

## СПОСОБ ОХЛАЖДЕНИЯ ПРИВОДНОГО БАРАБАНА ЛЕНТОЧНОГО КОНВЕЙЕРА

**Толкачев Олег Эдуардович**, к.т.н., доц., зав. кафедрой пожарной и спасательной подготовки;  
Институт гражданской защиты Донбасса,  
Донецкий национальный технический университет;  
e-mail: OlegTolk@gmail.com;  
283048, Донецк, ул. Розы Люксембург, 34а;  
Тел.: +38(062) 335-26-20

**Ющенко Юрий Николаевич**, к.т.н., e-mail: kdom100@mail.ru

**Клычков Анатолий Анатольевич**, с.н.с., e-mail: anatoly.klichkov@yandex.ru

**Дикенштейн Игорь Феликсович**, с.н.с.; e-mail: opbush@mail.ru

Государственный научно-исследовательский институт горноспасательного дела,  
пожарной безопасности и гражданской защиты «Респиратор» МЧС ДНР;  
283048, Донецк, ул. Артёма, 157;  
Тел.: +38(062) 311-10-84; 311-39-70

*Рассмотрен процесс охлаждения водой приводного барабана ленточного конвейера при его пробуксовке. Алгоритм расчета позволяет определить для каждого барабана и ленты такой расход воды, при котором время охлаждения барабана будет минимальным и меньшим времени нагревания и воспламенения конвейерной ленты. Разработан способ охлаждения приводного барабана путем подачи воды в его внутреннюю полость.*

**Ключевые слова:** ленточный конвейер; приводной барабан; пробуксовка; пожароопасное нагревание; температура; охлаждение; расход воды.

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

Один из наиболее пожароопасных объектов угольной шахты – выработки, оборудованные ленточными конвейерами, так как они имеют высокую пожарную нагрузку (горючая конвейерная лента, минеральные масла в редукторе и гидромуфтах, дерево в пустотах за крепью).

При перегрузках конвейера, его заштыбровке, заклинивания поддерживающих роликоопор, сходе ленты или иных нарушениях нормальной работы конвейера происходит частичная или полная пробуксовка с выделением вследствие трения значительного количества теплоты на поверхности контакта барабана ленты и пожароопасным нагреванием поверхности приводного или натяжного барабана. При этом возможно воспламенение угольного штыба и конвейерной ленты. По этой причине за последние 15 лет на приводных и натяжных станциях конвейеров произошло 65% всех пожаров в конвейерных выработках шахт Украины, 64 % – Российской Федерации, до 45 % – шахт Польской Народной Республики [1-3].

Один из путей предотвращения пожаров на приводных станциях ленточных конвейеров – охлаждение приводного барабана при возникновении пробуксовки. Охладить барабан можно, например, водой из автоматических установок пожаротушения, которыми оснащены приводные станции. Однако такие установки срабатывают, когда пожар уже возник, требуют определенного напора и расхода воды в пожарно-оросительном трубопроводе.

Более рациональным представляется следующий способ: выполнить приводной барабан в виде двух коаксиальных цилиндров и в случае аварийной пробуксовки подавать охлаждающую жидкость (воду) во внутреннюю полость барабана.

Это возможно, если выполнить барабан полым или состоящим из двух коаксиальных цилиндров и в случае аварийной пробуксовки подавать охлаждающую жидкость (воду) во внутреннюю полость.

Условия наиболее эффективного применения воды для предлагаемого охлаждения нагреваемых элементов барабана при минимальном расходе изучены мало. Удалось обнаружить только одну публикацию [4]. В ней рассмотрено охлаждение электрогенераторов. Охлаждающая жидкость подается в узкий кольцевой зазор между двумя коаксиальными цилиндрами, внутренний из которых (ротор) вращается, а внешний (статор) неподвижен. Вода, попадая на нагретую внешнюю поверхность ротора, нагревается до температуры кипения, а затем кипит.

В шахтных условиях нельзя допустить, парообразования, то есть нагревания барабана до температуры кипения воды. По данным экспериментов на шахте «Тремония» (Германия) воспламенение конвейерной ленты при пробуксовке барабана и наличии угольного штыба начиналось при  $t = 120$  °С [5]. Поэтому методика, предложенная в работе [4], не подходит для шахтных условий.

Таким образом, для создания надежной методики определения количества охлаждающей воды и условий ее подачи недостаточно данных, обеспечивающих необходимую надежность работы приводного барабана, предупреждения его перегрева, создающего угрозу пожара в шахте.

**Изложение основного материала исследования.** Рациональное управление процессом охлаждения требует изучения его достаточно сложного механизма. В зависимости от гидродинамических и тепловых условий можно выделить несколько частных режимов охлаждения, причем эти режимы могут одновременно реализоваться на различных участках обечайки барабана, что еще более усложняет процесс и увеличивает трудность его формализации. В частности, при температуре поверхности обечайки барабана выше температуры насыщения водяного пара образуется пленка испаряющейся жидкости. При более высоких температурах возникает пузырьковое кипение в пленке, а дальнейший рост температуры приводит к сфероидальному состоянию жидкости на охлаждаемой поверхности.

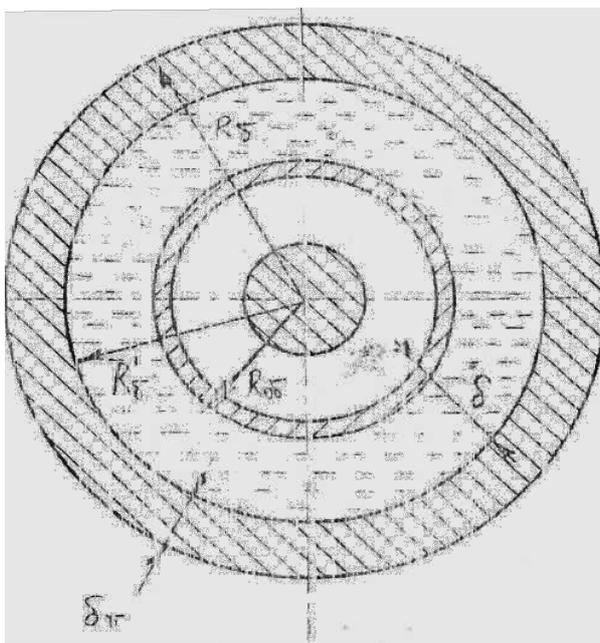


Рис. 1. Расчетная схема приводного барабана

Представим себе приводной барабан в виде двух коаксиальных цилиндров с зазором  $\delta$ , м, между ними. Барабан вращается с угловой скоростью  $\omega$ ,  $c^{-1}$ . При его аварийной пробуксовке во внутреннюю полость подается вода и охлаждает барабан.

Чтобы избежать парообразования и необходимости усложнять конструкцию предохранительным клапаном, принимаем допустимую температуру нагрева барабана, при которой начинается его охлаждение  $T_{доп} = 80^\circ C$ .

Для определения текущей температуры барабана в случае его аварийной пробуксовки и принудительного охлаждения (учитывая и охлаждения внешней поверхности барабана вентиляционным потоком воздуха) составим по аналогии с [4] уравнение теплового баланса

$$qS_2 d\tau \Big|_{0^\circ C < T < 80^\circ C} = C^* (m_b + m_l) dT + \alpha_a S_1 (T - T_a) d\tau + \alpha_{жс} S_3 (T - T_{жс}) d\tau \Big|_{T > 80^\circ C} \quad (1)$$

где  $q$  – удельный теплоприток к поверхности контакта лента-барабан при его аварийной пробуксовке,  $Bm/m^2$ ;

$S_2$  – площадь поверхности барабана, охваченная конвейерной лентой,  $m^2$ ;

$C^*$  – средневзвешенная теплоемкость пары барабан-лента,  $Дж/(кг \cdot ^\circ C)$ ;

$m_b, m_l$  – масса барабана и части ленты, охватывающей барабан, соответственно,  $кг$ ;

$S_1$  – площадь поверхности барабана, свободная от ленты и омываемая воздушным потоком,  $m^2$ ;

$\alpha_a$  – коэффициент теплоотдачи от вращающегося барабана к воздуху,  $Bm/(m^2 \cdot ^\circ C)$ ;

$T$  – текущая температура барабана,  $^\circ C$ ;

$T_a$  – температура окружающего воздуха,  $^\circ C$ ;

$S_3$  – площадь внутренней поверхности внешнего цилиндра барабана,  $m^2$ ;

$\alpha_{жс}$  – коэффициент теплоотдачи от барабана к охлаждающей жидкости (воды),  $Bm/(m^2 \cdot ^\circ C)$ ;

$T_{жс}$  – начальная температура воды,  $^\circ C$ ;

$\tau$  – время,  $с$ .

Принимаем, что охлаждение барабана водой начинается в момент времени  $\tau = \tau^*$  при достижении температуры поверхности барабана  $T_{дон.} = 80^\circ C$ .

Начальные условия:

$$\begin{aligned} T|_{\tau=0} &= T_0 \\ T|_{\tau=\tau^*} &= T_{дон.} \end{aligned} \quad (2)$$

где  $T_0$  – начальная температура барабана,  $^\circ C$  (до начала его аварийной пробуксовки).  
Интегрируя (1) с учетом (2), получаем:

$$T = \begin{cases} T_0 e^{-\sigma_1 \tau} + a(1 - e^{-\sigma_1 \tau}), \text{ при } T \leq 80^\circ C \\ T_{дон.} e^{-\sigma_2(\tau - \tau^*)} + b(1 - e^{-\sigma_2(\tau - \tau^*)}), \text{ при } T > 80^\circ C \end{cases} \quad (3)$$

где обозначено:

$$\sigma_1 = \frac{\alpha_g \cdot S_1}{C^* (m_g + m_l)} \quad (4)$$

$$\sigma_2 = \frac{\alpha_g \cdot S_1 + \alpha_{жс} \cdot S_3}{C^* (m_g + m_l)} \quad (5)$$

$$a = \frac{q \cdot S_2}{\alpha_g \cdot S_1} + T_g \quad (6)$$

$$b = \frac{q \cdot S_2 + \alpha_g \cdot S_1 \cdot T_g + \alpha_{жс} \cdot S_3 \cdot T_{жс}}{\alpha_g \cdot S_1 + \alpha_{жс} \cdot S_3} + T_{жс} \quad (7)$$

Коэффициенты теплоотдачи  $\alpha_g$  и  $\alpha_{жс}$  определяем из критериальных уравнений

$$Nu_g = 0,216 \cdot Re_g^{0,6} \cdot \bar{\epsilon}_l \quad (8)$$

где  $Nu_g$  и  $Re_g$  – критерии Нуссельта и Рейнольдса для воздуха

$$Nu_g = \frac{\lambda_g \cdot D_g}{v_g} \quad (9)$$

$$Re_g = \frac{v_g \cdot D_g}{\nu_g} \quad (10)$$

$v_g$  – скорость вентиляционного потока, омывающего барабан,  $м/с$ ;

$\lambda_g$  – теплопроводность воздуха,  $Вт/(м^2 \cdot ^\circ C)$ ;

$\nu_g$  – кинематическая вязкость воздуха,  $м^2/с$ ;

$D_g$  – наружный диаметр приводного барабана,  $м$ ;

$\bar{\epsilon}_l$  – поправочный коэффициент, учитывающий длину барабана.

$$Nu_{жс} = 0,11 \cdot Re_{жс}^{0,4} \cdot Ta^{1/2} \quad (11)$$

где  $Nu_{жс}$  и  $Re_{жс}$  – критерии Нуссельта и Рейнольдса для воды;

$Ta$  – число Тейлора

$$Ta = \frac{w \cdot \delta^2}{\nu_{жс}} \quad (12)$$

$\nu_{жс}$  – кинематическая вязкость воды,  $м^2/с$ ;

$$\alpha_{жс} = \frac{Nu_{жс} \cdot \lambda_{жс}}{\delta} \quad (13)$$

$$\alpha_{сб} = \frac{Nu_{сб} \cdot \lambda_{сб}}{D_{сб}} \quad (14)$$

Удельный теплоприток при пробуксовке определяется из уравнения [4]

$$q = \frac{\nu_{сб} \cdot f \cdot N_{сб}}{D_{сб} \cdot \gamma \cdot B} (e^m - 1) \quad (15)$$

где  $\nu_{сб}$  – окружная скорость барабана,  $м/с$ ;

$f$  – коэффициент пробуксовки ( $0 < f < 1$ );

$\gamma$  – угол обхвата барабана лентой,  $рад$ ;

$B$  – ширина барабана,  $м$ ;

$N_{сб}$  – усилие в сбегающей ленте,  $н$ ;

$m$  – коэффициент трения ленты о барабан.

Минимальный расход охлаждающей воды  $V_{жс}^{min}$ ,  $м^3/с$ , при котором прекращается нагревание барабана, при условии пренебрежения теплоъемом за счет вентиляционного потока равен

$$V_{жс}^{min} = \frac{q D_{сб} \pi B}{\rho_{жс} c_{жс} (T_{доп} - T_{жс})} \quad (16)$$

где  $c_{жс}$  – теплоемкость воды,  $кДж/(кг \cdot K)$ ;

$\rho_{жс}$  – плотность воды,  $кг/м^3$ .

Зависимости (3) и (16) позволяют рассчитать текущую температуру поверхности барабана и необходимый расход воды для предотвращения его пожароопасного состояния. После остановки конвейера ( $q = 0$ ), при продолжении подачи воды в том же объеме ( $V_{жс} = V_{жс}^{min}$ ) начинается охлаждение барабана. При  $q \neq 0$  охлаждение начнется при увеличении подачи ( $V_{жс} > V_{жс}^{min}$ ).

Определим необходимое значение кольцевого зазора. Из уравнения (12) получаем

$$\delta = \sqrt{\frac{\nu_{жс} \sqrt{Ta}}{\omega}} \quad (17)$$

Принимаем:  $D_{сб} = 0,63$  м; скорость конвейерной ленты  $\gamma = 2,0$  м/с, тогда угловая скорость барабан  $\omega = \frac{2\gamma_l}{D_{сб}} = 6,35 с^{-1}$ ;  $\nu_{жс} = 1 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с;  $Ta = 1700$ .

Тогда минимальное значение зазора  $\delta = 2,5 \cdot 10^{-3}$  м.

Принимаем из конструктивных соображений  $\delta = 3$  мм. Тогда число Тэйлора  $Ta = 3266 > 1700$ .

Условие соблюдается. Принимаем начальную температуру воды

$$T_{жс} = 20 \text{ } ^\circ\text{C}. \text{ Тогда определяющая температура } \bar{T}_{жс} = \frac{T_{доп} + T_{жс}}{2} = 50 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

При этом  $P_{жс} = 3,54$ ,  $\lambda_{жс} = 0,684$  Вт/м<sup>2</sup> [6].

Из уравнений (11) и (13) находим коэффициент теплоотдачи от внутренней поверхности барабана к воде  $N_{жс} = 2,71$ ;  $\alpha_{жс} = 585$  Вт/(м<sup>2</sup>·К).

По зависимости (12) рассчитываем текущую температуру барабана при 100%-й пробуксовке резиноканевой ленты и следующих условиях:

- барабан  $D_{сб} = 0,63$  м; толщина стенки внешней обкладки  $\delta_{сб} = 0,01$  м;  $D_{сб}^{\square} = D_{сб} - 2\delta_{сб} = 0,61$  м;

- плотность материала барабана (сталь)  $\rho_{сб} = 7800$  кг/м<sup>3</sup>;  $B = 0,9$  м;  $\delta = 0,003$  м;  $f = 1$ ;  $\tau = 0379$ ;  $\nu_{сб} = 2$  м/с;  $\omega = 6,35$  с<sup>-1</sup>;  $T_{max} = 80$  °С;

- теплоемкость материала барабана  $c_{сб} = 0,46$  кДж/(кг·К);  $T_0 = 20$  °С;

- лента резиноканевая: толщина ленты  $\delta_l = 0,012 \text{ м}$ ; плотность материала ленты  $\rho_l = 1200 \text{ кг/м}^3$ ;  $v_l = v_b = 2 \text{ м/с}$ ;  $S_{cб} = 7850 \text{ Н}$ ;  $\gamma = \frac{4}{3} \pi \text{ рад}$ ; теплоемкость материала ленты  $c_l = 1,38 \text{ кДж/ (кг}\cdot\text{K)}$ ;

- воздух  $v_a = 1,5 \text{ м/с}$ ;  $T_B = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $\rho_a = 1,185 \text{ кг/м}^3$ ;  $v_B = 15,53 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ ;  $P_{rв} = 0,702$ ;  $\lambda_a = 2,634 \cdot 10^{-2} \text{ Вт/(м}\cdot\text{K)}$ ;

- вода  $T_{жс} = 50 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $c_{жс} = 4,174 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{K)}$ ;  $\lambda_{жс} = 0,648 \text{ Вт/(м}\cdot\text{K)}$ ;  $v_{жс} = 0,556 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ ;  $P_{rжс} = 3,54$ .

Рассчитываем коэффициент теплоотдачи  $\alpha_в$ :  $R_{ев} = 6,08 \cdot 10^4$ .

Для  $\frac{B}{D_б} = 1,43$  -  $\bar{\epsilon}_l = 1,27$  [6];  $N_{иВ} = 203$ ;  $\alpha_в = 8,5 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{K)}$ .

Рассчитываем:

- площадь поверхности барабана  $\delta_б = \pi D_б B = 1,78 \text{ м}^2$ ;

- площадь поверхности барабана, охваченной лентой  $S_2 = 1,18 \text{ м}^2$ ;

- площадь поверхности барабана, свободной от ленты  $S_1 = S_б - S_2 = 0,6 \text{ м}^2$ ;

- площадь поверхности, охлаждаемая водой  $S_3 = 1,72 \text{ м}^2$ ;

- масса внешней оболочки барабана, находящаяся в контакте с лентой,

-  $m_б = \frac{2}{3} \pi D_б B \delta_б \rho_б = 103 \text{ кг}$ ; масса ленты на барабане  $m_l = \delta_l B \gamma \frac{D_б}{2} \rho_l = 17 \text{ кг}$ .

Расчет температуры барабана, выполненный по приведенным зависимостям, представлен на рис. 2.

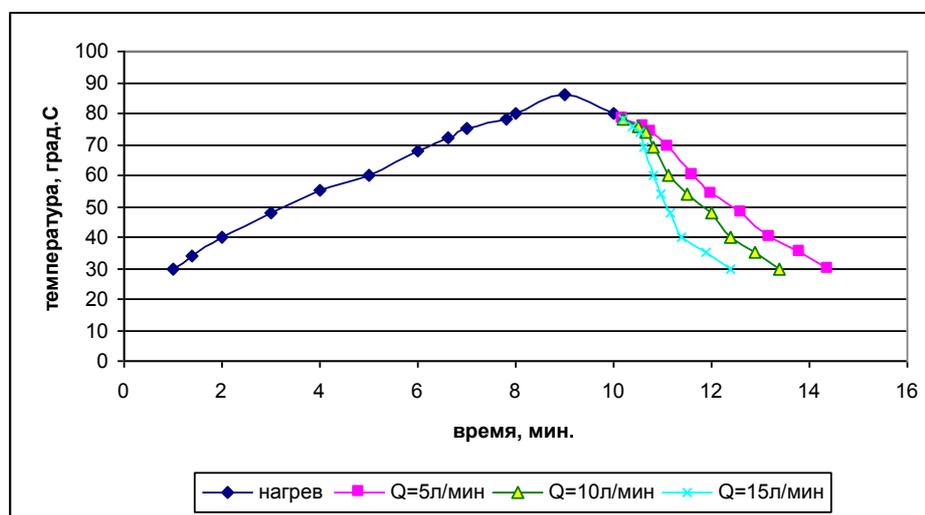


Рис. 2. Изменение температуры приводного барабана ленточного конвейера в зависимости от времени пробуксовки и охлаждения

Температура  $T_{дон} = 80 \text{ }^\circ\text{C}$  на поверхности приводного барабана достигается через время  $\eta^* = 8 \text{ мин}$  после начала пробуксовки. Затем включается система охлаждения и через  $\eta = 2 \text{ мин}$  температура стабилизируется на уровне  $80 \text{ }^\circ\text{C}$ . При этом необходимый расход воды, рассчитанный по зависимости (16), равен  $V_{жс}^{min} = 10,6 \text{ л/мин}$ .

В дальнейшем конвейер останавливается, теплоприток к барабану прекращается ( $q = 0$ ) и при продолжении подачи воды происходит охлаждение неподвижного нагретого барабана.

Этот процесс может быть описан стандартной процедурой расчета охлаждения цилиндра конечной длины с использованием критериев Био и Фурье [6].

Успех охлаждения обеспечен при уменьшении температуры поверхности барабана до температуры окружающей среды за минимальное время при минимальном расходе воды. Снижение температуры барабана с  $t = 80 \text{ }^\circ\text{C}$  до  $t = 30 \text{ }^\circ\text{C}$  происходит при расходе воды  $V = 10 \text{ л/мин}$  за время  $\eta \leq 4 \text{ мин.}$ , что вполне приемлемо. При этом суммарный расход воды не превышает 60 л, то есть при отсутствии воды в пожарно-оросительном трубопроводе может быть использована автономная емкость, соединенная с системой охлаждения барабана. При увеличении расхода воды до 15 л/мин время охлаждения снижается до 2 мин.

Предлагаемый способ охлаждения барабанов позволяет предотвратить возникновение пожароопасного их нагревания на приводных и натяжных станциях ленточных конвейеров и повысить срок эксплуатации конвейерных лент.

**Выводы и перспективы дальнейших исследований.** Анализ условий эксплуатации шахтных конвейеров показывает их высокую пожароопасность, связанную с перегрузкой, неисправностями конструкции или иными нарушениями нормальной работы.

1. Предложен способ предотвращения пожароопасного нагревания приводных и натяжных барабанов конвейера путем их охлаждения водой, подаваемой на внутреннюю поверхность обечаек.

2. Исследования процесса ограждения нагреваемых элементов барабана позволили предложить методику определения необходимого количества охлаждающего агента для стабилизации безопасной в пожарном отношении температуры поверхности барабана и последующего ее снижения, а также разработать оригинальную конструкцию барабана, предотвращающую его нагреванию до пожароопасных температур.

#### **Библиографический список**

1. Пожары в выработках, оборудованных ленточными конвейерами. Информационное письмо: Донецк: НИИГД «Респиратор», 2006. – 15с.

2. Юрченко, В.М. Новый взгляд на причину пожаров на шахтных конвейерах / В.М. Юрченко // Уголь, 2003. – № 2. – С. 56-59.

3. Wachowich Jan Okreslenie czennych porodeyacych zagrozenie powstawania pozarow tasm przenoszownikow w kopalniach Wegla / Jan Wachowich // Pr. Nauk. Gl. Inst. Gor, 1997. – № 816. – С. 3-10.

4. К вопросу технологической противопожарной защиты электрогенераторов передвижных установок / Г.П. Малышев, А.А. Родэ, В.А. Третьяков, В.В. Уваров // Пожарная техника: информ. сб. – Вып.9. – М.: Изд-во литературы по строительству, 1972. – С.114-121.

5. Балтайтис, В.Я. Исследование пожарной опасности при проскальзывании ленты на приводных барабанах конвейера / В.Я. Балтайтис, Ю.М. Маркович, В.В. Мамаев // Уголь Украины, 1981. – № 11. – С. 31-33.

6. Исаченко, В.П. Теплопередача: учебник для вузов / В.П. Исаченко, В.А. Осипова, А.С. Сукомел. – Изд. 3-е, перераб. и доп. – М.: Энергия, 1975. – 488 с.

© О.Э. Толкачѐв, Ю.Н. Ющенко, А.А. Клычков, И.Ф. Дикенштейн, 2015  
Рецензент д.т.н., с.н.с. С.П. Греков

## **A METHOD OF BELT CONVEYOR DRIVE ROLLER COOLING**

**Dr. Oleg Eduardovich Tolkachyov, Ph.D. (Tech.),**

Head of the Fire and Rescue Training Department; Donbass Civil Defence Institute,

Donetsk National Technical University;

e-mail: OlegTolk@gmail.com;

283050, Donetsk, 34a Rosa Luxemburg Str.;

Phone: +38(062) 335-26-20

**Dr. Yuriy Nikolaevich Yushchenko, Ph.D. (Tech.),** e-mail: kdom100@mail.ru

**Anatoliy Anatolievich Klychkov, Senior Research Officer;** e-mail: anatoly.klichkov@yandex.ru

**Igor Felixovich Dickenshtein, Senior Research Officer;** e-mail: opbush@mail.ru

«Respirator» State Scientific Research Institute of Mine-Rescue Work, Fire Safety and Civil Protection

of the Ministry of the Donetsk People's Republic for Civil Defense Affairs,

Emergencies and Liquidation of Consequences of Natural Disasters;

283048, Donetsk, 157 Artyoma Str.;

Phone: +38(062) 311-10-84; 311-39-70

The process of water cooling conveyor belt drive drum when it slips. Algorithm of calculation to determine for each reel and tape a water flow at which time the cooling drum will be minimal and less time heating and ignition of the conveyor belt. A method for cooling a drive drum by supplying water to the interior cavity.

**Ключевые слова:** *conveyor belt drive drum slippage; fire heating temperature; cooling water flow rate.*