

УДК 622.64:614.8.084:614.849

А.А. КЛЫЧКОВ (ст. науч. сотр. НИИГД)
И.Ф. ДИКЕНШТЕЙН (ст. науч. сотр. НИИГД)
О.Э. ТОЛКАЧЕВ (доц.)

Донецкий национальный технический университет, Донецк

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ СИСТЕМЫ КОНВЕЙЕРНАЯ ЛЕНТА – ПРИВОДНОЙ БАРАБАН ЛЕНТОЧНОГО КОНВЕЙЕРА ПРИ ПРОСКЛЬЗЫВАНИИ

Приведено решение краевой задачи теплопроводности с граничным условием третьего рода о нагревании системы конвейерная лента – барабан при проскальзывании (пробуксовке) приводного барабана ленточного конвейера. Получены зависимости для расчета температуры барабана и ленты при возникновении опасного теплового импульса на границе их контакта.

Результаты исследования представляют практический интерес для разработки пожарно-профилактических мероприятий при эксплуатации ленточных конвейеров и требований к системам автоматического пожаротушения на приводах и натяжных станциях шахтных конвейеров.

Ключевые слова: тепловой импульс, пожарная опасность, конвейерная лента, приводной барабан, ленточный конвейер, проскальзывание, пробуксовка.

Постановка проблемы

Анализ пожаров, возникающих в шахтах на ленточных конвейерах, показывает, что загорание конвейерных лент возможны от двух источников зажигания:

– внешних, возникающих при загорании шахтной деревянной крепи, угля, электрических кабелей и других горючих предметов и веществ, когда в зоне горения находится конвейер;

– образующихся при работе самих конвейеров, в основном от трения конвейерной ленты на барабанах, неисправных роlikоопорах, металлических конструкциях става конвейера.

При перегрузках ленточного конвейера, его заштыбках, заклинивании поддерживающих роlikоопор, сходе лент, неисправности тормозных шкивов и элементов колодок тормозных устройств или иных нарушениях нормальной работы конвейера происходит частичная или полная пробуксовка с выделением теплоты и пожарным нагреванием оболочки приводного барабана. При этом возможно воспламенение угольного штыба и конвейерной ленты. По этой причине на шахтах Российской Федерации, например, возникает 64% всех пожаров на ленточных конвейерах [1], на польских шахтах – до 45% [2].

На угольных шахтах Украины за последние годы по этой причине произошло 8 пожаров со среднегодовым ущербом 128 тыс. грн. [3].

Поэтому представляет интерес определение степени нагревания системы лента- барабан при проскальзывании (пробуксовка). Сравнивая температуру нагрева конвейерной ленты с температурой ее воспламенения, можно определить, насколько лента пожароопасна. Определение температуры барабана и теплового потока, отдаваемого им во внешнюю среду, позволяет сформировать требования к автоматическим средствам пожаротушения приводных станций ленточных конвейеров (инерционность и расположение тепловых датчиков, необходимая интенсивность орошения и т.д.).

Анализ исследований и публикаций

В работе [4] аналитически определялась температура приводного барабана при его пробуксовке, а также изменение плотности теплового потока, возникающего при трении. Однако в данном исследовании было сделано довольно грубое допущение о том, что при нагревании системы лента-барабан, температура состав-

ляющих этой системы по всей толщине имеет одно и то же значение для каждого момента времени (то есть теплоемкость материала барабана и ленты близка к бесконечности).

В работе [5] при учете только реакционного слоя лены, нагреваемого до высокой температуры удалось несколько уточнить расчетные значения, приблизив их к фактическим данным.

Таким образом, указанные расчетные методы позволяют определить температуру ленты и барабана только ориентировочно.

Поэтому целесообразно на основе процесса теплопередачи рассмотреть нагревание при пробуксовке системы лента-барабан, рассчитать максимальную температуру на поверхности контакта ленты и барабана, изменение температуры по их толщине, плотность тепловых потоков.

Изложение материала исследования

Представим нагревание системы лента-барабан следующим образом. Две неограниченные пластины толщиной R_1 и R_2 с различными теплофизическими характеристиками соприкасаются друг с другом. Начальная температура пластин одинаковая и равна температуре окружающей среды. В начальный момент времени на границе соприкосновения пластин начинает действовать тепловой источник. На свободных поверхностях происходит конвективный теплообмен по закону Ньютона. Выбрав начало координат в плоскости соприкосновения пластин, краевую задачу запишем в виде:

$$\frac{\partial t_1(x, \tau)}{\partial \tau} = a_1 \frac{\partial^2 t_1(x, \tau)}{\partial x^2}, \quad (\tau > 0, 0 \leq x \leq R_1); \quad (1)$$

$$\frac{\partial t_2(x, \tau)}{\partial \tau} = a_2 \frac{\partial^2 t_2(x, \tau)}{\partial x^2}, \quad (\tau > 0, -R_2 \leq x \leq 0); \quad (2)$$

$$t_1(x, 0) = t_2(x, 0) = t_c; \quad (3)$$

$$\lambda_1 \frac{\partial t_1(R_1, \tau)}{\partial x} + \alpha_1 [t_1(R_1, \tau) - t_c] = 0; \quad (4)$$

$$-\lambda_2 \frac{\partial t_2(-R_2, \tau)}{\partial x} + \alpha_2 [t_2(-R_2, \tau) - t_c] = 0; \quad (5)$$

$$t_1(0, \tau) = t_2(0, \tau); \quad (6)$$

$$\lambda_1 \frac{\partial t_1(0, \tau)}{\partial x} - \lambda_2 \frac{\partial t_2(0, \tau)}{\partial x} + q = 0; \quad (7)$$

где t_1, t_2 – температура ленты и барабана, соответственно, °C;

λ_1, λ_2 – коэффициенты теплопроводности материала ленты и барабана, $\frac{Вт}{м^2 \cdot c}$;

a_1, a_2 – коэффициенты температуропроводности материала ленты

и барабана, $\frac{м^2}{c}$;

x – пространственная координата, м;

τ – время, с;

t_c – начальная температура, равная температуре окружающей среды, °с;

α_1, α_2 – коэффициент теплоотдачи от свободной поверхности ленты и

барабана, соответственно, $\frac{Вт}{м^2 \cdot К}$;

$q = \text{const}$ – плотность теплового потока, $\frac{Вт}{м^2}$.

Для решения задачи (1) – (7) применим итерационное преобразование Лапласа. Краевая задача в изображениях будет иметь следующий вид

$$U_1''(x, S) - \frac{S}{a_1} U_1(x, S) = 0 \quad ; \quad (8)$$

$$U_2''(x, S) - \frac{S}{a_2} U_2(x, S) = 0 \quad ; \quad (9)$$

$$\lambda_1 U_1'(R_1, S) + \alpha_1 U_1(R_1, S) = 0 \quad ; \quad (10)$$

$$-\lambda_2 U_2'(-R_2, S) + \alpha_2 U_2(-R_2, S) = 0 \quad ; \quad (11)$$

$$U_1(0, S) = U_2(0, S) \quad ; \quad (12)$$

$$\lambda_1 U_1'(0, S) - \lambda_2 U_2'(0, S) + \frac{q}{S} = 0 \quad ; \quad (13)$$

Решение обыкновенных дифференциальных уравнений (8) – (9) имеет вид

$$U_1(x, S) = A ch \sqrt{\frac{S}{a_1}} x + B \Delta h \sqrt{\frac{S}{a_1}} x \quad ; \quad (14)$$

$$U_2(x, S) = Cch\sqrt{\frac{S}{a_2}}x + D\Delta h\sqrt{\frac{S}{a_{21}}}x; \quad (15)$$

где А, В, С, D – постоянные относительно х коэффициенты. Определяя их из начальных и граничных условий, получим решение краевой задачи в пространстве изображения.

$$U_1(x, S) = \frac{q}{\lambda_2 q_2 S} \cdot \frac{(q_2 chq_2 R_2 + H_2 shq_2 R_2) \cdot [q_1 chq_1 (x - R_1) - H_1 shq_1 (x - R_1)]}{Z}; \quad (16)$$

$$U_2(x, S) = \frac{q}{\lambda_2 q_2 S} \cdot \frac{(q_1 chq_1 R_1 + H_1 shq_1 R_1) \cdot [q_2 chq_2 (x + R_2) + H_2 shq_2 (x - R_2)]}{Z}; \quad (17)$$

где обозначено:

$$q_1 = \sqrt{\frac{S}{a_1}}; \quad q_2 = \sqrt{\frac{S}{a_2}}; \quad H_1 = \frac{\alpha_1}{\lambda_1}; \quad H_2 = \frac{\alpha_2}{\lambda_2};$$

$$Z = K_\varepsilon (q_1 shq_1 R_1 + H_1 chq_1 R_1) \cdot (q_2 chq_2 R_2 + H_2 shq_2 R_2) + \\ + (q_1 chq_1 R_1 + H_1 shq_1 R_1) \cdot (q_2 shq_2 R_2 + H_2 chq_2 R_2);$$

$$K_\varepsilon = K_\lambda K^{\frac{1}{2} \frac{1}{a}}; \quad K_\lambda = \frac{\lambda_1}{\lambda_2}; \quad K = \frac{\lambda_1}{\lambda_2}.$$

Выражения (16) – (17) можно представить в виде отношений сходящихся степенных рядов относительно величины S, показатели, степени которых являются натуральными числами. Поэтому для перехода к оригиналам можно воспользоваться обобщенной теоремой разложения.

Ищем вычеты функций $e^{st} \cdot u(x, s)$ в полюсах $s_0, s = s_k (k = 1, 2, \dots)$

Вычет в полюсе $s_0=0$ в соответствии с теоремой о конечном значении оригинала

$$Res_{s=0} [e^{s\tau} u_1(x, s)] = \lim_{s \rightarrow 0} [s e^{s\tau} u_1(x, s)] = q \frac{(1 + H_2 R_2) [1 - H_1 (x - R_1)]}{\alpha_1 (1 + H_2 R_2) + \alpha_2 (1 + H_1 R_1)}; \quad (18)$$

$$Res_{\tau=0} [e^{s\tau} u_2(x, s)] = \lim_{\tau \rightarrow 0} [\tau e^{s\tau} u_2(x, s)] = q \frac{(1 + H_1 R_1) [1 - H_2 (x - R_2)]}{\alpha_1 (1 + H_2 R_2) + \alpha_2 (1 + H_1 R_1)}; \quad (19)$$

Вычеты в полюсах $s=s_k$

$$\operatorname{Res}_{s=s_k} [e^{s\tau} u(x, s)] = \frac{F(s_k)}{\varphi'(s_k)}, \quad (20)$$

где $u(x, s) = \frac{F(s_k)}{\varphi'(s_k)}$

Учитывая, что $s_k = -\frac{\mu_k^2 \cdot a_2}{R_2^2}$, получим решение для оригиналов как сумму вы-

четов во всех особых точках.

$$t_1(x, \tau) = t_c + q \frac{(1 + H_2 R_2)[1 - H_1(x - R_1)]}{\alpha_1(1 + H_2 R_2) + \alpha_2(1 + H_1 R_1)} - \frac{2q}{\lambda_2 K_a^{\frac{1}{2}}} \times$$

$$\times \sum_{k=1}^{\infty} \frac{e^{-\mu_k^2 F_{O_1}}}{\mu_k^2 \varphi(\mu_k)} \left\{ \left[K_a^{\frac{1}{2}} \cos(K_a^{\frac{1}{2}} K_R \mu_k) + \frac{H_2 R_1}{\mu_k} \sin(K_a^{\frac{1}{2}} K_R \mu_k) \right] \times \left[\mu_k \cos\left(\frac{x - R_1}{R_1} \mu_k\right) - H_1 R_1 \sin\left(\frac{x - R_1}{R_1} \mu_k\right) \right] \right\} \quad (21)$$

$$t_2(x, \tau) = t_c + q \frac{(1 + H_1 R_1)[1 - H_2(x - R_2)]}{\alpha_1(1 + H_2 R_2) + \alpha_2(1 + H_1 R_1)} - \frac{2q}{\lambda_2 K_a^{\frac{1}{2}}} \times$$

$$\times \sum_{k=1}^{\infty} \frac{e^{-\mu_k^2 F_{O_1}}}{\mu_k^2 \varphi(\mu_k)} \left\{ \left[K_a^{\frac{1}{2}} \cos(K_a^{\frac{1}{2}} K_R \mu_k) + \frac{H_1 R_1}{\mu_k} \sin(K_a^{\frac{1}{2}} K_R \mu_k) \right] \times \left[\mu_k \cos\left(\frac{x - R_2}{R_2} \mu_k\right) - H_2 R_1 \sin\left(\frac{x - R_2}{R_2} \mu_k\right) \right] \right\} \quad (22)$$

где

$$\varphi(\mu_K) = \left[K_e K_a^{\frac{1}{2}} \left(\frac{2}{R_1} + H_1 + K_R H_2 \right) + H_2 + H_1 K_a K_R \right] \sin \mu_K \cos(K_a^{\frac{1}{2}} K_R \mu_K) -$$

$$- \left\{ \frac{\mu_K}{R_1} K_a^{\frac{1}{2}} (K_e K_a^{\frac{1}{2}} + 1) - \frac{1}{\mu_k} \left[K_e H_2 (1 + H_1 R_1) + K_a^{\frac{1}{2}} H_1 (1 + H_2 R_2) \right] \right\} \times$$

$$\times \sin \mu_K \sin(K_a^{\frac{1}{2}} K_R \mu_K) + \left\{ \frac{\mu_K}{R_1} K_a^{\frac{1}{2}} (K_e + K_a^{\frac{1}{2}} K_R) -$$

$$- \frac{1}{\mu_K} \left[K_e K_a^{\frac{1}{2}} H_1 (1 + H_2 R_2) + (1 + H_1 R_1) \right] \right\} \cos \mu_K \cos(K_a^{\frac{1}{2}} K_R \mu_K) +$$

$$+ \left[K_e (H_2 + K_a K_R H_1) + K_a^{\frac{1}{2}} \left(\frac{2}{R_1} + H_1 + H_2 K_R \right) \right] \cos \mu_K \sin(K_a^{\frac{1}{2}} K_R \mu_K);$$

$$F_{O_1} = \frac{a_1 \tau}{R_1^2}; \quad F_{O_2} = \frac{a_2 \tau}{R_2^2}; \quad K_R = \frac{R_2}{R_1};$$

μ_k - корни характеристического уравнения.

$$K_e \left(H_1 \cos \mu - \frac{\mu}{R_1} \sin \mu \right) \left[\frac{\mu}{R_2} K_a^{\frac{1}{2}} K_R \cos(K_a^{\frac{1}{2}} K_R \mu) + H_2 \sin(K_a^{\frac{1}{2}} K_R \mu) \right] +$$

$$+ \left(\frac{\mu}{R_1} \cos \mu - H_1 \sin \mu \right) \left[H_2 \cos(K_a^{\frac{1}{2}} K_R \mu) - \frac{\mu}{R_2} K_a^{\frac{1}{2}} K_R \sin(K_a^{\frac{1}{2}} K_R \mu) \right] = 0 \quad (23)$$

Ряд, входящий в решение (21) – (22), быстро сходится, Поэтому практических расчетов можно ограничиться суммой первых двух членов, Максимальную температуру нагревания системы получаем, полагая в (21) – (22) $x=0$.

Расчеты, выполненные на ПЭВМ для условия полного проскальзывания металлического барабана без футеровки, относительно резиновой ленты показали следующее:

1. Максимальная температура на границе системы лента-барабан (рис.1) достиг значения $t_{\max}=420^\circ\text{C}$. При 100% проскальзывании за время $\tau \cong 1,5\text{ч}$. (при допущении, что термодеструкция ленты отсутствует). Поэтому необходимое условие пожаробезопасности лент

$$t_{\text{воспл.}} > t_{\max} \quad (24)$$

где $t_{\text{воспл.}}$ – температура воспламенения резиновых обкладок ленты, ос.

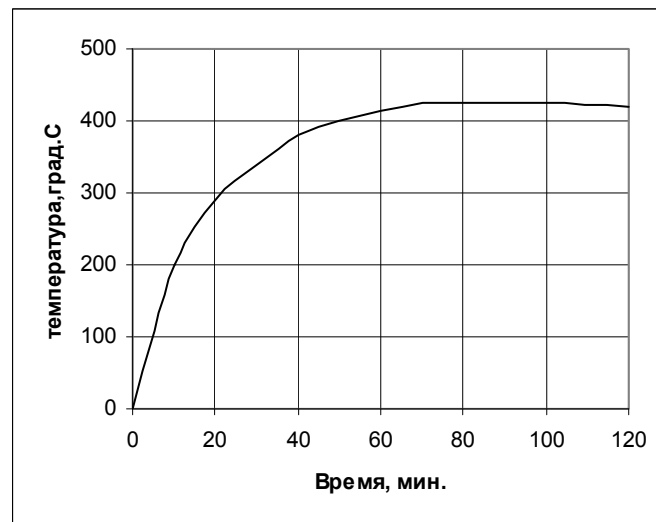


Рис. 1. Изменение температуры на границе системы: барабан-конвейерная лента в режиме полного проскальзывания.

2. За счет высокой теплопроводности металла температура барабана практически одинакова по всей толщине (рис.2). Поэтому существует большая опасность воспламенения горючих материалов, которые могут находиться в контакте со свободной поверхностью барабана, например, угольная пыль.

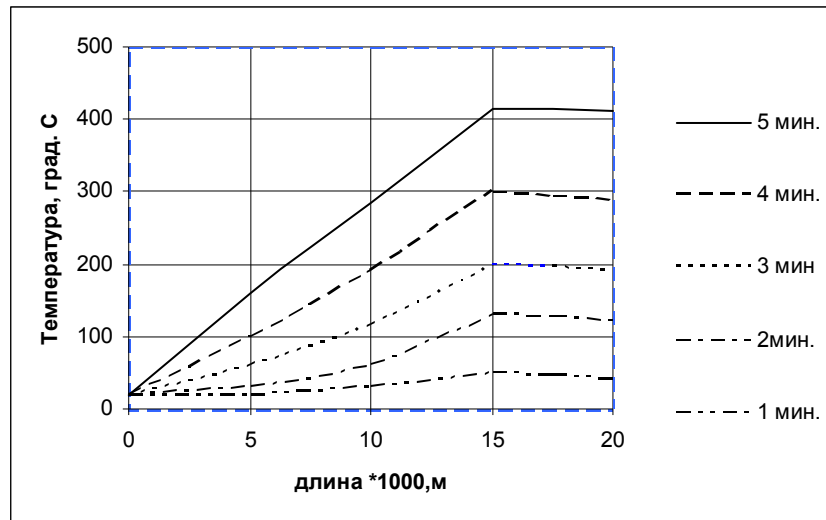


Рис. 2. Изменение температуры лента-барабан в режиме полного проскальзывания ($0 \leq x \leq 15$ – конвейерной ленты, $15 \leq x \leq 20$ – барабана)

3. В начальной стадии процесса происходит прогрев конвейерной ленты только в поверхностном слое. При $\tau > 600 - 900K$ происходит высокотемпературное нагревание внутренних слоев ленты (тканевая основа, скиджевая резина), имеющих более высокую температуру, по сравнению с поверхностным слоем горючим.

4. При возникновении пробуксовки образуются два противоположно направленных тепловых потока, плотности которых вначале равны. По мере нагрева системы плотность потока, направленного к поверхности барабана растет при одновременном уменьшении плотности противоположного теплового потока. При достаточно установившемся режиме большая часть образующихся при притоке тепла (до 70%) будет поступать на нагревание барабана и через его свободную поверхность передаваться окружающей среде.

5. Температура свободной поверхности ленты практически не изменяется. Поэтому ленту можно считать полуограниченным телом.

Тогда вместо граничного условия третьего рода (4) имеем граничные условия первого рода

$$t_1(R_1, \tau) = t_c \quad (24)$$

В этом случае изменений краевая задача имеет следующее решение

$$t_1(x, \tau) = t_c + q \frac{(1 + H_2 R_2)(R_1 - x)}{\lambda_1(1 + H_2 R_2) + \alpha_2 R_1} - \frac{2qR_1^2}{\lambda_2 K_a^{\frac{1}{2}}} \sum_{k=1}^{\infty} e^{-\mu^2 Fo_1} \times$$

$$\times \frac{\left[\frac{H_2 R_1}{\mu_k} \sin(K_R K_a^{\frac{1}{2}} \mu_k) + K_a^{\frac{1}{2}} \cos(K_R K_a^{\frac{1}{2}} \mu_k) \right] \sin\left(\frac{R_1 - x}{R_1} \mu_k\right)}{\mu_k^2 \varphi(\mu_k)}; \quad (26)$$

$$t_2(x, \tau) = t_c + q \frac{R_1(1+H_2)(R_2+x)}{\lambda_1(1+H_2R_2) + \alpha_2R_1} - \frac{2qR_1^2}{\lambda_2K_a^{\frac{1}{2}}} \sum_{k=1}^{\infty} e^{-\mu^2 K_a K_R^2 Fo_2} \times$$

$$\times \frac{\sin \mu_k \left[\frac{H_2 R_1}{\mu_k} \sin \left(K_R K_a^{\frac{1}{2}} \frac{R_2+x}{R_2} \mu_k \right) + K_a^{\frac{1}{2}} \cos \left(K_R K_a^{\frac{1}{2}} \frac{R_2+x}{R_2} \mu_k \right) \right]}{\mu_k^2 \varphi(\mu_k)}; \quad (27)$$

где

$$\varphi(\mu_k) = [K_\lambda R_1 + K_a R_2] \sin \mu_k \cos \left(K_a^{\frac{1}{2}} K_R \mu_k \right) + \frac{R_1}{\mu_k} \left[K_e R_1 H_2 + K_a^{\frac{1}{2}} (1 + H_2 R_2) \right] \sin \mu_k \times$$

$$\times \sin \left(K_a^{\frac{1}{2}} K_R \mu_k \right) - \frac{R_1}{\mu_k} \left[K_\lambda (1 + H_2 R_2) + H_2 R_1 \right] \cos \mu_k \cos \left(K_a^{\frac{1}{2}} K_R \mu_k \right) +$$

$$+ K_a^{\frac{1}{2}} (K_\lambda R_2 + R_1) \cos \mu_k \sin \left(K_a^{\frac{1}{2}} K_R \mu_k \right);$$

μ_k - корни характеристического уравнения.

$$K_e \cos \mu \left[K_a^{\frac{1}{2}} K_R \mu \cos \left(K_a^{\frac{1}{2}} K_R \mu \right) + H_2 R_2 \sin \left(K_a^{\frac{1}{2}} K_R \mu \right) \right] +$$

$$+ \sin \mu \left[H_2 R_2 \cos \left(K_a^{\frac{1}{2}} K_R \mu \right) - K_a^{\frac{1}{2}} K_R \mu \sin \left(K_a^{\frac{1}{2}} K_R \mu \right) \right] = 0. \quad (28)$$

В решении (26) – (27) ряд быстро сходится, поэтому для практических расчетов можно ограничиться двумя первыми членами. Значения температур, полученным по выражениям (21) – (22) и (26) – (27), практически не отличаются, что свидетельствует о правомерности допущения (25).

Выводы

Получено решение о нагревании системы: конвейерная лента – вращающийся барабан в различных режимах проскальзывания. Установлены закономерности изменения температуры системы, что позволяет производить оценку пожароопасности при работе шахтного конвейера и сформулировать требования к автоматическим средствам пожаротушения приводных и натяжных станций.

Список использованной литературы

1. Юрченко В.М. Новый взгляд на причины пожаров на шахтных конвейерах / В.М. Юрченко // Уголь. – 2003. – №2 – С. 56-59.
2. Wachowicz Jan / Okreslenie czynnykow powodujacych zagrozenie powstawanie pozarow tasm przenosnikowych w koralniach wegla / Jan Wachowicz // Pr. Nauk. Gl. Inst. Gor. – 1997. – № 816. – S.3-10.
3. Ющенко Ю.Н. Предупреждение пожароопасного нагревания приводного барабана ленточного конвейера / Ю.Н. Ющенко, А.Н. Прима, И.Ф. Дикенштейн // Горноспасательное дело: Сб. науч. тр. – 2011. – Вып. 48. – С. 106-114.
4. Козлюк А.И. Определение температуры приводного барабана ленточного конвейера при его пробуксовке / А.И. Козлюк, Г.Д. Галдобин, В.В. Мамаев // Техника безопасности, охрана труда и горноспасательное дело. – 1977. – №7. – С. 17-19.
5. Балтайтис В.Я. Исследование пожарной опасности при прскальзывании ленты на приводном барабане / В.Я. Балтайтис, М.Ю. Маркович, В.В. Мамаев // Уголь Украины. – 1981. – №11. – С. 32-33.

Надійшла до редакції 28.11.2013

А.А. Кличков, І.Ф. Дікенштейн, О.Е. Толкачов

ВИЗНАЧЕННЯ ТЕМПЕРАТУРИ СИСТЕМИ «КОНВЕЙЕРНА СТРІЧКА – ПРИВІДНИЙ БАРАБАН СТРІЧКОВИХ КОНВЕЄРІВ» ПРИ ПРОСЛИЗАННІ

Наведено рішення крайової задачі теплопровідності з граничною умовою третього роду при нагріванні системи конвеєрна стрічка – барабан при прослизанні (пробуксовці) приводного барабана стрічкового конвеєра. Отримано залежності для розрахунку температури барабана і стрічки при виникненні небезпечного теплового імпульсу на кордоні їх контакту.

Результати дослідження становлять практичний інтерес для розробки пожежно-профілактичних заходів при експлуатації стрічкових конвеєрів і вимог до систем автоматичного пожежогасіння на приводах і натяжних станціях шахтних конвеєрів.

Ключові слова: тепловий імпульс, пожежна небезпека, конвеєрна стрічка, приводний барабан, стрічковий конвеєр, прослизання, пробуксовка.

A. A. Klychkov, I.F. Dickenstein, O.E. Tolkachev

DETERMINING THE TEMPERATURE OF THE “CONVEYOR BELT - DRIVE PULLEY” SYSTEM IN CASE OF SLIPPING

The paper provides the solution of the boundary problem of heat conduction with the boundary condition of the third kind during heating of the “conveyor belt - drive pulley” system in case of drive pulley slipping. We obtained the dependences for calculating the temperature of the pulley and the belt in case of a dangerous heat pulse on the border of their contact.

Keywords: thermal pulse, fire hazard, conveyor belt, drive pulley, belt conveyor, slip.