УДК 625.28

РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ЛЕНТОЧНОГО КОНВЕЙЕРА

Сердюк А.А. докт. тех. наук., проф., Степаненко И.В. аспирант,
Национальная горная академия Украины,
Калашников О.Ю. гл. конструктор отдела КПО АО НКМЗ

Составлена математическая модель ленточного конвейера с учетом вязкоупругого поведения тяговых лент и футеровки приводного барабана.

Formed mathematical band pipeline model with provision for viscous - springy announcing the tractive tapes and arms of drive drum.

В настоящее время, несмотря на рост уровня использования локомотивной откатки, основным видом транспорта (по наклонным горным выработкам шахт) является применение ленточных конвейеров. Повышение производительности и надежности конвейерного транспорта является неотложной задачей.

Увеличение коэффициента сцепления до 0,6 - 0,7 позволит использовать ленточные конвейеры на тяжелых профилях пути с уклоном, существенно уменьшить транспортные расходы при проведении подготовительных и вспомогательных выработок, транспортировке угля.

Для механической системы, содержащей в разных плоскостях наклонно расположенные упруговязкие ленты, которые замыкаются со сторон и объединены между собой присоединенными к ним массами, расположенными вдоль лент, методом кинетостатики в переходном режиме найдены усилия в ветвях лент, которые состоят из усилий упругости сухого трения и вязкого сопротивления. Такая система реально отображает крутонаклонный конвейер, предназначенный для транспортировки сыпучего груза под большими углами наклона. Рассматриваемая механическая система может быть представлена моделью, в которой упруговязкие связи размещенные дискретно связывают присоединенные массы транспортируемого груза с кулоновым трением. Такая механическая система рассматривается как существенно нелинейная. В результате численного решения для различных значений параметров, описывающих кинематику и динамику этой системы полученные графические изображения изменений удельных усилий в ветвях системы и сил трения между грузом и основной лентой. Получены зависимости для свободных колебаний, пуска и торможения крутонаклонного конвейера.

На основании анализа численного решения установлено, что в реальном диапазоне задаваемых параметров системы последняя ведет себя как система с одной степенью свободы, для которой на декремент затухание и частоты колебаний существенное влияние имеет сопротивление перемещения ветвей лент и силы трения между массой и основной лентой; увеличение коэффициента жесткости прижимной ленты, расположенных со сторон основной ленты, приводе к заметному увеличению максимальных и амплитудных удельных усилий в этой ленте и уменьшению их в основной ленте.

Отсутствие учета вязкого сопротивления материала лент увеличивает общую длительность колебания массы на поверхности основной ленты, которая увеличивает максимальное значение удельного усилия и общую длительность колебательного процесса.

Для повышения устойчивости и предотвращения схода конвейерной ленты предлагается использование приводного барабана ШЛК с футеровкой секционного типа с наклонными ламелями. Процесс взаимодействия футеровки секционного типа приводного барабана с конвейерной лентой описывается методами аналитической механики и механики сплошной среды. Исследованию приводных барабанов с футеровкой из низкомодульного материала посвящено ограниченное число работ.

Для рассмотрения большинства аспектов взаимодействия конвейерной ленты с футеровкой секционного типа приводного барабана разработана математическая модель привода шахтного ленточного конвейера.

Для прогнозирования поведения футерованного барабана при взаимодействии с лентой необходимо использовать математическую модель, описывающую контактное взаимодействие ламели резиновой футеровки и ленты.

При теоретическом исследовании контакта ламели футеровки приводного барабана и ленты использована геометрически и физически нелинейная модель сплошной среды, учитывающая нелинейность материала, наличие больших деформаций порядка 50% и трения между конвейерной лентой и приводным барабаном. При взаимодействии ламели футеровки с лентой реализуется плоское напряженное состояние. Плоская модель сплошной среды построена методом физической дискретизации, идея которого состоит в разбиении исходной физической модели на элементы, в отличие от метода конечных элементов, построенном на математической дискретизации, т. е. дискретизации уравнений, описывающих поведение системы. Преимущество метода физической дискретизации состоит в более быстром получении результата при довольно высокой точности.

Футеровка приводного барабана заменяется моделью, состоящей из сосредоточенных масс, равных массе заштрихованной части футеровки,

$$m_{ij} = \frac{m_c}{N \cdot M} \qquad (i = \overline{1, N}; j = \overline{1, M}),$$

соединённых безмассными пружинами, имитирующими плоскую сплошную среду.

Соответствующие коэффициенты жесткости пружин определяются по формулам:

$$C_{rj} = \frac{1}{M} 2\pi E R_j b;$$

$$C_{\varphi j} = \frac{1}{N} Eb\left(R_j - R_{j-1}\right);$$

$$C_{r\varphi j} = \frac{1}{2M} \pi G R_j b,$$

где E, G, R_j, N, M, b – модули упругости первого и второго рода, текущий радиус слоя футеровки, число звеньев модели в радиальном и окружном направлениях, ширина ленты, соответственно.

Коэффициенты жесткости пружин $C_{rj}, C_{\varphi j}, C_{r\varphi j}$ находят из решения задачи деформирования слоя футеровки, при котором реализуется напряжённо-деформированное состояние с чистым растяжением-сжатием, соответственно. При этом поведение модели должно описывать напряжённо-деформируемое состояние слоя футеровки, рассчитанное в рамках теории упругости с учётом нелинейности соотношения напряжение-деформация. Коэффициенты жесткости C_{rj} находят из условия приложения гидростатического давления к слою футеровки без жесткого центра, коэффициенты $C_{\varphi j}$ – из гидростатического сжатия на жестком центре, $C_{r\varphi j}$ – из закручивания слоя на жестком центре.

Число степеней свободы полученной системы, при условии что массы могут совершать движения в плоскости рисунка, равно $2NM$.

Для численного решения задачи (о напряженно-деформированном состоянии) необходимо получить систему дифференциальных уравнений движения модели и проинтегрировать её (численно). Уравнения движения системы, получим, используя уравнение Лагранжа 2-го рода.

При определении потенциальной энергии системы принимали, что поведение материала футеровки при деформировании подчиняется закону

$$\sigma = E\left(\frac{\varepsilon^3}{\varepsilon_0}\right),$$

где ε_0 – характеристика нелинейности материала.

Подставляя выражения потенциальной и кинетической энергии системы и в уравнения Лагранжа второго рода, получим систему уравнений, описывающих деформирование футеровки

$$m_{ij}\ddot{x}_{ij} + C_{rj}\left(\frac{\Delta_{rij}-\Delta^0_{rij}}{\Delta^0_{rij}\delta_0}\right)^3\frac{(x_{ij}-x_{ij-1})}{\Delta_{rij}} + C_{r\varphi}\left(\frac{\Delta_{r\varphi ij}-\Delta^0_{r\varphi ij}}{\Delta^0_{r\varphi ij}\varepsilon_0}\right)^3\frac{(x_{ij}-x_{i-1j-1})}{\Delta_{r\varphi ij}} +$$

$$+C_{\varphi j}\left(\frac{\Delta_{\varphi ij}-\Delta^0_{\varphi ij}}{\Delta^0_{\varphi ij}\varepsilon_0}\right)^3\frac{(x_{ij}-x_{i-1j-1})}{\Delta_{\varphi ij}} = Q_{xij}, x\to y; i=\overline{1,M}; j=\overline{1,N}.$$

Решение системы будем отыскивать при граничных и начальных условиях, отражающих взаимодействие слоя футеровки на жестком центре с прямолинейной абсолютно жесткой лентой при наличии трения, описываемого законом Кулона.

Граничные условия:

на границе контакта футеровки с лентой при условии проскальзывания материала футеровки относительно ленты:

$$Q_{xiN} = kQ_{yiN}sign(\dot{x}_{iN}); i = \overline{1,M},$$

где k – коэффициент трения материала футеровки и ленты;

на границе контакта футеровки и жесткого барабанного центра

$$x_{i1} = R_1 \cos\left(\frac{2\pi i}{M}\right); y_{i1} = R_1 \sin\left(\frac{2\pi i}{M}\right); i = \overline{1, M}.$$

Начальные условия:

При t = 0

$$x_{ij} = R_j \cos\left(\frac{2\pi i}{M}\right); y_{ij} = R_j \sin\left(\frac{2\pi i}{M}\right);$$

$$\dot{x}_{ij} = 0; \dot{y}_{ij} = v_0; i = \overline{1, M}; j = \overline{1, N},$$

где v_0 – скорость сближения приводного барабана и ленты, м.

Интегрирование системы уравнений проведено модифицированным методом Эйлера, имеющим второй порядок аппроксимации.

$$\dot{x}_{ij}^{(k+1/2)} = \dot{x}_{ij}^{(k-1/2)} + \ddot{x}_{ij}^{(k)}\Delta t; x_{ij}^{(k+1)} = x_{ij}^{(k)} + \dot{x}_{ij}^{(k+1/2)}\Delta t;$$

$$x \to y; i = \overline{1, M}; j = \overline{1, N},$$

где $k, \Delta t$ – номер и величина шага по времени.

Величина шага по времени выбрана из условия устойчивости по Куранту, шаг интегрирования должен быть меньше времени распространения возмущения в материале футеровки вдоль наименьшего элемента

$$\Delta t < \frac{\min(\Delta_{rij}; \Delta_{\varphi ij}; \Delta_{r\varphi ij})}{c},$$

где с – скорость звука в резине.

Результаты расчета представлены на граф. 1, кривая 1 – для барабана, футерованного резиной с модулем упругости Е = 1 МН/м^2, кривая 2 – для барабана, футерованного резиной с модулем упругости Е = 4 МН/м2. Результаты, полученные теоретически, сравнивали с результатами экспериментов, по которым построена кривая 3 – для футерованного барабана с армированием резины марки 090822 синтетическим кордом, и кривая 4 – для барабана, футерованного слоем резины марки 4и8387.

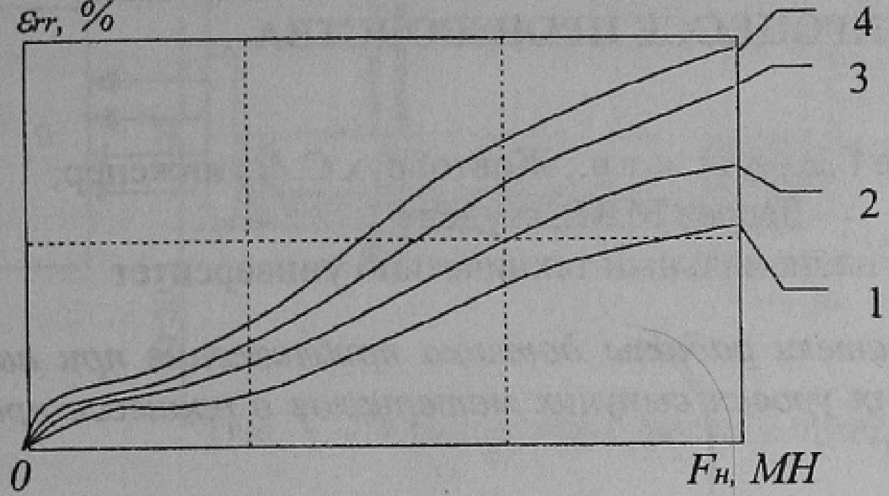

График 1 – Зависимость деформаций от модуля упругости материала футеровки и натяжения ленты.

Моделирование взаимодействия футерованного барабана и ленты методом физической дискретизации удовлетворительно описывает контактное взаимодействие барабана и ленты при больших деформациях, значительной нелинейности механической характеристики материала футеровки, а также несжимаемости резины при сжатии.

Список источников.

1. Мишин В.В., Сердюк А.А. О качении цилиндра, футерованного несжимаемым упругим материалом // Известия вузов. Машиностроение. - 1989. - №8. - С. 30 – 36.
2. Мишин В.В., Сердюк А.А. Об оценке теплового режима футеровки колеса шахтного локомотива // Проблемы машиноведения и надежности машин. – 1990. - №3. – С. 67 – 75.