

ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА БЕЗОПАСНОСТЬ РАБОТЫ РЕЛЬСОВОГО ТРАНСПОРТА В УСЛОВИЯХ ГАЗОНАСЫЩЕННОГО МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД

В. В. Говоруха, С. Л. Ладик, А. В. Говоруха, институт геотехнической механики им. Н. С. Полякова НАН Украины

Рассмотрены процессы механики формирования температурных режимов торможения подвижного состава, которые влияют на безопасность его работы в условиях газонасыщенного массива горных пород. Получена закономерность изменений температуры нагрева пар трения от характеристики показателей движения транспортных средств, включительно скорость движения и коэффициент трения на примере двухосного шахтного локомотива.

Работа в постоянно ухудшающейся обстановке (увеличение глубины разработки, температуры воздуха, выбросоопасности пластов, геологические нарушения) в сочетании с плохим материально-техническим обеспечением, низкой технологической дисциплиной и организацией труда повышают степень опасности и риска труда шахтеров. Травматизм и аварии на шахтах растут, а значит, увеличиваются и затраты [1].

Одной из главных задач повышения эффективности рудничной электровозной откатки является увеличение ее пропускной способности, обеспечение безопасных условий эксплуатации. Эта задача может быть решена путем: создания тяжелых электровозов с улучшенными тяговыми, скоростными и тормозными характеристиками; рациональной организации движения поездов; разработки надежных средств защиты и аппаратуры безопасной эксплуатации [2].

Повышение риска аварий и травматизма на шахтах объясняется многими объективными причинами. Добыча угля достигла глубин свыше 700 метров. Количество газа и температура, как правило, превышают норму [2]. Безопасность эксплуатации существующего локомотивного транспорта может быть обеспечена правильной организацией работ, соблюдением заданных режимов движения, своевременным проведением профилактических осмотров, ремонтов и проверок, а также при использовании предохранительных устройств, предупредительной и путевой сигнализации и средств связи [2].

В процессе движения поезда на него действуют силы, различные по своему характеру и направлению. Различают силы внешние (сила сопротивления движению от уклона и т.д.) и внутренние (сила трения в моторно-осевых подшипниках и пр.). Внешние силы можно разделить на управляемые (сила тяги) и неуправляемые (силы сопротивления движению). В зависимости от соотношения управляемых и неуправляемых сил, поезд может двигаться ускоренно, замедленно или с равномерной скоростью [3].

Устройства, применяемые в поездах для создания искусственного сопротивления движению, называются тормозами, а силы, создающие искусственное сопротивление движению, – тормозными силами, которые совместно с силами сопротивления движению гасят кинетическую энергию движущегося поезда.

Проведенный анализ показывает, что обеспечение безопасности работы рельсового транспорта в условиях газонасыщенного массива горных пород требует проведения моделирования процессов взаимодействия отдельных элементов и узлов рельсового транспорта с целью выявления потенциально опасных с точки зрения воспламенения метано-воздушной смеси пар трения подвижного состава и рельсового пути.

Торможение состава осуществляется за счет трения, возникающего в зоне контакта колесо – рельс. При эксплуатации современного подвижного состава отмечено несоответствие фактических, определенных по длине тормозного пути, значений коэффициентов трения значениям, приведенным в типовых формулах [3]. Значительное завышение длины тормозных путей происходит в результате низкого коэффициента трения [4]. Именно поэтому процесс торможения (в особенности экстренного) сопровождается подсыпанием в зону контакта ко-

леса с рельсом песка для повышения коэффициента трения, достигающего в этом случае значений $k_{тр} \approx 0,95$ [3].

При контакте колеса с рельсом в большинстве случаев имеет место сухое внешнее трение [5]. В процессе торможения контакт рельса с поверхностью катания колеса происходит не по всей поверхности, а в некоторых микрizonaх, образованных контактирующими отдельными парами неровностей. Согласно молекулярно-механической теории трения [5] силовое взаимодействие при трении твердых тел представляют как результат двух взаимоувязанных процессов - механического сопротивления деформации микровыступов при относительном тангенциальном сдвиге контактирующих тел и сопротивления в виде молекулярного притяжения контактирующих микровыступов. В целом, на фрикционные качества взаимодействия поверхностей влияют физико-химические свойства поверхностных слоев и микровыступов, свойства материалов.

Изменение силовых характеристик и температуры главным образом проявляется в изменении количества отдельных пар неровностей поверхности катания колеса и рельса, вступающих в контакт, то есть в изменении формы поверхности катания. Реологические свойства контакта, а также упругие свойства контактирующих элементов являются причиной тангенциальных фрикционных колебаний [6].

Согласно [6] сила трения зависит от перемещения в направлении движения и в общем виде эта зависимость имеет две зоны. В первой зоне сила трения изменяется (увеличивается) в зависимости от величины перемещения. Во второй - при постоянной нагрузке и скорости - сила трения постоянна. При переходе от первой зоны ко второй сила трения изменяется (чаще уменьшается) скачком. При небольших вынужденных колебаниях отсутствует скачок силы трения при переходе от первой зоны ко второй, то есть при переходе от режима предварительного сдвига к режиму постоянной силы трения скольжения.

Таким образом, в дальнейшем подлежит рассмотрению взаимодействие колеса с рельсом при торможении противовключением с наличием в зоне контакта абразивного материала.

Цель данной статьи заключается в выявлении процессов механики формирования температурных режимов торможения подвижного состава, которые влияют на работоспособность и безопасность его работы в условиях газонасыщенного массива горных пород.

Достижение поставленной цели обеспечивается решением таких научных задач:

- построение математических моделей процессов взаимодействия элементов трения рельсового пути и подвижного состава;
- определение закономерностей при взаимодействии элементов трения рельсового пути и подвижного состава;
- разработка методов решения задач механики процессов взаимодействия элементов трения рельсового пути и подвижного состава.

При оценке нестационарного режима теплообмена задача расчета состоит в определении температурного состояния тела и количества полученной или отданной телом теплоты за определенный промежуток времени.

Пусть имеется однородный металлический шар малого радиуса R_0 при одномерном температурном поле, т.к. распространение тепла в этом случае происходит только по радиусу шара. Шар расположен в центре шаровидного пространства радиуса $R_a \rightarrow \infty$, заполненного метановоздушной смесью.

Если R – текущий радиус шара, то избыточная температура в любой точке шара на расстоянии R от центра в произвольный момент времени ϕ определяется выражением:

$$\theta = T - T_0, \quad (1)$$

где T – температура рассматриваемой точки, T_0 – температура окружающей среды.

Для начального момента времени $\theta_{нач} = T_{нач} - T_0$.

Математическая постановка задачи состоит в решении дифференциального уравнения теплопроводности для твердых тел, которое для шара имеет вид:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \cdot \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{2}{R} \cdot \frac{\partial T}{\partial R} \right), \quad (2)$$

где $a = \frac{\lambda}{c \cdot \rho}$ – коэффициент температуропроводности, где λ , c , ρ – соответственно теплопроводность, теплоемкость и плотность шара.

Аналитическое выражение, определяющее температурное поле шара имеет вид:

$$\bar{\Theta} = 2 \sum_{i=1}^n \frac{\sin \mu_i - \mu_i \cdot \cos \mu_i}{\mu_i - \sin \mu_i - \cos \mu_i} \cdot \frac{\sin(\mu_i \bar{R})}{\mu_i \bar{R}} \cdot e^{-\rho_i^2 F_0}, \quad (3)$$

где $F_0 = \frac{a\tau}{R_0^2}$ – число Фурье, $(\mu_1, \mu_2, \mu_3, \dots)$ – бесчисленное множество решений корней

трансцендентного уравнения $\mu \cdot \cos \mu = 1 - B_i$, где $B_i = \frac{aR_0}{\lambda_i}$ – число Био, \bar{b} – коэффициент теплоотдачи к наружной поверхности.

Тогда температура в любой точке шара, отстоящей от центра на расстоянии R , в момент времени ϕ равна:

$$T = T_0(1 - \bar{\Theta}) + T_{i\bar{a}^+} \bar{\Theta}. \quad (4)$$

Для построения математической модели нестационарного теплообмена неоднородного шара следует рассмотреть многослойный неоднородный шар радиуса R , состоящий из n слоев. Каждый i -ый слой в момент времени ϕ характеризуется внутренним и внешним радиусами R_{i-1} и R_i соответственно (первый слой имеет внутренний нулевой радиус), температурой T_i , удельной теплоемкостью c_i , плотностью ρ_i , теплопроводностью λ_i , влажностью W_i , плотностью тепловыделения $f(c_i, e_i, \phi, p)$ (p – мощность источника тепловыделения), т.е. количеством тепла, выделяемым i -ым слоем в единицу времени на единицу объема.

Пусть \bar{b} – коэффициент теплоотдачи к наружной среде для внешнего n -го слоя, T_0 – температура окружающей среды, $\phi_{\text{общ}}$ – общее время нагрева шара, ϕ – текущее время, $\partial\phi$ – величина временного шага $N = \frac{T}{\Delta\tau}$.

Пусть постоянная толщина слоя – $\partial R = \frac{R}{n}$. Объем произвольного шарового слоя может быть определен, как

$$\partial V = \frac{4}{3} \pi \left((R + \partial R)^3 - R^3 \right) = \frac{4}{3} \pi (\partial R) \left(3R(R + \partial R) + (\partial R)^2 \right). \quad (5)$$

Площади сфер радиуса R и $R + \partial R$ вычисляются по формулам

$$F_{\text{внутр}} = 4\pi(R)^2. \quad (6)$$

$$F_{\text{внешн}} = 4\pi(R + \partial R)^2 = 4\pi \left(R^2 + 2R(\partial R) + (\partial R)^2 \right). \quad (7)$$

Количество тепла, получаемое i -м слоем от внешнего и внутреннего слоя определяется выражениями:

$$\partial Q^{\text{внешн}} = \frac{T_{\text{внешн}} - T}{\partial R} \lambda_{\text{внешн}} F_{\text{внешн}} = 4\pi \lambda_{\text{внешн}} dT \left(\frac{R^2}{\partial R} + 2R + (\partial R) \right). \quad (8)$$

$$\partial Q_i^{\text{внутр}} = \frac{T_{\text{внутр}} - T}{\partial R} \lambda_{\text{внутр}} F_{\text{внутр}} = 4\pi \lambda_{\text{внутр}} dT \frac{(R)^2}{\partial R}. \quad (9)$$

Тогда изменение температуры слоя за время $\partial \tau$ составит:

$$dT = \frac{\partial Q^{\text{внутр}} + \partial Q^{\text{внешн}} + \partial Q}{(\partial V) c \rho} \cdot \partial \tau. \quad (10)$$

Если пренебречь $(\partial R)^2 (\partial \tau)$, $(\partial R)^3$ и $(\partial R)^4$, как величинами высшего порядка малости, то изменение температуры слоя представляет собой зависимость:

$$(dT) = \frac{(\partial R)(\partial Q)(\partial \tau)}{4\pi(c\rho(\partial R)^2(R)^2 - \lambda_{\text{внутр}}(R)^2(\partial \tau) - \lambda_{\text{внешн}}(R)^2(\partial \tau) - 2\lambda_{\text{внешн}}R(\partial R)(\partial \tau))}. \quad (11)$$

Способы решения такого дифференциального уравнения приведены в [7, 8]. Решая уравнение (11), получим:

$$\tau = \frac{Q^2}{1024\pi^2 \lambda_{\text{внешн}}^2 (T - T_0)^2} \left(1 - 16\pi \lambda_{\text{внешн}} Q (T - T_0) R + 256\pi^2 \lambda_{\text{внешн}}^2 (T - T_0)^2 R^2 \right) - (256\pi \lambda_{\text{внешн}} (T - T_0) R - 32) + 16 \ln \left(\frac{Q}{4\pi c \rho (T - T_0)} - \frac{2\lambda_{\text{внешн}}}{c \rho} R \right). \quad (12)$$

Количество подведенной энергии Q может быть определено, исходя из следующего.

Пусть колесо с предельно допустимым сопротивлением на разрыв $[y_0]$ радиуса R_κ пробуксовывает по некоторой поверхности, которую можно считать абсолютно твердой. При этом колесо прижимается с силой N , направленной вдоль радиуса колеса.

Под воздействием силы N колесо деформируется и возникает пятно контакта радиуса $r = \frac{2R_\kappa}{[\sigma_0]} \sqrt{2E[\sigma_0] - E^2}$, где E – модуль Юнга. Энергия, выделяемая при трении [9], определяется равенством:

$$dQ = F \cdot dS = k_{\text{тр}} \cdot N \cdot dS, \quad (13)$$

где dS – путь, на котором действует сила трения. Величину dS можно определить, как $dS = 4\pi \cdot \omega_\kappa \cdot \frac{\sqrt{2E[\sigma_0] - E^2}}{[\sigma_0]} d\tau \cdot R_\kappa$, где $d\phi$ – время вращения колеса. Таким образом энергия, выделяемая в процессе трения описывается выражением

$$Q = 4\pi \cdot \omega_\kappa \cdot \frac{\sqrt{2E[\sigma_0] - E^2}}{[\sigma_0]} \tau \cdot R_\kappa \cdot k_{\text{тр}} \cdot N. \quad (14)$$

Наивысшая температура метано-воздушной смеси достигается на поверхности пятна контакта. При $R = r = \frac{2R_{\kappa}}{[\sigma_0]} \sqrt{2E[\sigma_0] - E^2}$ и $\lambda_{\text{аіаіаі}} = \lambda$ формула (14) примет вид

$$\begin{aligned} \tau = & \frac{\omega_{\kappa}^2 (2E[\sigma_0] - E^2) \tau^2 R_{\kappa}^2 k_{\text{тп}}^2 N^2}{64\lambda^2 [\sigma_0]^4 (T - T_0)^2} \\ & ([\sigma_0]^2 - 128\pi^2 \lambda \omega_{\kappa} \tau R_{\kappa}^2 k_{\text{тп}} N (2E[\sigma_0] - E^2) (T - T_0) + \\ & + 10246\pi^2 \lambda^2 (T - T_0)^2 R_{\kappa}^2 (2E[\sigma_0] - E^2) - \\ & - 512\pi\lambda (T - T_0) R_{\kappa} \sqrt{2E[\sigma_0] - E^2} + 32[\sigma_0] + \\ & + 16[\sigma_0] \ln \left(\frac{\omega_{\kappa} \sqrt{2E[\sigma_0] - E^2} \tau R_{\kappa} k_{\text{тп}} N - 4\lambda R_{\kappa} (T - T_0) \sqrt{2E[\sigma_0] - E^2}}{c\rho[\sigma_0](T - T_0)} \right). \end{aligned} \quad (15)$$

Выражение (15) устанавливает взаимосвязь температуры нагрева метано-воздушной смеси со скоростью движения подвижного состава и коэффициентом трения в процессе взаимодействия колеса с поверхностью трения, учитывает ряд конструктивных особенностей подвижного состава (радиус катания колеса R_{κ} , максимально возможная конструктивная скорость v_{κ} , предельно допустимое сопротивление разрыву материала колеса $[y_0]$, теплопроводность метано-воздушной смеси λ , а также вертикальную нагрузку от колеса N).

Вариант статической нагрузки на рельс дает следующие результаты. Пусть рудничный электровоз сцепной массой m движется по рельсовому пути с некоторой скоростью v . Так как рудничные электровозы имеют две оси, нормальная сила прижатия колеса к рельсу составит $N = \frac{mg}{4}$. При этом можно допустить, что скорость вращения колеса соответствует

возможной конструктивной скорости электровоза v_{κ} . Величина пятна контакта $r = \frac{2R_{\kappa}}{[\sigma_0]} \sqrt{2E[\sigma_0] - E^2}$. Время перемещения точки контакта на величину радиуса пятна контакта при скорости v составит $\tau = \frac{2R_{\kappa}}{v[\sigma_0]} \sqrt{2E[\sigma_0] - E^2}$. Тогда $\omega_{\kappa} = \frac{v_{\kappa}}{R_{\kappa}}$. Тогда равенство (15)

примет вид

$$\begin{aligned} & \frac{v_{\kappa}^2 \sqrt{(2E[\sigma_0] - E^2)^3} R_{\kappa} k_{\text{тп}}^2 m^2 g^2}{512\lambda^2 v^2 [\sigma_0]^6 (T - T_0)^2} \\ & (v[\sigma_0]^3 - 64\pi^2 \lambda v R_{\kappa} \sqrt{2E[\sigma_0] - E^2} R_{\kappa} k_{\text{тп}} mg (2E[\sigma_0] - E^2) (T - T_0) + \\ & + 1024\pi^2 \lambda^2 v [\sigma_0] (T - T_0)^2 R_{\kappa}^2 (2E[\sigma_0] - E^2) - \\ & - 512\pi\lambda v [\sigma_0] (T - T_0) R_{\kappa} \sqrt{2E[\sigma_0] - E^2} + 32v[\sigma_0]^2 + 16v[\sigma_0]^2 \times \\ & \times \ln \left(\frac{v_{\kappa} \sqrt{2E[\sigma_0] - E^2} \frac{2R_{\kappa}}{v[\sigma_0]} \sqrt{2E[\sigma_0] - E^2} k_{\text{тп}} mg - 16\lambda R_{\kappa} (T - T_0) \sqrt{2E[\sigma_0] - E^2}}{4c\rho[\sigma_0](T - T_0)} \right) = 1. \end{aligned} \quad (16)$$

Колесные пары, используемые в подземном рельсовом транспорте, имеют диаметр круга катания 300, 350 или 400 мм [10]. Таким образом, можно принять $R_{\kappa} = 0,175$ м. Колеса или их бандажи изготавливаются из стали 55Л [11]. Для нее $[y_0] = 590$ МПа.

На подземном транспорте в эксплуатации находятся локомотивы со сцепным весом от 7,0 до 14,0 т (сдвоенные – до 28,0 т). Скорость движения поездов регламентируется требованиями безопасности [10] по техническому состоянию подвижного состава и путевого хозяйства в пределах 0,5-3,0 м/с при технической возможности локомотивов около 6 м/с и практической реализации около 6-8 м/с [12, 13].

В дальнейшем расчеты велись для локомотивов со сцепной массой $m=14000$ кг.

По данным [8] теплопроводность метаново-воздушной смеси при температуре $T_0=300$ К составляет $\lambda=0,0257$ Вт/(м·К), плотность $\rho=1,204$ кг/м³, а теплоемкость $c=1,005$ кДж/кг·К.

Метан обладает свойством воспламеняться от соприкосновения с источником высокой температуры с некоторым запаздыванием. Так, при температуре источника 650 °С метан воспламеняется через 10 с; при температуре 1000 °С – через 1 с; при 1200° и более – мгновенно [8]. График такой зависимости представлен на рис. 1.

Такая кривая описывается уравнением

$$\Delta T = -125,95 \ln \tau + 940 \quad (17)$$

Достоверность аппроксимации $R^2=0,9689$.

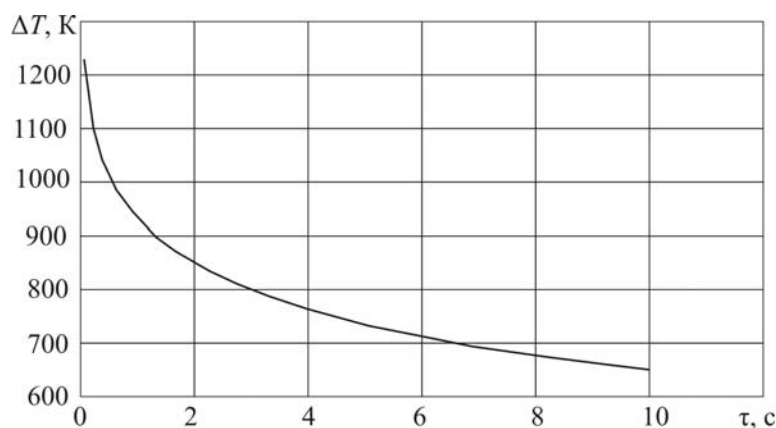


Рис. 1 – Зависимость температуры воспламенения метаново-воздушной смеси от времени соприкосновения с источником высокой температуры

В данном выражении $\Delta \dot{O}$ представляет собой превышение температуры воспламенения над температурой окружающей среды. Тогда формула (16) будет иметь вид:

$$\frac{v_k^2 \sqrt{(2E[\sigma_0] - E^2)^3} R_k k_{\text{тп}}^2 m^2 g^2}{512 \lambda^2 v^2 [\sigma_0]^6 (\Delta T)^2} + \ln \left[\frac{v[\sigma_0]^3 - 64 \pi^2 \lambda v_k R_k \sqrt{2E[\sigma_0] - E^2} R_k k_{\text{тп}} mg (2E[\sigma_0] - E^2) (\Delta T) + 1024 \pi^2 \lambda^2 v [\sigma_0] (\Delta T)^2 R_k^2 (2E[\sigma_0] - E^2) - 512 \pi \lambda v [\sigma_0] (\Delta T) R_k \sqrt{2E[\sigma_0] - E^2} + 32 v [\sigma_0]^2 + 16 v [\sigma_0]^2 \times \left(v_k \sqrt{2E[\sigma_0] - E^2} \frac{2R_k}{v[\sigma_0]} \sqrt{2E[\sigma_0] - E^2} k_{\text{тп}} mg - 16 \lambda R_k (\Delta T) \sqrt{2E[\sigma_0] - E^2} \right)}{4c\rho[\sigma_0](T - T_0)} \right] = 1. \quad (18)$$

Для заданных R_k , $[\sigma_0]$ и E такая зависимость имеет вид, приведенный на рис. 2.

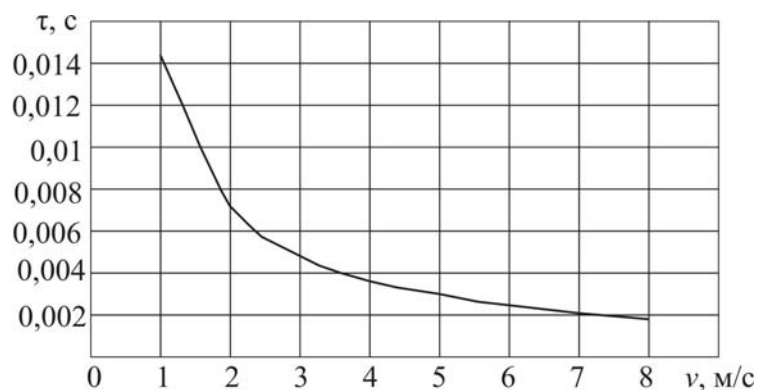


Рис. 2 – Зависимость времени нагрева от скорости движения состава

При этом график изменения температуры нагрева метаново-воздушной смеси для $k_{тр}=0,95$ будет иметь вид, приведенный на рис. 3.

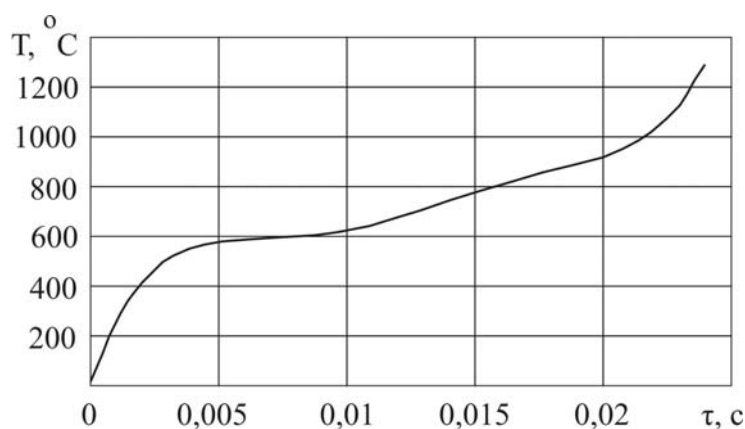


Рис. 3 – Зависимость температуры метаново-воздушной смеси от времени нагрева

При совмещении графиков, приведенных на рисунках 1 и 3, оценивается критическое время нагрева метаново-воздушной смеси (рис. 4), которое составляет порядка 10 мс.

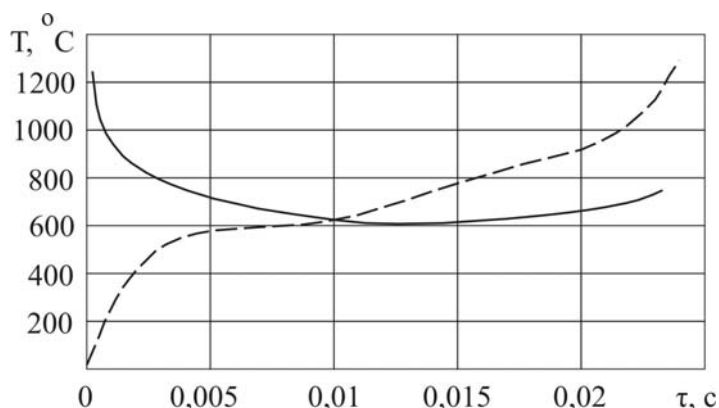


Рис. 4 – Определение критического времени нагрева метаново-воздушной смеси

Такое критическое время $\tau_{кр} \approx 10$ мс соответствует минимально допустимой скорости движения подвижного состава $v_{кр} \approx 1,44$ м/с, при которой температура нагрева метаново-воздушной смеси не достигнет температуры воспламенения.

Динамические усилия взаимодействия колес локомотива с рельсами превышают статические нагрузки в 1,5-2 раза.

При этом график изменения температуры нагрева метаново-воздушной смеси для $k_{тр}=0,95$, будет иметь вид, приведенный на рис. 5.

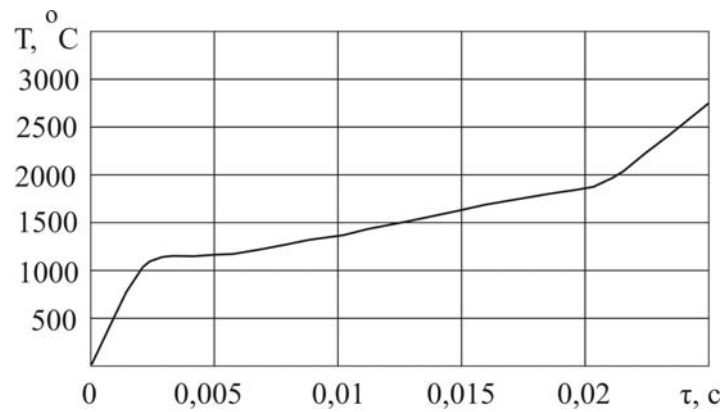


Рис. 5 – Зависимость температуры метаново-воздушной смеси от времени нагрева для случая динамических нагрузок

При совмещении графиков, приведенных на рисунках 1 и 5, оценивается критическое время нагрева метаново-воздушной смеси (рис. 6), которое составляет порядка 2,2 мс.

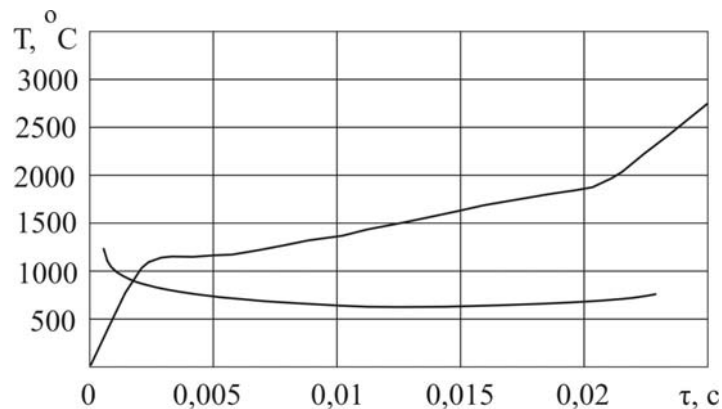


Рис. 6 – Определение критического времени нагрева метаново-воздушной смеси для случая динамических нагрузок

Такое критическое время $\tau_{кр} \approx 2,2$ мс соответствует минимально допустимой скорости движения подвижного состава $v_{кр} \approx 6,54$ м/с, при которой температура нагрева метаново-воздушной смеси не достигнет температуры воспламенения, т.е. практически для всего диапазона скоростей движения подвижного состава возможно достижение критических, с точки зрения возможного воспламенения, температур метаново-воздушной смеси.

Выводы. Получена закономерность изменений температуры нагрева пар трения от характеристики показателей движения транспортных средств, включительно скорость движения и коэффициент трения на примере двухосного шахтного локомотива.

Установлены показатели тормозных процессов от действия регулируемой величины нагрузки тормозных систем, что может способствовать воспламенению метано-воздушной смеси, а также – закономерности изменений температуры нагрева пар «колесо-рельс» от характеристики показателей движения транспортных средств, включительно скорости движения и коэффициента трения на примере двухосного шахтного локомотива.

Литература

1 Экономический механизм управления безопасностью труда на шахтах [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://masters.donntu.edu.ua/2005/fgtu/gorskaya/library/tekst5.htm>. – Загл. экрана.

- 2 Технические причины травматизма при электровозной откатке и пути их устранения А.А. Самородов, И.Т. Чуйко, А.Н. Гольцов, В.А. Равдонис // Уголь Украины. – 2003. – № 10. – С. 40–41.
- 3 Афонин, Г.С. Устройство и эксплуатация тормозного оборудования подвижного состава: Учебник для нач. проф. образования / Г.С. Афонин, В.Н. Барщенков, Н. В. Кондратьев. – М.: Издательский центр «Академия», 2005. – 304 с.
- 4 Галай Э.И. Проблемы торможения пассажирского состава / Э.И. Галай, П.К. Рудов // Локомотив. – 2003. – № 4. – С. 30-32.
- 5 Галай Е.И. Тормоза локомотивов и вагонов: проблемы и перспективы: Учебное пособие: Ч. 2. Повышение эффективности фрикционных тормозов. – Гомель: БелИИЖТ, 1992. – 71 с.
- 6 Основы трибологии (трение, износ, смазка) / Э.Д. Браун, Н.А. Буше, И.А. Буяновский [и др.]. / Под ред. А.В. Чичинадзе: Учебник для технических ВУЗов. – М.: Центр «Наука и техника», 1995. – 778 с.
- 7 Нащокин, В. В. Техническая термодинамика и теплопередача: Учеб. пособие для вузов / В.В. Нащокин.– 3-е изд., испр. и доп. – М: Высш. школа, 1980. – 469 с.
- 8 Араманович, И.Г. Уравнения математической физики / И.Г. Араманович, В.И. Левин. – М.: Наука, 1969. – 288 с.
- 9 Зельдович, Б.И. Элементы математической физики / Б И. Зельдович, А.Д. Мышкис. – М.: Наука, 1973. – 352с.
10. Подземный транспорт шахт и рудников: Справочник / Под общ. ред. Г.Я. Пейсаховича, И.П. Ремизова. – М.: Недра, 1985, – 565 с.
11. Писаренко, Г.С. Справочник по сопротивлению материалов / Г.С. Писаренко, А.П. Яковлев, В.В. Матвеев. – Киев: Наук. думка, 1988. – 735 с.
12. Правила безопасности в угольных и сланцевых шахтах: Утверждены М-вом угольн. пром-сти СССР. – М.: Недра, 1974. – 624 с.
- 13 Инструкция по эксплуатации и содержанию шахтных рельсовых путей: Утверждена М-вом угольн. пром-сти УССР. – Донецк: 1973. – 50 с.