

УДК 622.822.7:622.647.2

*Е.В. Курбацкий, канд. техн. наук, замзавотделом, С.Н. Зуйкова, ведущий инж. НИИГД «Респиратор», Донецк, А.А. Гаврилко, канд. техн. наук, доцент Львовской политехники, Львов*

## КРИТЕРИЙ ЭФФЕКТИВНОГО ТУШЕНИЯ ПОЖАРОВ НА ЛЕНТОЧНЫХ КОНВЕЙЕРАХ

Сформулировано условие своевременной ликвидации пожара на ленточном конвейере и дана оценка весомости составляющих его показателей. На основании безмоментной теории цилиндрических ортотропных оболочек с использованием вариационного метода Ритца получены выражения для определения напряженно-деформированного состояния горящих резиноканевых и резиноканевых конвейерных лент под действием технологических нагрузок, являющегося основой для расчета времени их разрыва как критерия эффективного тушения пожаров.

**Ключевые слова:** пожар, горение, конвейерная лента, инерционность, прочность, ортотропная оболочка, напряжения, предельная нагрузка.

**Постановка проблемы.** Правила пожарной безопасности для предприятий угольной промышленности Украины предусматривают противопожарную защиту ленточных конвейеров как на приводных станциях, так и на линейной части. При этом установки пожаротушения должны иметь такие рабочие характеристики и так располагаться в горной выработке, чтобы обеспечить своевременную ликвидацию возникших пожаров на ранней стадии горения, а следовательно – минимизировать убытки от них.

**Анализ последних публикаций.** Анализ параметров установок локализации и тушения пожаров в выработках, оснащенных ленточными конвейерами, и соответствия между их техническими характеристиками и параметрами выработок приведен в статье [4].

**Выделение не решенных ранее частей проблемы и цель статьи.** В вышеуказанных работах не определено критическое время, после которого может наступить разрыв ленты в результате ее горения.

**Цель статьи** – распознать закономерность возникновения напряженно-деформированного состояния, на основании которой определяют время разрыва горящей конвейерной ленты.

**Изложение основного материала исследований.** В работе [2] представлены основные факторы, влияющие на вид автоматической противопожарной защиты подземных ленточных конвейеров.

В общем случае противопожарную защиту ленточного конвейера необходимо осуществлять совместно с выработкой, так как при загорании кабелей, электрооборудования, деревянных элементов пожар может распространиться по выработке.

Условие своевременной ликвидации пожара можно представить в виде неравенства времен:

$$\tau_0 + \tau_y + \tau_T < \tau_{кр}, \quad (1)$$

где  $\tau_0$  – время обнаружения пожара, с;

$\tau_y$  – инерционность срабатывания средства пожаротушения, с;

$\tau_T$  – время тушения пожара, с;

$\tau_{кр}$  – критерий своевременного тушения пожара, с.

Время обнаружения и тушения пожара на ленте конвейера определено экспериментально в реальных или близких к ним условиях конвейерной выработки [2].

В качестве критерия своевременного тушения пожара принято время, при котором происходит разрыв горячей конвейерной ленты, испытывающей внешнюю нагрузку. Этот критерий наиболее приемлем для пожаров на линейной части ленточных конвейеров, в отличие от критерия, принятого в работе [3] для пожаров в зоне приводов. Его следует определять исходя из закономерностей развития начальной стадии горения ленты и прочностных свойств материала, из которого она изготовлена.

Инерционность срабатывания установки пожаротушения можно представить следующим образом:

$$\tau_y = \tau_d + \tau_{цу} + \tau_{гч}, \quad (2)$$

где  $\tau_d$  – инерционность датчиков обнаружения пожара, с;

$\tau_{цу}$  – инерционность пусковой системы установки, связанной с преобразованием сигнала от датчика в импульс на включение установки, с;

$\tau_{гч}$  – инерционность гидравлической части установки, с.

Инерционность гидравлической части установки состоит из следующих величин (в общем случае для пенных средств):

$$\tau_{гч} = \tau_k + \tau_{дк} + \tau_{пю} + \tau_3 + \tau_{ф}, \quad (3)$$

где  $\tau_k$  – время открывания автоматического клапана, с;

$\tau_{дк}$  – время движения компонентов до устройства пенообразования, с;

$\tau_{пю}$  – время пенообразования, с;

$\tau_3$  – время заполнения трубопроводной части пеной или движения пенного потока или воды до нижней границы зоны защиты холостой ветви ленты конвейера, с;

$\tau_{\phi}$  – время полета пены до соприкосновения с фронтом пламени, с.

Такие величины, как инерционность пусковой системы установок, время открытия автоматического клапана, время полета огнетушащего вещества до соприкосновения с фронтом пламени, инерционность датчиков, время пенообразования имеют значения в пределах нескольких секунд и поэтому ими можно пренебречь. Время движения компонентов до устройства пенообразования, зависящее от места подключения установки к пожарноросительному и воздухопроводу, определяется расчетным путем по известным зависимостям.

В случае применения водяной установки согласно работе [3] ее инерционность имеет вид [2]

$$\tau_v = \tau_d + \tau_{\text{пв}} + \tau_k + \tau_c + \tau_z + \tau_{\phi}. \quad (4)$$

Здесь введено время неустановившегося движения воды в трубопроводе установки  $\tau_c$ , которое характерно при движении потоков воды.

При определении инерционности гидравлической части водяной установки следует использовать зависимости, полученные в работе [2].

Следовательно, необходимо определять  $\tau_z$ , которое зависит от конструктивного исполнения пожаротушащих установок, а следовательно, схем противопожарной защиты ленточных конвейеров.

Сложнее определять время разрыва горящей ленты. Экспериментальное решение этой задачи связано с большими трудностями ввиду сложности моделирования истинного нагружения ленты, поэтому используем аналитический метод исследования напряженно-деформированного состояния горящих резиновых и резиноканевых лент.

Экспериментальными исследованиями по воспламенению и горению конвейерных лент от поддерживающего ролика установлено, что температура загорания лент равна 340...360 °С. Будем считать, что подверженная горению часть ленты не будет воспринимать растягивающей нагрузки. Для резиноканевых лент это очевидно, а в резиновых лентах это произойдет за счет температурных удлинений тросов, находящихся в зоне высоких температур. Следовательно, произойдет перераспределение напряжений, возникающих от действия нормальной и осевой нагрузок, создающихся массой полезного ископаемого и ленты, а также ее натяжением. Это перераспределение произойдет в резиноканевой и резиновой лентах по-разному. В обоих случаях произойдет внецентренное растяжение лент, так как равнодействующая осевой нагрузки не совпадает с их осью, как при растяжении негорящих лент. В связи с этим в поперечном сечении лент возникнут нормальная сила и изгибающий момент. Однако, если в резиноканевых лентах необходимо учитывать оба компонента нагрузки, то в резиновых можно пренебречь моментом, так как он не воспринимается тросами ввиду их большой гибкости. Следовательно, в резиноканевых лентах

следует суммировать напряжение, вызванное нормальной силой и моментом, а в резинотросовых – суммарное напряжение считаем вызванным только осевым усилием.

Исходя из вышеизложенного искомой задачей является определение времени, в течение которого горящие резинотросовые или резинотканевые ленты выходят из строя под действием внешних нагрузок.

Верхняя (рабочая) ветвь ленты представляет собой многоопорную цилиндрическую ортотропную оболочку, нижняя (частный случай) – пластину, свободную от массы транспортируемого груза.

При расчете напряжений рассмотрим несколько идеализированную расчетную схему ленты, т.е. часть ленты в пределах одного пролета конвейера при следующих граничных условиях: два края имеют шарнирные опоры, два других – свободны.

В дальнейшем будем рассматривать часть рабочей ленты, так как она значительно больше нагружена.

Таким образом, задача по определению прочности горячей конвейерной ленты сводится к задаче о возникшем напряженном состоянии незамкнутой цилиндрической многослойной тонкой оболочки постоянной толщины с трансверсально изотропным наполнителем и изотропными внешними слоями под действием нормальной  $q_z$  от собственного веса и осевой  $q_x$  нагрузок при шарнирно опирающихся криволинейных и свободных прямолинейных краях.

В качестве срединной выберем поверхность, проходящую через середину оболочки в целом. Обозначим через  $u$ ,  $v$  и  $w$  перемещение точек срединной поверхности в направлениях  $x$ ,  $y$  и  $z$  соответственно.

С учетом возможных перемещений вариация полной энергии деформированной оболочки в состоянии равновесия имеет вид

$$\delta \mathcal{E} = \delta U + \delta V = 0, \quad (5)$$

где  $\delta U$ ,  $\delta V$  – вариации потенциальной энергии оболочки и потенциала внешних сил соответственно.

Вариация потенциальной энергии внешних сил:

$$\delta V = -\delta \iint q_z w ds - \delta \iint q_x u ds. \quad (6)$$

Вариация потенциальной энергии оболочки равна вариации энергии деформаций срединной поверхности  $\delta U_c$ :

$$\delta U = \delta U_c = \iint (T_1 \delta \varepsilon_1 + T_2 \delta \varepsilon_2 + T_{12} \delta \varepsilon_{12}) ds, \quad (7)$$

где  $\varepsilon_1$ ,  $\varepsilon_2$ ,  $\varepsilon_{12}$  – деформации в направлении  $x$ ,  $y$  и сдвига соответственно.

Интеграл (7) представим в виде

$$\delta U_c = \delta \iint (T_1 \varepsilon_1 + T_2 \varepsilon_2 + T_{12} \varepsilon_{12}) ds - \iint (\varepsilon_1 \delta T_1 + \varepsilon_2 \delta T_2 + \varepsilon_{12} \delta T_{12}) ds. \quad (8)$$

Введем функцию усилий с помощью соотношений

$$T_1 = \varphi''_{yy} + u^*; \quad T_2 = \varphi''_{xx}; \quad T_{12} = -\varphi''_{xy}, \quad (9)$$

где функция  $u^*$  – потенциал силы  $q_x$ , удовлетворяющая соотношению

$$q_x = -\frac{\partial u^*}{\partial x}. \quad (10)$$

С учетом преобразований, приведенных в работе [2], выражение (8) примет вид

$$\delta U_c = \frac{1}{2} \delta \iint (A_{11} T_1^2 + 2A_{12} T_1 T_2 + A_{22} T_2^2 + A_{12}^* T_{12}^2) ds, \quad (11)$$

где  $A_{11} = \frac{C_{22}}{\Delta_1}$ ;  $A_{22} = \frac{C_{11}}{\Delta_1}$ ;  $A_{12} = -\frac{C_{12}}{\Delta_1}$ ;  $A_{12}^* = \frac{1}{C_{12}^*}$ ;  $\Delta_1 = C_{11}C_{22} - C_{12}^2$ .

Учитывая выражения (5), (6) для вариации полной энергии оболочки, получим

$$\delta \mathcal{E} = -\delta \iint \left\{ \frac{1}{2} \left[ L_c(\varphi, \varphi) + L_c(\varphi, u^*) + L(w, \varphi) + q_z w \right] \right\} ds = 0. \quad (12)$$

Здесь введены следующие обозначения:

$$\left. \begin{aligned} L_c(\varphi, \varphi) &= C_{11} \varphi''_{xx}{}^2 + C_{22} \varphi''_{yy}{}^2 + 2C_{12} \varphi''_{xx} \varphi''_{yy} + 2C_{12}^* \varphi''_{xy}{}^2; \\ L_c(\varphi, u^*) &= u^* \left[ C_{22} (2\varphi''_{yy} + u^*) + 2C_{12} \varphi''_{xx} \right]; \\ L(w, \varphi) &= R_0^{-1} w'_x \varphi'_x; \\ C_{jj} &= h^i B_{jj}^i, \quad C_{12} = h^i B_{12}^i, \quad C_{12}^* = h^i G_{12}^i, \\ B_{11}^i &= E_x^i / \Delta, \quad B_{22}^i = E_y^i / \Delta, \quad B_{12}^i = G_{12}^i, \quad \Delta = 1 - \nu_x^i \nu_y^i, \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

где  $i$  – количество слоев ленты.

Штрихи в выражениях (13) обозначают кратные производные.

Из уравнения (12) следует, что главными краевыми условиями для функции  $w$  являются

$$w \Big|_{\Gamma} = w_0; \quad w' \Big|_{\Gamma} = w'_0, \quad (14)$$

где  $w_0, w'_0$  – заданные функции;

$\Gamma$  – контур срединной поверхности оболочки.

Главным краевым условием для функции усилий  $\varphi$ , если край оболочки свободен, является

$$\varphi \Big|_{\Gamma} = \varphi' \Big|_{\Gamma} = 0. \quad (15)$$

Искомые функции по методу Ритца представим в виде

$$\left. \begin{aligned} w(x, y) &= \sum_{j=1}^n a_j f_j(x) q_j(y); \\ \varphi(x, y) &= \sum_{j=1}^m b_j p_j(x) q_j(y). \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

Здесь  $a_j, b_j$  – неопределенные параметры;

$f_j, \dots, q_j$  – заданные координаты функции.

Подставляя выражения (16) в (11) и приравнявая нулю производные по параметрам от интеграла по срединной поверхности, придем к системе линейных алгебраических уравнений относительно  $a_j, b_j$ .

Вводя безразмерные величины и константы по формулам

$$\left. \begin{aligned} w &= l_0 \bar{w}, \quad \varphi = 2E\delta l_0 \bar{\varphi}, \quad u^* = 2u_0 \bar{u}^*, \quad x = l_0 \bar{x}, \quad y = b_0 \bar{y}, \\ C_{jk} &= 2C_0 \alpha_{jk}, \quad C_{12}^* = 2C_0 \bar{\alpha}_{12}^*, \quad q_z = 2q_0 \bar{q}_z, \\ \beta_{jk} &= \frac{\bar{\alpha}_{jk}}{\Delta_2}, \quad \beta_{12} = -\frac{\bar{\alpha}_{12}}{\Delta_2}, \quad \beta_{12}^* = \frac{1}{\alpha_{12}^*}, \quad \Delta = \bar{\alpha}_{11} \bar{\alpha}_{22} - \bar{\alpha}_{12}^2, \\ C_0 &= -\frac{12(1-\nu^2)R_0^2}{\delta_0^2}, \quad t_0 = \frac{l_0}{R_0}, \quad K_0 = \frac{l_0}{b_0}, \quad \rho_0 = \frac{q_0 l_0^3}{D_0}, \quad D_0 = \frac{E\delta_0^3}{12(1-\nu^2)} \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

и опуская в дальнейшем черту в обозначениях безразмерных величин, эту систему приведем к виду

$$\left. \begin{aligned} C_0 \sum_{j=1}^n b_j \iint KM ds &= \rho_0 \iint q_z f_i q_i ds; \\ C_0 \left( \sum_{j=1}^n a_j \iint R s ds + \sum_{j=1}^m b_j \iint \sum_{r=1}^5 P_r Q_r ds \right) &= \iint \sum_{r=1}^2 T_r ds. \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

Здесь

$$\left. \begin{aligned} K &= f_i' q_i; \quad M = P_j' q_j; \quad R = P_j' q_j; \quad s = f_i' q_i; \\ P_1 &= P_2 = P_i'' q_i; \quad P_3 = P_4 = P_i q_i; \quad P_5 = P_i q_i; \\ Q_1 &= \beta_{11} P_j'' q_j; \quad Q_2 = K_0^2 \beta_{12} P_j q_j; \quad Q_3 = K_0^2 \beta_{12} P_j'' q_j; \\ Q_4 &= K_0^4 \beta_{22} P_j q_j; \quad Q_5 = K_0^2 \beta_{12}^* P_j' q_j; \\ T_1 &= K_0^2 \beta_1 \beta_{22} u^* P_i q_i; \quad T_2 = \beta_1 \beta_{12} u^* P_i'' q_i; \quad C_1 = C_0 t_0^3. \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

Для  $i$ -го слоя оболочки напряжения имеют вид

$$\left. \begin{aligned} \sigma_x^i &= \sum_{j=1}^m b_j (K_0^2 \beta_1 P_j q_j'' + \beta_2 P_j'' q_j) + \frac{1}{2C_0} \beta_1 u^*; \\ \sigma_y^i &= \sum_{j=1}^m b_j (K_0^2 \beta_3 P_j q_j'' + \beta_4 P_j'' q_j) + \frac{1}{2C_0} \beta_3 u^*; \\ \sigma_{xy}^i &= -K_0 B_{12}^{*i} \beta_{12} \sum_{j=1}^m b_j P_j'' q_j. \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

Здесь

$$\left. \begin{aligned} \beta_1 &= B_{11}^i \beta_{22} + B_{12}^i \beta_{12}; \quad \beta_2 = B_{11}^i \beta_{12} + B_{12}^i \beta_{11}; \\ \beta_3 &= B_{12}^i \beta_{22} + B_{22}^i \beta_{12}; \quad \beta_4 = B_{12}^i \beta_{12} + B_{22}^i \beta_{11}. \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

Для резиновых лент суммарные напряжения определяют выражениями (25), а для резинотканевых – дополнительно от момента  $P_{y_0}$

$$\sigma_x = \frac{P_{y_0} y}{I_z}, \quad (22)$$

где  $P$  – сосредоточенная сила, действующая в срединной поверхности ленты, Н;

$y_0$  – координата приложения равнодействующей внешней силы  $P$ , м;

$y$  – произвольная координата, м;

$I_z$  – момент инерции сечения ленты, определяемый из выражения, м<sup>4</sup>,

$$I_z = \frac{hb^3(t)}{12}, \quad (23)$$

здесь  $b(t) = b - b_1(t)$ , (24)

где  $b_1(t)$  – ширина горения ленты во времени, м, закон изменения которой приведен в работах [1, 2].

**Вывод.** Раскрыта закономерность возникновения напряженно-деформированного состояния горения резиноканальных и резиноканальных конвейерных лент, на основании которой можно определить время их разрыва, т. е. критерий эффективного тушения пожаров на ленточных конвейерах. В дальнейшем для получения результатов исследований необходимо определить действующие нагрузки, механические характеристики материалов слоев ленты и координатные функции.

#### Список литературы

1. Исследование динамики горения конвейерной ленты и температурного поля горной выработки / Е.В. Курбацкий, А.П. Стадник, В.А. Оскаленко, О.Ф. Дольнова. – Донецк, 1982. – 7 с. – Деп. в ЦНИЭИУголь 14.09.82, № 2479.

2. Курбацкий Е.В. Автоматические водопенные средства ликвидации пожаров на всем протяжении подземных ленточных конвейеров: дис. ... канд. техн. наук: 05.26.01/ Е.В. Курбацкий. – Макеевка, 1988. – 239 с.

3. Поздняков К.И. Исследование параметров и разработка рекомендаций по повышению эффективности работы установки водяного пожаротушения для угольных шахт: дис. ... канд. техн. наук: 05.26.01/ К.И. Поздняков. – Макеевка, 1981. – 203 с.

4. 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.