C_{nk} = 5,8 \times 10^{-8}$  м/Н,  $C_{Эк} = 2,4 \times 10^{-8}$  м/Н. Решив систему (1) для полученных числовых значений  $C_{nk}$  и  $C_{Эк}$  и используя формулу (6), получим, что в первом случае, когда стыковое соединение запускается в работу не ожидая вулканизации клея, наибольшая сила взаимодействия скобы и ленты равна  $0,0098 \times P$ . Во втором случае, когда соединение выдерживается в ненагруженном состоянии до полной вулканизации клея, наибольшая сила равна  $0,0068 \times P$ , то есть в 1,44 раза меньше по сравнению с первым случаем. Практический опыт [5] показал, что при длительном действии таких эксплуатационных факторов, как влажность, повышенная температура, циклические нагрузки по длительной прочности клеомеханические соединения превышают клеевые. Наличие механических соединителей особенно повышает работоспособность при переменных нагрузках и неравномерном отрыве [6]. Для клеомеханических соединений диаграмма растяжения имеет значительный нелинейный участок.

#### Выводы

Таким образом, разработанная математическая модель расчета распределения усилий в механических соединениях конвейерных лент, позволила установить основные закономерности работы механических соединений и составить методику их расчета. Многорядные механические соединения являются статически неопределимыми системами неравно-

мерно распределяющими внешнюю нагрузку между соединительными элементами. Наиболее нагружены соединительные элементы крайних рядов. С увеличением числа рядов соединительных элементов и их жесткости неравномерность возрастает. При правильном подборе параметров соединения по предлагаемым зависимостям неравномерность распределения нагрузки может быть существенно уменьшена.

Методика расчета механических соединений позволяет определять параметры соединения, обеспечивающие требуемую прочность при полном или частичной выравнивании нагрузки.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Инструкция по выбору, монтажу и эксплуатации конвейерных лент. – М.: НИИРП, 1981. – 75 с.
2. Конвейерные ленты / Ф.А. Махлис, И.И. Леонов, О.Г. Карабасов, В.В. Никитин. – М.: Химия, 1991. – 169 с.
3. Сопrotивление материалов. Под ред. Г.С. Писаренко. – К.: Вища школа, 1973. – 672 с.
4. Малинин Н.Н. Прикладная теория пластичности и ползучести. – М.: Машиностроение, 1975. – 400 с.
5. Вуба К.Т. О роли заклепок при сдвиге клееклепанных соединений внахлестку // Исследование прочности и деформативности клеевых соединений конструкционных строительных материалов. Под ред. Фрейдина А.С. – М.: Стройиздат. – Вып. 53, 1975. – С. 64-71.
6. Бумин Г.Л., Левченя Ж.Б., Антрошкин Э.Н. Автоматический контроль количества сыпучих материалов на ленте конвейера на основе деформации электрополей // Теоретические и технологические основы упрочнения и восстановления изделий машиностроения: Сб. науч. ст. / Под ред. С.А. Астапчика, П.А. Витязя. – Мн.: Технопринт, ПГУ, 2001. – С. 563-565.

УДК 621.867.2

Миранович О.Л.

## ДИНАМИКА УСТАНОВИВШЕГОСЯ ДВИЖЕНИЯ КОНВЕЙЕРНОЙ ЛЕНТЫ

#### Введение

Динамические нагрузки в роликовых опорах ленточного конвейера можно рассматривать как результат статического и динамического воздействия движущейся конвейерной ленты и расположенного на ней груза.

Установление законов, по которым движется лента, особенно с точки зрения возможности возникновения поперечных вертикальных колебаний, имеет важное значение при определении величин нагрузок, действующих на опору, и требует дополнительных исследований.

#### Аналитические исследования

Рассмотрим ленту конвейера, представляющую собой предварительно натянутую упруго-вязкую оболочку, нагруженную распределенной нагрузкой, многократно опирающуюся на опоры (рис. 1 и 2).

Решение задачи с учетом реальных характеристик ленты и груза чрезвычайно затруднительно и приведет к громоздким результатам, поэтому исследование динамических процессов будет сделано в упрощенной постановке. Анализ ранее выполненных работ, посвященных описанию динамических процессов в ленточных конвейерах, позволил принять следующие допущения:

- колебания ленты в соседних пролетах происходят независимо;
- изучение движения ленты проводится только для одного пролета конвейера;

- лента не воспринимает изгибных напряжений, то есть является абсолютно гибкой;
- упругие удлинения подчиняются закону Гука;
- колебания ленты происходят в вертикальной плоскости, боковое смещение ленты не учитывается;
- натяжение ленты в пределах одного пролета не изменяется;
- груз не имеет движения относительно ленты.

Расчетная схема пролета ленточного конвейера, соответствующая принятым допущениям, представлена на рис. 3. При этом груженная лента рассматривается как упругая гибкая нить с погонной массой  $m_l$ , движущаяся в горизонтальном направлении  $x$  со скоростью  $v_l$ , имеющая предварительное натяжение  $T_0$  и нагруженная погонной нагрузкой  $q_{zp}$ , где

$$q_{zp} = \bar{q}_{zp} (x - v_l t). \quad (1)$$

Аргумент функции  $q_{zp}$  указывает на то, что погонная нагрузка движется совместно с лентой в горизонтальном направлении  $x$  со скоростью  $v_l$  и в различных точках пролета ее значения могут изменяться во времени. Таким образом, выражение (1) является общим случаем представления  $q_{zp}$ , позволяющим рассматривать как детерминистические, так и случайные законы задания погонной нагрузки.