

УДК 621.867.2-408.3:614.841.24

ТЕПЛООБМЕН ПРИВОДНОГО БАРАБАНА И КОНВЕЙЕРНОЙ ЛЕНТЫ ПРИ ЕЕ ПОЛНОЙ ПРОБУКСОВКЕ

Толкачѳв О.Э., к.т.н., доц., доцент кафедры вычислительной математики и программирования
ГВУЗ «Донецкий национальный технический университет»,

Клычков А.А., с.н.с., **Дикенштейн И.Ф.**, с.н.с.,
НИИГД «Респиратор» МЧС ДНР

В статье рассматривается нестационарная одномерная задача идеального термического контакта двух тел (футеровочный барабан-лента). Общее граничное условие учитывает тепловые потоки в барабан, ленту и, за счет вынужденной конвекции при вращении барабана, в окружающую среду. Полученное решение можно использовать для оценки времени, необходимого для нагрева трущихся поверхностей до пожароопасных температур. Получена оценка скорости нарастания конвективного потока тепла со свободной поверхности барабана.

Ключевые слова: трение, нагрев, футеровка, приводной барабан, пожароопасность, аналитическая модель, температура, конвекция.

Постановка проблемы и ее связь с актуальными научными и практическими исследованиями.

Ленточный конвейер является сложным транспортным агрегатом, содержащим в своем составе электрические приводы с маслозаполненными редукторами, электрическую аппаратуру управления, пусковую аппаратуру, кабели, став с большим количеством роликоопор, приводными и натяжными барабанами, Турбо- или гидромуфтами, а также конвейерную ленту, протяженную по всей длине става и, следовательно, по большой длине горных выработок, содержащую в своем составе значительный объем горючих материалов, способных, при определенных условиях, гореть и выделять большое количество токсичных продуктов горения.

Статистика подземных экзогенных пожаров в выработках, оборудованных ленточными конвейерами, представлена в табл. 1.

Таблица 1
Количество экзогенных пожаров на конвейерах в угольных шахтах Украины за 2004-2011 гг.

| Причина возникновения пожара | 2004 | 2005 | 2006 | 2007 | 2008 | 2009 | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 | Итого |
|--|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|
| Трение конвейерных лент, в том числе | 3 | 1 | 1 | 1 | 3 | 1 | 1 | 3 | - | - | 14 |
| Пробуксовка ленты на приводных барабанах | 2 | - | 1 | - | 2 | 1 | 1 | 3 | - | - | 10 |

Таким образом, за 10 лет произошло 14 пожаров на ленточных конвейерах, в том числе 10 по причине пробуксовки ленты на приводных барабанах.

Эти пожары наносят значительный ущерб. Так, пожар, случившийся 10.05.2011г. в конвейерном уклоне пл К5 «Перевальская» ГП ОД «Луганскуглереструктуризация», причинил ущерб в сумме 1036 тыс. грн., а пожар, произошедший 11.06.2011г. в 37-м западном конвейерном штреке шахты «Суходольская-Восточная» ш/у «Суходольское Восточное» ПАО «Краснодонуголь», – более 7,6 млн. грн.

Анализ пожаров, произошедших в шахтах на ленточных конвейерах, показывает, что загорание конвейерных лент возможно от двух источников воспламенения:

- внешних источников, образующихся при загорании шахтной деревянной крепи, угля, электрических кабелей или других горючих объектов и веществ, когда в зоне горения находится конвейер и, следовательно, конвейерная лента;

- источников, образующихся при работе самих конвейеров, в основном от трения ленты на барабанах конвейера, неисправных роликоопорах, металлических конструкциях става конвейера и т.п.

Изложение основного материала исследования. Для загорания ленты в ее агрегатном состоянии от внешних источников необходимо длительное действие мощного источника с температурой в сотни градусов. Загорание ленты от источников, образующихся при работе конвейера, как правило, происходит при относительно малой мощности и значительно более низких температурах. Это объясняется тем, что в этом

случае происходит первичное загорание не целой ленты в ее агрегатном состоянии, а мелкодисперсных частиц, которые образуются при истирании поверхности или бортов ленты. Такое истирание происходит либо в результате пробуксовки (проскальзывания) ленты на барабане конвейера, либо при трении борта ленты о различные предметы, в том числе металлические конструкции става конвейера.

Пробуксовка ленты может произойти вследствие заштыбовки футеровки приводных барабанов и при недостаточном натяжении ленты, когда образуется ее «слабина», особенно если происходит защемление ленты по длине става конвейера. При пробуксовке теряется механическая связь ленты с барабаном, лента может быть вовсе остановлена, тогда как барабан продолжает вращаться и интенсивно истирает поверхность ленты с образованием мелкодисперсных фракций и пыли. Эти фракции и пыль оседают внизу барабана, барабан от трения нагревается, и при его остановке происходит контактный нагрев мелкодисперсных частиц истирания ленты, вызывающий в начальной стадии сначала процесс тления, а затем и пламенного возгорания. Если же в этой зоне имеется достаточное количество горючего материала, то в дальнейшем происходит загорание всей ленты, деревянной крепи и других горючих изделий и материалов.

Особенно интенсивное истирание ленты и образование большого количества мелкодисперсных частиц происходит, если под вращающийся барабан затягивается петля ленты или оторвавшаяся ее часть.

Приводной барабан при пробуксовке ленты нагревается до температуры ($t > 300 \text{ }^\circ\text{C}$), которая может превышать температуру тления мелкодисперсных частиц истирания ленты (табл. 2).

Таблица 2

Температурные показатели пожароопасности материала конвейерной ленты для шахт

| Наименование образцов | Температура самовоспламенения, $^\circ\text{C}$ | Температура тления, $^\circ\text{C}$ |
|--|---|--------------------------------------|
| Образцы ленты в агрегатном состоянии | 286-350 | 185 |
| Измельченные частицы ленты | 225 | 97 |
| Образцы резиновой футеровки приводного барабана | 294 | Не определялась |
| Измельченные частицы футеровки приводного барабана | 290 | |

Температура барабана повышается сразу после возникновения проскальзывания конвейерной ленты. При температуре около $130 \text{ }^\circ\text{C}$ начинается процесс термодеструкции, а при $200 \text{ }^\circ\text{C}$ наблюдается шелушение резины. Через 10-20 минут температура может достигать $300\text{-}380 \text{ }^\circ\text{C}$.

Значительный рост температуры поверхности барабана приводит к воспламенению угольной пыли, продуктов шелушения резины и непосредственно конвейерной ленты.

По результатам зарубежных исследований температура воспламенения конвейерных лент с обычным резиновым покрытием составляет $380\text{-}410 \text{ }^\circ\text{C}$, с покрытием на основе неопренового каучука – $300\text{-}550 \text{ }^\circ\text{C}$, на основе бутадиенстирольного каучука – $450\text{-}500 \text{ }^\circ\text{C}$.

При кратковременном воздействии теплоты от трения обкладки ленты не воспламеняются. Однако мельчайшая каменноугольная пыль при нагревании до $280 \text{ }^\circ\text{C}$ способна воспламениться через минуту и воспламенить конвейерную ленту.

Воспламенение угольной пыли происходит даже при температуре $180 \text{ }^\circ\text{C}$, если время контакта ее с лентой составит около 50 минут. Воспламенение конвейерной ленты при трении на барабане возникает также при ослабленном натяжении ленты или при ее разрыве.

Поэтому большинство пожаров на ленточном конвейере (до 75 %) возникает при пробуксовке ленты на приводном барабане. При 100%-ной пробуксовке воспламенение возникает уже через 15-30 мин.

Одним из путей решения данной проблемы является предупреждение пожароопасного нагрева барабана путем постоянного контроля температуры обшивки барабана и подачи воды на его охлаждение при повышении температуры.

Для определения параметров условия подачи воды на охлаждение барабана (температура датчика, инерционность срабатывания) необходимо исследовать процесс нарастания температуры контакта «барабан – лента» при возникновении пробуксовки.

В работе [1] расчет нагрева приводного барабана проводился упрощенно – на основе уравнения теплового баланса, в работе [2] сделана только общая постановка задачи, в работе [3] рассматривается задача прогрева ленты при заданном тепловом потоке на ее поверхности и нет учета отбора тепла всей поверхностью барабана и отдачи части теплового потока за счет вынужденной конвекции со свободной поверхности вращающегося барабана.

Для получения более точных зависимостей необходимо рассмотреть задачу контакта двух сред.

Рассмотрим процесс трения футерованного приводного барабана при полной пробуксовке конвейерной ленты.

Поверхность контакта считаем гладкой, что позволяет воспользоваться касательными усилиями и, следовательно, тепловой поток будем считать пропорциональным скорости, прилагаемому усилию и коэффициенту трения

$$Q = \mu \cdot v \cdot P, \quad (1)$$

где Q – тепловой поток, создаваемый при пробуксовке всей границе контакта, Bm/m^2

μ – коэффициент трения;

v – скорость вращения барабана, m/c ;

P – усилие прижатия ленты, H ;

Допустим, что на границе контакта отсутствует термическое сопротивление, т.е. температуры ленты и барабана равны друг другу.

$$T_1 = T_2, \quad (2)$$

При больших скоростях вращения барабана температура меняется только в радиальном направлении и не зависит от угла вращения. Это позволяет допустить, что тепловой поток Q , выделяемый на границе контакта, разделяется на три части

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3, \quad (3)$$

где Q_1 – часть теплового потока, поглощаемого лентой;

Q_2 – часть теплового потока, поглощаемого барабаном;

Q_3 – часть теплового потока, отдаваемая барабаном в окружающую среду;

Границу контакта можно считать плоской, так как толщина ленты и барабана на два порядка меньше радиуса барабана R .

Потоки тепла Q_1 и Q_2 пропорциональны градиентам температуры и равны соответственно

$$Q_1 = S \cdot \lambda_1 \cdot \frac{\partial T_1}{\partial x}, \quad (4)$$

$$Q_2 = (S + S_1) \cdot \lambda_2 \cdot \frac{\partial T_2}{\partial x}, \quad (5)$$

где S – площадь поверхности контакта, m^2 ;

S_1 – площадь свободной поверхности барабана, m^2 ;

λ_1, λ_2 – коэффициенты теплопроводности материала барабана и ленты соответственно, $Bm/(m.K)$;

T_1, T_2 – температуры барабана и ленты, соответственно, K .

Тепловой поток Q_3 вызван вынужденной конвекцией при вращении барабана и равен

$$Q_3 = S_1 \cdot \alpha \cdot (T_2 - T_0), \quad (6)$$

где α – коэффициент теплоотдачи при вращении барабана, $Bm/(m^2.grad.)$;

T_0 – температура окружающего воздуха, K .

Если пренебречь теплоотдачей с внешней поверхности барабана и от футеровки к металлу обечайки, то задачу можно упростить, считая слои полубесконечными. На бесконечности вводим обычное условие постоянства температуры.

Таким образом, мы имеем одномерную задачу контакта двух поверхностей с тепловыделением на границе контакта, которая описывается уравнением теплопроводности с соответствующими граничными условиями.

$$\frac{\partial T_1}{\partial \tau} = a_1 \cdot \frac{\partial^2 T_1}{\partial x^2}, \quad x > 0, \quad \tau > 0, \quad (7)$$

$$\frac{\partial T_2}{\partial \tau} = a_2 \cdot \frac{\partial^2 T_2}{\partial x^2}, \quad x < 0, \quad \tau > 0 \quad (8)$$

$$T_1(x, \tau)|_{x \rightarrow \infty} \rightarrow T_0, \quad \tau > 0 \quad (9)$$

$$T_1(0, \tau) = T_2(0, \tau), \quad \tau > 0 \quad (10)$$

$$-\lambda_1 S \frac{\partial T_1}{\partial x} + \lambda_1 (S + S_1) \frac{\partial T_2}{\partial x} + \alpha S_1 (T_2 - T_0) = \mu \nu P, x = 0, \tau > 0 \quad (11)$$

$$T_2(x, \tau)|_{x \rightarrow -\infty} \rightarrow T_0, \quad \tau > 0 \quad (12)$$

где α_1, α_2 – коэффициенты теплопроводности барабана и ленты, соответственно, m^2/c ;
 τ – время, c .

Задача решается с помощью преобразования Лапласа

$$T_1(x, \tau) = T_0 + \frac{\mu \nu P}{S_1 \alpha} \left[\operatorname{erfc} \frac{x}{2\sqrt{a_1 \tau}} - \exp\left(\frac{Bx}{\sqrt{a_1}} + B^2 \tau\right) \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{a_1 \tau}} + B\sqrt{\tau}\right) \right] \quad (13)$$

$$T_2(x, \tau) = T_0 + \frac{\mu \nu P}{S_1 \alpha} \left[\operatorname{erfc} \frac{|x|}{2\sqrt{a_2 \tau}} - \exp\left(\frac{B|x|}{\sqrt{a_2}} + B^2 \tau\right) \operatorname{erfc}\left(\frac{|x|}{2\sqrt{a_2 \tau}} + B\sqrt{\tau}\right) \right]; \quad (14)$$

$$\text{где } B = \frac{S_1 \alpha}{S \lambda_1 / \sqrt{a_1} + (S + S_1) \lambda_2 / \sqrt{a_2}}.$$

(15)

Из решения (13) – (14) можно получить значение температуры на границе контакта.

$$T_{\text{конт.}} = T_0 + \frac{\mu \nu P}{S_1 \alpha} \left[1 - e^{B^2 \tau} \operatorname{erfc} B \sqrt{\tau} \right]; \quad (16)$$

При $\tau \rightarrow \infty$ получим максимальную температуру на контакте «лента-барабан»

$$T_{\text{гккон.}}^{\text{max}} = T_0 + \frac{\mu \nu P}{S_1 \alpha};$$

(17)

Из зависимостей (16) и (17) получим следующее выражение

$$T_{\text{гккон.}}^{\text{max}} - T_{\text{конт.}} = \frac{\mu \nu P}{S_1 \alpha} e^{B^2 \tau} \operatorname{erfc} B \sqrt{\tau}; \quad (18)$$

Принимая $T_{\text{гккон.}}^{\text{max}} = T_{\text{дат.}}$;

где $T_{\text{дат.}}$ – температура срабатывания датчика автоматической установки охлаждения барабана, можно оценить время $\bar{\tau}_{\text{кр.}}$, необходимое для срабатывания установки, т.е. ее инерционность.

Выводы и перспективы дальнейших исследований. Рассмотрена модель процесса нарастания температуры контакта «барабан-лента» при полной пробуксовке ленты. Получена аналитически зависимость для определения температур конвейерной ленты и приводного барабана, а также времени нарастания температуры, что позволит оценить инерционность срабатывания установки охлаждения. Данные результаты могут быть использованы для предотвращения самовозгорания на границе контакта «барабан-лента» в ленточных конвейерах угольных шахт, что в конечном итоге приводит к снижению пожароопасности горных выработок.

Библиографический список

1. Клычков А.А., Дикенштейн И.Ф., Толкачев О.Э. Определение температуры системы конвейерная лента – приводной барабан ленточного конвейера при проскальзывании // Вісті Донецького гірничого інституту. – 2013. – №2. – С.205-213.
2. Козлюк А.И., Голдобин Г.Д., Мамаев В.В. Определение температуры приводного барабана ленточного конвейера при его пробуксовке //Техника безопасности, охрана труда и горноспасательное дело. – 1977. – № 7. – С. 17-19.
3. Пожары на ленточных конвейерах и огнестойкость конвейерных лент / Томинага Т.; ВЦП – № Ц-22387. – 40 с. – Сайке те хеан, 1972, т.18. – № 5. – С. 245-259.
4. Маркевич Ю.М. Определение опасного нагрева конвейерной ленты при проскальзывании на приводном барабане. Разработка месторождений полезных ископаемых // Техника, 1960. – № 56, С. 90-96.
5. Юрченко В.М. Новый взгляд на причины пожаров на шахтных конвейерах / В.М. Юрченко // Уголь Украины. – 2003. – № 2. – С. 56-59.
6. 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.
7. Балтайтис В.Я. Исследование пожарной опасности при проскальзывании ленты на приводном барабане / В.Я. Балтайтис, М.Ю. Маркович, В.В. Мамаев // Уголь Украины. – 1981. – №11. – С. 32-33.
8. Wachowicz Jan / Okreslenie czynnykow powodujacych zagrozenie powstawanie pozarow tasm przenosnikowych w koralniach wegla / Jan Wachowicz // Pr. Nauk. Gl. Inst. Gor. – 1997. – № 816. – P. 3-10.

© О.Э. Толкачев, А.А. Клычков, И.Ф. Дикенштейн, 2015

E-mail: OlegTolk@gmail.com

Рецензент к.т.н., доц. В.В. Паслён

**THE HEAT EXCHANGE OF THE DRIVE DRUM AND
FULL SLIPPED CONVEYOR BELT**

Tolkachev O., Ph.D., assistant professor

of the Department of Computational Mathematics and Programming
SHEI «Donetsk National Technical University»,

Klychkov A., senior researcher, **Dickenstein I.**, senior researcher,

The «Respirator» State Research Institute of Mine-rescue Work, Fire Safety and Civil Protection
(NIIGD «Respirator») MES DPR

A nonstationary one-dimensional problem of the ideal thermal contact between two bodies (the lining reel - tape). The general boundary condition takes into account the heat flows. the drum and the tape, by forced convection during the rotation of the drum into the environment. The resulting solution can be used to estimate the time required for heating the friction surfaces to flammable temperatures. An estimate of the rate of increase of the convective heat flux from the free surface of the drum.

Keywords: friction, heating, linings, drive pulley, fire risk, analytical model, temperature, convection.