

УДК 622.822.7:622.647.2

Е.В. Курбацкий, канд. техн. наук, замзавотделом, А.А. Король, канд. техн. наук, ведущий науч. сотр. НИИГД «Респиратор», Донецк, А.А. Гаврилко, канд. техн. наук, доц. Львовской политехники, Львов

ДИНАМИЧЕСКОЕ НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ГОРЯЩИХ КОНВЕЙЕРНЫХ ЛЕНТ

Ye. V. Kurbatsky, Cand. Sci. (Tech.), deputy department head, A.A. Korol, Cand. Sci. (Tech.), senior research assistant (NIIGD “Respirator”, Donetsk), A.A. Gavrilkо, Cand. Sci. (Tech.), Assoc. Prof. (Lvov Polytechnika, Lvov)

DYNAMIC TENSION OF THE BURNING CONVEYOR BELTS

Цель. Исследование динамики напряжений горящих конвейерных лент для определения времени их разрыва и своевременного тушения автоматической водоразбрызгивающей установкой.

Методы. Теоретическое исследование напряженно-деформированного состояния конвейерных лент с использованием вариационного метода решения краевых задач теории упругости.

Результаты. Разработана математическая модель напряженно-деформированного состояния горящих конвейерных лент в виде цилиндрической многослойной тонкой оболочки постоянной толщины с анизотропными внутренними и изотропными наружными слоями под действием нормальной от собственной массы и осевой от натяжения ленты нагрузок при шарнирных криволинейных и свободных прямолинейных краях. Получены зависимости изменения предельных напряжений во времени для горящих резиноканевых и резиноканевых конвейерных лент, при которых произойдет их разрыв.

Практическая значимость. Разработанная математическая модель напряженно-деформированного состояния горящих резиноканевых и резиноканевых конвейерных лент позволяет определить время, при котором произойдет их разрыв и дальнейшее распространение пожара по длине конвейера, для обеспечения необходимого времени тушения автоматической установкой водяного пожаротушения.

Ключевые слова: конвейерная лента, пожар, напряжения, вариационный метод, математическая модель, автоматическая установка, инерционность.

Постановка проблемы. Ленточные конвейеры на приводных станциях и на линейной их части должны быть защищены автоматическими установками водяного пожаротушения. Одна из основных характеристик установок – инерционность срабатывания, которая является составной частью времени тушения пожара и может быть определена на основании исследования напряженно-деформированного состояния конвейерных лент при их горении и разрыве с последующим распространением пожара по длине конвейера, что приведет к значительным убыткам для шахт.

Анализ последних публикаций и выделение не решенных ранее частей проблемы. В работе [1] приведен анализ параметров установок для локализации и тушения пожаров в выработках, оснащенных ленточными конвейерами, соответствия между их техническими характеристиками и

параметрами выработок. Однако в ней не определено время тушения пожаров с учетом процесса горения конвейерных лент и их разрыва.

В работе [2] для определения критерия эффективного тушения пожаров на ленточных конвейерах получены зависимости напряжений для конвейерных лент при горении, однако не определены предельные их значения, при которых произойдет разрыв лент, так как не определены действующие нагрузки, механические характеристики материалов слоев лент и координатные функции, зависящие от граничных условий на их краях, а следовательно, нельзя определить время тушения пожара, которое должно быть меньше времени достижения предельных значений напряжений, при которых произойдет разрыв лент с последующим распространением пожара по длине конвейера.

Формулирование цели работы и постановка задач. Цель работы – исследование динамику напряжений горящих конвейерных лент для определения времени их разрыва и своевременного тушения автоматической водоразбрызгивающей установкой.

Основные задачи – разработка математической модели напряженно-деформированного состояния горящих конвейерных лент и определение времени их разрыва в зависимости от предельных значений напряжений.

Применен теоретический метод исследований напряженно-деформированного состояния конвейерных лент с использованием вариационного метода решения краевых задач теории упругости.

Изложение основного материала исследований. Для определения напряжений при использовании вариационного метода решения задачи, приведенного в работе [2], вначале подберем систему координатных функций по методу Ритца [3]. Чтобы приближенные решения по этому методу при увеличении количества параметров сходились с точными, необходимо выбрать координатные функции, обладающие следующими свойствами:

- координатные функции удовлетворяют кинематическим, существенным граничным условиям;
- взятые в любом конечном числе координатные функции линейно независимы.

Исходя из принятых граничных условий в качестве координатных функций приняты степенные полиномы, удовлетворяющие вышеприведенным условиям, коэффициенты которых приведены в табл. 1, 2.

Основными величинами, характеризующими упругие свойства многослойных ортотропных лент при растяжении, являются их главные жесткости:

$C_{j,k}$ – приведенные жесткости на растяжения по координатным линиям x , y , МПа·м;

C_{12}^* – приведенная жесткость сдвига в срединной поверхности, МПа·м.

Таблица 1

Коэффициенты полиномов f_j для условий свободная опора – свободная опора

f_j	x^1	x^2	x^3	x^4	x^5	x^6	x^7
f_1	-1	1					
f_2	1	-3	2				
f_3	-1	7	-12	6			
f_4	1	13	42	-50	20		
f_5	-1	21	-110	230	-210	70	
f_6	1	-31	240	-770	1190	-882	252

Таблица 2

Коэффициенты полиномов g_j для условий свободный край – свободный край

g_i	y^0	y^1	y^2	y^3	y^4	y^5
g_1	1					
g_2	-1	2				
g_3	1	-6	6			
g_4	-1	12	-30	320		
g_5	1	-20	90	-140	70	
g_6	-1	30	-210	560	-630	252

Для конвейерных лент с числом t резиновых слоев и r слоев тросов или тканей эти величины имеют вид

$$\left. \begin{aligned} C_{11} &= tC_o + rC_{11_3}; & C_{12} &= vtC_o; \\ C_{22} &= tC_o + rC_{22_3}; & C_{12}^* &= (1-v)tC_o, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где $C_o = \frac{E\delta}{1-\nu^2}$ – жесткость на растяжение резинового слоя;

C_{11_3}, C_{22_3} – приведенные жесткости заполнителей (трос, ткань);

E, ν, δ – модуль упругости, МПа, коэффициент Пуассона и толщина резинового слоя, м.

Входящие в выражения (1) жесткости заполнителей при растяжении определяют в зависимости от вида заполнителей.

Для резинотканевых конвейерных лент

$$C_{11_3} = \frac{E_x \delta_1^i}{1 - \nu_x^i}; \quad C_{22_3} = \frac{E_y \delta_1^i}{1 - \nu_y^i}, \quad (2)$$

где E_x, E_y – модули упругости, МПа;
 ν_x^i, ν_y^i – коэффициенты Пуассона тканевых слоев;
 δ_1^i – толщины слоев, м.

Для резинотросовых конвейерных лент, заполненных отдельными тросами, между которыми расположен слой резины,

$$\left. \begin{aligned} C_{11_3} &= \frac{[E_T d_T + (t - d_T)E] \delta_1}{H_T}; \\ C_{22_3} &= \frac{H \delta_1 t}{d_T E_T^{-1} + (t - d_T)E^{-1}}, \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

где E_T – модуль упругости, МПа;
 d_T – диаметр троса, м;
 t, H – расстояние между тросами и верхними слоями, м.
 Модуль упругости троса равен

$$E_T = \sum_{k=1}^n E_k, \quad (4)$$

где E_k – модуль упругости проволоки троса, МПа;
 k – количество проволок в тросе.

Для вычисления правой части системы уравнений [2] необходимо иметь выражение для нормальной силы q_z , МПа, и потенциала силы q_x , МПа.

Нормальная нагрузка равна сумме нагрузок, вызванных массой транспортируемого материала и ленты:

$$q_z = q_m + q_l. \quad (5)$$

Здесь

$$q_m = \frac{\Pi}{3,6v_B}; \quad q_l = \frac{Q_{\Pi}}{l_B}, \quad (6)$$

где P – производительность конвейера, кг/с;

v_e – скорость движения ленты, м/с;

Q_l – масса ленты, кг;

l_e – расстояние между роlikоопорами, м.

Максимально допустимое натяжение для резинотканевых и резинотросовых лент вычисляют соответственно по формулам [4]

$$H_{\max} \leq \frac{l_e i \sigma_p}{n}; \quad (7)$$

$$H_{\max} \leq \frac{\pi d_n \sigma_n Z_n B}{4 t_T n}, \quad (8)$$

где i – количество прокладок;

n – коэффициент запаса прочности;

σ_p – напряжение при разрыве, МПа;

d_n – диаметр проволоки троса, м;

t_T – шаг тросов в ленте, м;

Z_n – количество тросов;

σ_n – предел прочности в проволоке, МПа.

В зависимости от назначения конвейера, типа ленты, количества тяговых прокладок и угла наклона конвейера значение коэффициента запаса прочности меняется от 5 до 10.

Номинальное рабочее напряжение оставляет в основном 10-12 % от разрывной прочности лент.

По приведенному выше методу с помощью ЭВМ проведен расчет наиболее распространенных в угольной промышленности типов резинотросовой и резинотканевой лент РТЛО-3150 и ПВХ-120.

В качестве механических характеристик для резинотканевой ленты выбраны средние их значения: $E_x = 2,1 \cdot 10^8$ Па; $E_y = 1,1 \cdot 10^8$ Па; $\nu_x = 0,21$; $\nu_y = 0,11$; $E = 0,33 \cdot 10^7$ Па; $\nu = 0,2$.

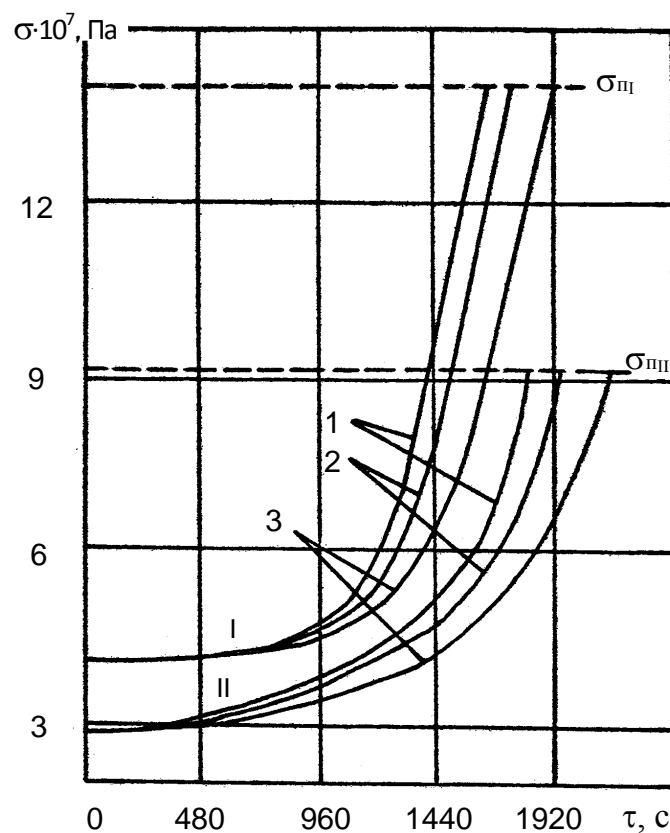
Известно, что при увеличении количества параметров точность решения по методу Ритца должна возрастать. Учитывая симметричность конструкции ленты, граничных условий и приложенной нагрузки, чтобы установить минимальное количество параметров, необходимых для получения практически применяемой точности, в качестве координатных функций использованы системы полиномов четных степеней. Результаты показывают, что при увеличении количества параметров более $n = 3$ и $m = 2$ напряжения практически не изменяются, поэтому в дальнейшем использовано именно такое их количество.

Следует отметить, что потребность искомым величин (напряжений) оказывается существенно больше, чем погрешности, вносимые в параметры, поэтому при использовании степенных полиномов точность расчета

коэффициентов уравнения Ритца должна быть значительно выше точности искомых величин. Однако в данном расчете, учитывая высокую степень точности расчета коэффициентов, указанная потеря точности мало повлияла на окончательные результаты.

Условием для прекращения расчета на ЭВМ является получение максимальных напряжений, равных напряжениям разрыва лент, которые для РТЛО-3150 равны $1,4 \cdot 10^8$ Па, а для ПВХ-120 $0,92 \cdot 10^8$ Па.

С учетом динамики горения по ширине лент получены результаты изменения напряжений по времени для характерных скоростей воздушного потока в конвейерных выработках шахт, максимальные значения ($\sigma_{\text{пI}}$ или $\sigma_{\text{пII}}$) которых приведены на рисунке.



Изменение напряжений во времени для горящих конвейерных лент РТЛО-3150 (I) и ПВХ-120 (II) при скорости вентиляционной струи в выработке:

1 – 3 м/с; 2 – 2 м/с; 3 – 1 м/с; $\sigma_{\text{пI}}$, $\sigma_{\text{пII}}$ – предельные значения напряжений, при которых происходит разрыв ленты

Анализ полученных результатов показывает, что при горении конвейерных лент их напряжения медленно возрастают до двадцатой минуты, после чего происходит резкое их увеличение, причем скорость их нарастания у резиноканевых лент выше, чем у резиноканевых лент. Несмотря на то, что скорость горения резиноканевой ленты значительно выше, чем

резинотканевой, время их разрыва отличается незначительно и составляет при скорости воздушной струи 1...3 м/с соответственно от 28 до 36 мин. Это обстоятельство объясняется существенным влиянием дополнительных напряжений, вызванных эксцентриситетом приложения растягивающей силы, обусловленной натяжением ленты.

Таким образом, зная скорость вентиляционной струи в конвейерных выработках, можно определить минимальное время, при котором произойдет разрыв горящих лент, которое будет соответствовать критерию инерционности автоматических установок пожаротушения линейной части ленточных конвейеров.

Выводы

- Разработана математическая модель напряженно-деформированного состояния горящих конвейерных лент в виде цилиндрической многослойной тонкой оболочки постоянной толщины с анизотропными внутренними и изотропными наружными слоями под действием нормальной от собственной массы и осевой от натяжения ленты нагрузок при шарнирных криволинейных и свободных прямолинейных краях.

- Получена зависимость времени изменения предельных напряжений для горящих резинотканевых и резинотросовых конвейерных лент, при которых произойдет их разрыв, которое должно быть меньшим времени тушения пожара на ленточных конвейерах.

Список литературы / References

1. Ющенко Ю.Н. Размещение пожаротушающих установок вдоль ленточного конвейера / Ю.Н. Ющенко, К.И. Лапин, А.Ю. Коляда // Горноспасательное дело: сб. науч. тр. / НИИГД «Респиратор». – Донецк, 2012. – Вып. 49. – С. 99 – 104.

Yushtchenko, Yu.N., Lapin, K.I. and Kolyada, A.Yu. (2012), *Razmeshhtchenie pozharotushashchikh ustanovok vdol lentochnogo konveera* [Placement of the fire-fighting plants along the belt conveyor], NIIGD “Respirator”, Donetsk, Ukraine.

2. Курбацкий Е.В. Критерий эффективного тушения пожаров на ленточных конвейерах / Е.В. Курбацкий, С.Н. Зуйкова, А.А. Гаврилко // Горноспасательное дело: сб. науч. тр. / НИИГД «Респиратор». – Донецк, 2013. – Вып. 50. – С. 137 – 144.

Kurbatsky, Ye.V., Zuykova, S.N. and Gavrillko, A.A. (2013), *Kriterii effektivnogo tusheniia pozharov na lentochnykh konveerakh* [Criterion of effective fighting the fires at the belt conveyors], NIIGD “Respirator”, Donetsk, Ukraine.

3. Агеев В.Г. Динамическое напряженно-деформированное состояние взрывоустойчивой перемычки / В.Г. Агеев, И.Ф. Марийчук // Горноспасательное дело: сб. науч. тр. / НИИГД «Респиратор». – Донецк, 2013. – Вып. 50. – С. 7 – 14.

Ageyev, V.G. and Mariychuk, I.Ph. (2013), *Dinamicheskoe napriazhenno-deformirovannoe sostoianie vzryvoustoichivoi peremychki* [Dynamic deflected mode of the mine explosion-proof stopping], NIIGD “Respirator”, Donetsk, Ukraine.

*Рекомендовано к публикации канд. техн. наук И.Ф. Марийчуком.
Дата поступления рукописи 21.07.2014*

Ціль. Дослідження динаміки напруг палаючих конвеєрних стрічок для визначення часу їхнього розриву й своєчасного гасіння автоматичною установкою, що розбризкує воду.

Методи. Теоретичне дослідження напружено-деформованого стану конвеєрних стрічок з використанням варіаційного методу рішення крайових завдань теорії пружності.

Результати. Розроблено математичну модель напружено-деформованого стану палаючих конвеєрних стрічок у вигляді циліндричної багат шарової тонкої оболонки постійної товщини з анізотропними внутрішніми та ізотропними зовнішніми шарами під дією нормальної від власної маси і осьової від натягу стрічки навантажень при шарнірних криволінійних і вільних прямолінійних краях. Отримано залежності зміни граничних напруг у часі для палаючих гумовотканинних і гумовотросових конвеєрних стрічок, при яких відбудеться їхній розрив.

Практична значущість. Розроблена математична модель напружено-деформованого стану палаючих гумовотканинних і гумотросових конвеєрних стрічок дозволяє визначити час, при якому відбудеться їхній розрив і подальше поширення пожежі довжиною конвеєра, для забезпечення необхідного часу гасіння автоматичною установкою водяного пожежогасіння.

Ключові слова: конвеєрна стрічка, пожежа, напруги, варіаційний метод, математична модель, автоматична установка, інерційність.

Purpose. Investigation of dynamics of the tensions of the burning conveyor belts to determine the time of their rupture and the well-timed fighting with the automatic water-spraying plant.

Methods. The theoretical investigation of the deflected mode of the conveyor belts with the use of the variation method of solution of the boundary problems of the theory of elasticity.

Results. The mathematical model of the deflected mode of the burning conveyor belts in the form of the cylindrical multilayer envelope of the constant thickness with the anisotropic intern and the isotropic extern layers under the influence of the loads, one of which is normal because of the own mass and another one is axial because of the belt tension by the hinged curvilinear and free rectilinear borders, has been worked out. The dependences of change of the maximum tensions in the time have been received for the burning rubber-textile and rubber-rope conveyor belts by which their rupture will occur.

Practical value. The mathematical model of the deflected mode of the burning rubber-textile and rubber-rope conveyor belts worked out permits to determine the time by which their rupture will occur and the further spread of the fire along the length of the conveyor to guarantee the necessary time of the extinguishing by means of the automatic water fire-fighting plant.

Keywords: conveyor belt, fire, tensions, variation method, mathematical model, automatic plant, persistence.