

УДК 625.2-592.001.24

## ТЕПЛОВОЙ РЕЖИМ ФРИКЦИОННОГО ТОРМОЗА ЭЛЕКТРОПОЕЗДА ПРИ СКОРОСТНОМ РЕГУЛИРОВАНИИ СИЛЫ НАЖАТИЯ КОЛОДОК

В. А. БАЛАКИН<sup>а+</sup>, Э. И. ГАЛАЙ<sup>б</sup>

Рассмотрена постановка тепловой задачи в зоне фрикционного контакта колодка—колесо при экстренном торможении электропоезда в режиме скоростного регулирования нормальной нагрузки. Выведены формулы для расчета коэффициента распределения тепловых потоков, толщины теплового слоя, температурных полей в колодке и колесе, амплитуды температурных пульсаций на поверхности катания колеса.

**Ключевые слова:** колодочный тормоз, электропоезд, торможение, скорость, нормальная нагрузка, тепловыделение, температура.

**Введение.** Известно, что коэффициент трения в зоне контакта колесо—колодка при торможении железнодорожного подвижного состава зависит от силы нажатия (нормальной нагрузки) и скорости скольжения [1, 2].

Так, для фосфористых чугуновых колодок коэффициент трения выражается эмпирической формулой:

$$f = 0,5 \left( \frac{1,6N + 100}{5,2N + 100} \right) \left( \frac{v + 100}{5v + 100} \right), \quad (1)$$

где  $[N] = \text{кН}$ ,  $[v] = \text{км/ч}$ .

Расчетные значения коэффициента трения, найденные по формуле (1), в зависимости от скоростей при  $N = 26,3 \text{ кН}$  следующие:

v, км/ч	0	20	40	50	60	70	80	90	100	120	130	140	160
f	0,30	0,18	0,14	0,13	0,12	0,114	0,108	0,104	0,100	0,094	0,092	0,090	0,087

Отсюда видно, что при постоянной нормальной нагрузке сила трения в процессе торможения изменяется в 3,45 раза, возрастая к концу торможения. Для повышения эффективности работы тормозов электропоездов разработан метод скоростного регулирования тормозных нажатий [3, 4].

Сущность метода заключается во многоступенчатом регулировании давления в тормозных цилиндрах при торможении. Чем выше скорость движения подвижного состава, тем большее давление подается в тормозные цилиндры. По мере снижения скорости электропоезда давление в тормозной системе с помощью электронного регулятора тормозных нажатий ступенчато уменьшается.

Таким образом, многоступенчатое изменение нормальной нагрузки в зоне контакта колесо—колодка позволяет обеспечивать приблизительное постоянство силы трения.

Величина допускаемой тормозной силы, и следовательно допускаемой силы нажатия тормозных колодок определяется по условию безюзового торможения.

Это значит, что сила трения, возникающая в колодочных тормозах, должна согласовываться с условиями сцепления колес с рельсами. Результаты испытаний электропоезда

а Гомельский политехнический институт им. П. И. Сухого. Беларусь, 246746, г. Гомель, пр. Октября, 48.

б Белорусский государственный университет транспорта. г. Гомель.

+ Автор, с которым следует вести переписку.

ЭР9Е-611 с системой скоростного регулирования тормозных нажатий показали, что наибольшая сила нажатия чугунной колодки не должна превышать 40 кН [5].

**Постановка тепловой задачи.** При включении тормоза работа силы трения в зоне контакта колесо—колодка превращается в теплоту. Интенсивность фрикционного тепловыделения  $q(t) = f(t) p_a(t) v(t)$  в виде тепловых потоков  $q_1(t) = \alpha q(t)$  и  $q_2(t) = (1 - \alpha) q(t)$  распределяется между трущимися телами (колодкой и колесом). Колодочный тормоз оборудован двумя колодками, расположенными симметрично относительно вертикальной оси колеса. В условиях скоростного регулирования силы нажатия колодок  $f(t) p_a(t) \approx \text{const}$ , следовательно,  $T \approx \text{const}$ , а скорость подвижного состава уменьшается по закону, близкому к линейному:

$$v(t) = v_0 (1 - t/t_T).$$

Таким образом, интенсивность фрикционного тепловыделения в процессе торможения определяется выражениями:

$$q(t) = q_0 (1 - t/t_T), \quad (2)$$

где  $q_0 = T_{\text{т0}}/A_{a1}$ ,  $A_{a1} = lb$  соответственно,

$$q_1(t) = q_0 (1 - t/t_T), \quad (3)$$

$$q_2(t) = (1 - \alpha) q_0 (1 - t/t_T). \quad (4)$$

При фрикционном торможении колодки все время находятся в контакте с колесом на длине дуги  $2l$ , в то время как нагретые поверхностные слои колеса на длине дуги  $2\pi R - 2l$  в контакте с колодками не находятся и путем конвекции передают часть теплоты трения в окружающую среду.

Интенсивность конвективного теплообмена определяется уравнением Ньютона:

$$q_3(t) = \alpha' (t) [\vartheta_2(0, t) - \vartheta_c]. \quad (5)$$

Коэффициент теплоотдачи  $\alpha'$  зависит от скорости вращения колеса, силы, влажности и направления ветра (условия вынужденной конвекции). За время одного оборота колеса в него путем теплопроводности входит количество теплоты, равное  $q_2 2A_{a1} 2\pi/\omega$ , а с нагретой поверхности катания колеса путем вынужденной конвекции выходит в окружающую среду количество теплоты  $\alpha' (\vartheta_\pi - \vartheta_c)(A_{a2} - 2A_{a1}) 2\pi/\omega$ .

Аккумулированная колесом за его один оборот теплота

$$Q_2 = [2q_2 A_{a1} - \alpha' (\vartheta_\pi - \vartheta_c)(A_{a2} - 2A_{a1}) 2\pi/\omega], \quad (6)$$

где в первом приближении  $A_{a2} = 2\pi Rb$ .

Поделив левую и правую части уравнения (6) на  $2\pi A_{a2}/\omega$ , получаем значение средней интенсивности теплового потока, направленного в колесо в некоторый фиксированный момент времени  $t$ :

$$q_2'(t) = q_2(t) 2A_{a1}/A_{a2} - \alpha' [\vartheta_\pi(t) - \vartheta_c](1 - 2A_{a1}/A_{a2}),$$

или 
$$q_2'(t) = q_2(t) k_{\text{вз}}/A_{a2} - \alpha' [\vartheta_\pi(t) - \vartheta_c](1 - k_{\text{вз}}), \quad (7)$$

где 
$$k_{\text{вз}} = 2A_{a1}/A_{a2} = 2lb/2\pi Rb = l/\pi R.$$

Таким образом колодки нагреваются тепловым потоком  $q_1(t)$ , а колесо — тепловым потоком  $q_2'(t)$ . Наличие второго члена в уравнении (7) обуславливает возникновение температурных пульсаций на поверхности катания колеса в процессе фрикционного нагрева.

**Теоретическая часть.** Решение нестационарной температурной задачи трения, связанной с фрикционным нагревом колеса и колодки, требует необходимости выбора тепловой схемы, учитывающей геометрическую форму тел, начальные и граничные условия. Если за время торможения толщина теплового слоя в колесе будет значительно меньше его радиуса, а также, если пренебречь теплоотдачей в окружающую среду с его боковых сторон, то колесо можно рассматривать как полуограниченное тело, у которого  $R = \infty$ .

Под толщиной теплового слоя будем понимать толщину поверхностного слоя колеса, в котором происходит резкое изменение температуры. При этом приращение температуры в слое  $z_2 = \delta_2(t)$  пренебрежимо мало по сравнению с приращением температуры катания колеса.

Воспользуемся известным решением теории теплопроводности об одномерном нагревании полуограниченного тела, имеющего начальную температуру  $\vartheta_0 = \vartheta_c$ , постоянным тепловым потоком  $q_2$ , направленным перпендикулярно к его плоской границе  $z_2 = 0$ :

$$\vartheta_2(z_2, t) = \vartheta_c + \frac{2q_2 \sqrt{a_2 t}}{\lambda_2} \operatorname{ierfc} \frac{z_2}{2 \sqrt{a_2 t}}. \quad (8)$$

Приращение температуры в слое  $z_2 = \delta_2$  согласно соотношению (8) запишем в виде

$$\vartheta_2(\delta_2, t) - \vartheta_c = \frac{2q_2 \sqrt{a_2 t}}{\lambda_2} \operatorname{ierfc} \frac{\delta_2}{2 \sqrt{a_2 t}}, \quad (9)$$

на поверхности  $z_2 = 0$  оно запишется как

$$\vartheta_2(0, t) - \vartheta_c = \frac{2q_2 \sqrt{a_2 t}}{\lambda_2 \sqrt{\pi}}. \quad (10)$$

Принимая  $\delta_2 = k \sqrt{a_2 t}$ , уравнение (9) переписываем в виде

$$\vartheta_2(\delta_2, t) - \vartheta_c = \frac{2q_2 \sqrt{a_2 t}}{\lambda_2} \operatorname{ierfc} \frac{k}{2}. \quad (11)$$

Поделив левые и правые части выражений (11) и (10), получаем

$$\frac{\vartheta_2(\delta_2, t) - \vartheta_c}{\vartheta_2(0, t) - \vartheta_c} = \sqrt{\pi} \operatorname{ierfc} \frac{k}{2}.$$

Ниже приведены значения функции  $\operatorname{ierfc} k/2$  в зависимости от  $k/2$ :

$k/2$	0	0,2	0,5	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6
$\operatorname{ierfc} k/2$	0,5642	0,3866	0,1996	0,0912	0,0503	0,0260	0,0127	0,0058

и значения  $k$  при разных отношениях  $\frac{\vartheta_2(\delta_2, t) - \vartheta_c}{\vartheta_2(0, t) - \vartheta_c}$ :

$\frac{\vartheta_2(\delta_2, t) - \vartheta_c}{\vartheta_2(0, t) - \vartheta_c}$	0,01	0,05	0,10	0,20	0,40	0,60
$k$	3,20	2,40	1,94	1,44	0,90	0,54

Если принять  $\frac{\vartheta_2(\delta_2, t) - \vartheta_c}{\vartheta_2(0, t) - \vartheta_c} = 0,01$ , то  $k = 3,2$ . Таким образом толщину теплового слоя можно определить по формуле:

$$\delta_2(t) = 3,2 \sqrt{a_2 t}. \quad (12)$$

Принимая для случая экстренного торможения  $t_r = 60$  с,  $\lambda_2 = 43,0$  Вт/м·К,  $c_2 = 481$  Дж/кг·К,  $\rho_2 = 7850$  кг/м<sup>3</sup>,  $a_2 = \lambda_2 / c_2 \rho_2 = 11,4 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с, получаем  $\delta_2(t_r) = 0,084$  м. Поскольку  $R = 0,475$  м, то условие  $R \gg \delta_2(t)$  выполняется.

Следовательно, колесо можно рассматривать как полуограниченное тело. Чугунную колодку в тепловых расчетах будем принимать как плоскую неограниченную пластину с тепловой изоляцией стороны  $z_1 = h_1$ , противоположной нагреваемой  $z_1 = 0$ . Это позволяет задачу рассматривать как одномерную и пренебрегать теплоотдачей в окружающую среду. Таким образом, решение задачи о тепловом режиме фрикционного тормоза при скоростном регулировании силы нажатия колодок сводится к интегрированию линейного одномерного уравнения теплопроводности:

$$\frac{\partial \vartheta_{1,2}}{\partial z_{1,2}} = a_{1,2} \frac{\partial^2 \vartheta_{1,2}}{\partial z_{1,2}^2} \quad (13)$$

Граничные условия описываются зависимостями (3), (5), (7), а также

$$\frac{\partial \vartheta_1(h_1, t)}{\partial z_1} = 0, \quad \frac{\partial \vartheta_2(\infty, t)}{\partial z_2} = 0. \quad \text{Начальное условие: } \vartheta_0 = \vartheta_c.$$

Чтобы воспользоваться граничными условиями (3), (4), необходимо знать величину коэффициента распределения тепловых потоков  $\alpha$ . Его находят из условия равенства средних температур поверхности трения [6].

В начальные моменты времени торможения, когда  $\delta_1(t) \ll h_1$ , чугунную колодку можно рассматривать как полуограниченное тело, нагреваемое тепловым потоком  $q_1(t) = q_{cp}(t) = \text{const}$ .

Среднее приращение температуры поверхности трения колодки согласно выражению (10), равно

$$\vartheta_1(0, t) - \vartheta_c = \frac{2\alpha q_{cp} \sqrt{a_1 t}}{\lambda_1 \sqrt{\pi}} \quad (14)$$

В начальные моменты времени, когда разность температур  $\vartheta_2(0, t) - \vartheta_c$  в формуле (5) мала, можно пренебречь теплоотдачей в окружающую среду и соответственно пренебречь вторым членом правой части уравнения (7), считая, что нагрев производится тепловым потоком

$$q'_{2cp}(t) = (1 - \alpha) q_{cp} k_{вз} \approx \text{const}.$$

Тогда среднее приращение температуры поверхности катания колеса, будет определяться зависимостью:

$$\vartheta_2(0, t) - \vartheta_c = \frac{2(1 - \alpha) q_{cp} k_{вз} \sqrt{a_2 t}}{\lambda_2 \sqrt{\pi}} \quad (15)$$

Приравнивая правые части уравнений (14), (15), учитывая, что  $a_1 = \lambda_1/c_1\rho_1$ ,  $a_2 = \lambda_2/c_2\rho_2$  и выражая  $\alpha$ , имеем

$$\alpha = \frac{k_{вз} \sqrt{\lambda_1 c_1 \rho_1}}{k_{вз} \sqrt{\lambda_1 c_1 \rho_1} + \sqrt{\lambda_2 c_2 \rho_2}} \quad (16)$$

Воспользовавшись формулой (16), определим численное значение  $\alpha$  для современных колодочных тормозов. Исходные данные:  $\lambda_1 = 38$  Вт/м·К,  $\rho_1 = 7770$  кг/м<sup>3</sup>,  $\lambda_2 = 43$  Вт/м·К,  $c_1 = c_2 = 481$  Дж/кг·К,  $\rho_2 = 7850$  кг/м<sup>3</sup>,  $b = 0,08$  м,  $l = 0,381$  м,  $A_{a1} = lb = 0,0305$  м<sup>2</sup>,  $R = 0,475$  м,  $k_{вз} = l/\pi R = 0,255$ , тогда  $\alpha = 0,19$ .

Таким образом, в начальные моменты времени торможения в колодку направлен тепловой поток, соответствующий 19% от интенсивности фрикционного тепловыделения.

Естественно предположить, что с течением времени, по мере нагревания поверхности трения колеса и возникающего при этом конвективного теплообмена, доля теплоты трения, направленная в колодку, уменьшается. С учетом этого в работе [1] приводится следующее выражение (в наших обозначениях) для расчета коэффициента распределения теплового потока:

$$\alpha = \frac{k_{вз} \eta \sqrt{\lambda_1 c_1 \rho_1}}{k_{вз} \eta \sqrt{\lambda_1 c_1 \rho_1} + \sqrt{\lambda_2 c_2 \rho_2}}, \quad (17)$$

где  $\eta$  — функция числа Фурье для колодки, значения которой приведены ниже:

Fo <sub>1</sub>	0,1	0,5	1	2	3	4s	6	8	10	20	30	40
$\eta$	1	0,99	0,94	0,80	0,74	0,69	0,60	0,54	0,49	0,36	0,30	0,27

Зависимость числа Фурье от времени при  $a_1 = 10,1 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с,  $h_1 = 45$  мм следующая:

ТЕПЛОВОЙ РЕЖИМ ФРИКЦИОННОГО ТОРМОЗА ЭЛЕКТРОПОЕЗДА

$t, c$	1	4	10	20	30	60	100	120	180
$Fo_1$	0,005	0,020	0,050	0,100	0,150	0,300	0,500	0,600	0,900

Отсюда видно, что, если время торможения  $t_T \leq 100$  с, то  $\eta \approx 1$ . Если в процессе торможения  $\alpha = \text{const}$ , а тепловой поток в колодку уменьшается по линейному закону, то уравнение (3) запишется следующим образом:

$$q_1(t) = \alpha q_0 - (\alpha q_0 / t_T) t. \quad (18)$$

Формула (18) дает возможность использования метода суперпозиции при расчете температурного поля в колодке, а именно, позволяет рассматривать фрикционный нагрев как два независимых друг от друга тепловых процесса: от постоянного ( $\alpha q_0 = \text{const}$ ) и линейно изменяющегося ( $\alpha q_0 / t_T$ )  $t$  тепловых потоков с последующим алгебраическим сложением полученных данных.

Тогда приращения температур в колодке описываются зависимостью [7]:

$$\vartheta_1(z_1, t) - \vartheta_c = \frac{\alpha q_0 h_1}{\lambda_1} \theta'_1 - \frac{\alpha k h_1^3}{\lambda_1 a_1} \theta''_1, \quad (19)$$

$$\text{где } \theta'_1 = Fo_1 - \eta_1 + \frac{\eta_1^2}{2} + \frac{1}{3} + \sum_{n=1}^{\infty} A'_n \cos [\mu_n (1 - \eta_1)] \exp(-\mu_n^2 Fo),$$

$$\theta''_1 = \frac{Fo_1}{3} - Fo_1 \eta_1 + \frac{Fo_1 \eta_1^2}{2} + \frac{\eta_1^4}{24} - \frac{\eta_1^3}{6} + \frac{\eta_1^2}{6} - \frac{1}{45} - \sum_{n=1}^{\infty} A''_n \cos [\mu_n (1 - \eta_1)] \exp(-\mu_n^2 Fo_1),$$

$$Fo_1 = a_1 t / h_1^2, \quad \eta_1 = z_1 / h_1, \quad k = q_0 / t_T, \quad \mu_n = n\pi, \quad A'_n = (-1)^{n+1} 2 / \mu_n^2, \quad A''_n = (-1)^{n+1} 2 / \mu_n^4.$$

Значения функций  $\theta'_1$  и  $\theta''_1$  для поверхностного трения ( $\eta_1 = 0$ ) определяются выражениями:

$$\theta'_1(0) = Fo_1 + \frac{1}{3} + \sum_{n=1}^{\infty} A'_n \exp(-\mu_n^2 Fo_1),$$

$$\theta''_1(0) = \frac{Fo_1}{3} - \frac{1}{45} - \sum_{n=1}^{\infty} A''_n \exp(-\mu_n^2 Fo_1),$$

а приращение средней температуры на поверхности колодки —

$$\vartheta_1(0, t) - \vartheta_c = \frac{\alpha q_0 h_1}{\lambda_1} \theta'_1(0) - \frac{\alpha k h_1^3}{\lambda_1 a_1} \theta''_1(0). \quad (20)$$

**Пример расчета.** В качестве примера рассчитаем средние температуры поверхности колодки при экстренном торможении электропоезда со скорости 160 км/ч (44,4 м/с) в режиме скоростного регулирования силы нажатия колодок. В качестве исходных данных примем:  $N_{\text{max}} = 40$  кН,  $t_T = 60$  с,  $\alpha = 0,19$  значения  $\lambda_1, c_1, \rho_1, \lambda_2, c_2, \rho_2, a_1, a_2, h_1$  приведены выше.

По формуле (1) вычисляем коэффициент трения  $f = 0,077$ ; находим силу трения  $T = fN = 3080$  Н и определяем начальную интенсивность фрикционного тепловыделения  $q_0 = T v_0 / A_{a0} = 4,49$  МВт/м<sup>2</sup>. Формулу (20) переписываем в следующем виде:

$$\vartheta_1(0, t) - \vartheta_c = 1010 \theta'_1(0) - 3375 \theta''_1(0). \quad (21)$$

Результаты расчетов сведены в табл. 1.

Из данных, приведенных в таблице видно, что максимальная температура поверхности трения колодки и колеса наблюдается в промежуток времени от 20 до 30 с.

Как уже упоминалось выше, при выводе формулы для коэффициента распределения тепловых потоков средние температуры поверхностей трения колодки и колеса в зоне контакта принимались равными, т. е.  $\vartheta_1(0, t) = \vartheta_2(0, t)$ .

Таблица 1. Зависимость приращений средней температуры поверхности трения колодки от времени торможения

$t, c$	10	20	30	40	50	60
$Fo_1$	0,050	0,100	0,150	0,200	0,250	0,300
$\theta'_1(0)$	0,27	0,36	0,43	0,50	0,56	0,62
$\theta''_1(0)$	0,0084	0,024	0,044	0,067	0,094	0,124
$\vartheta_1(0, t) - \vartheta_c, K$	244	286	286	279	249	208

Температурное поле в колесе при экстренном торможении можно с достаточной для инженерных расчетов точностью аппроксимировать параболой:

$$\vartheta_2(z_2, t) = \vartheta_c + [\vartheta_2(0, t) - \vartheta_c][1 - z_2/\delta_2(t)]^2. \tag{22}$$

Проанализируем влияние конвективного теплообмена на температуру поверхности катания колеса за его один оборот. Будем считать, что  $\alpha'$  в процессе торможения уменьшается линейно, как и скорость, по зависимости

$$\alpha'(t) = \alpha'_0 \left( 1 - \frac{\alpha'_0 - \alpha'_T}{\alpha'_0} t/t_T \right). \tag{23}$$

Из формулы (23) видно, что при  $t = 0, \alpha' = \alpha'_0$ ; а при  $t = t_T \alpha'(t) = \alpha'_T$ .

Коэффициент теплоотдачи может быть подсчитан по эмпирической формуле [8]:

$$\alpha' = 16,7(1 + 0,6\sqrt{v}), \text{ Вт/м}^2\cdot\text{К, где } [v] = \text{км/ч.}$$

Это значит, что при  $t = 0, v = 160 \text{ км/ч, } \alpha'_0 = 143 \text{ Вт/м}^2\text{К; при } t = t_T, v = 0, \alpha'_T = 16,7 \text{ Вт/м}^2\text{К.}$

Из формулы (7) следует, что амплитуда температурных пульсаций на поверхности колеса пропорциональна отношению тепловых потоков:  $\frac{\alpha' [\vartheta_2(0, t) - \vartheta_c](1 - k_{вз})}{q_2(t) k_{вз}}$ .

Результаты численного анализа представлены в табл. 2.

Таблица 2. Влияние конвективного теплообмена на температуру поверхности трения колеса при торможении

$t, c$	10	20	30	40	50	59	60
$\alpha', \text{ Вт/м}^2\cdot\text{К}$	121	100	78,6	57,2	37,9	18,8	16,7
$\vartheta_2(0, t) - \vartheta_c, K$	244	286	286	279	249	213	208
$\alpha' [\vartheta_2(0, t) - \vartheta_c], \text{ кВт/м}^2$	29,5	28,6	22,5	16,0	9,44	4,00	3,47
$q(t), \text{ кВт/м}^2$	3742	2993	2245	1497	748	74,8	0
$q_2(t), \text{ кВт/м}^2$	3031	2424	1818	1213	606	60,6	0
$q_2(t)k_{вз}, \text{ кВт/м}^2$	773	618	464	309	155	15,5	0
$\alpha' [\vartheta_2(0, t) - \vartheta_c](1 - k_{вз}), \text{ кВт/м}^2$	22,0	21,3	16,8	11,9	7,03	2,98	2,58
$\alpha' [\vartheta_2(0, t) - \vartheta_c](1 - k_{вз})/q^2(t)k_{вз}$	0,028	0,034	0,036	0,038	0,045	0,192	—
$v, \text{ м/с}$	37,0	29,6	22,2	14,8	7,4	0,74	0
$t^*, c$	0,030	0,038	0,050	0,075	0,150	1,500	—
$\Delta\vartheta_2, K$	0,45	0,49	0,44	0,39	0,34	0,43	—

За один оборот колеса понижение температур возникает дважды — при выходе нагретых поверхностных слоев колеса из контакта с колодками. Время одного цикла конвективного теплообмена с воздухом зависит от скорости движения электропоезда и определяется соотношением

$$t^* = (\pi R - l)/v.$$

В соответствии с формулой (10), уменьшение температуры поверхности катания колеса (амплитуда пульсации) за счет конвекции можно найти из выражения:

$$\Delta\vartheta_2' = \frac{2\alpha' [\vartheta_2(0, t) - \vartheta_c] \sqrt{a_2 t^*}}{\lambda_2 \sqrt{\pi}}$$

За время  $t^*$  также идет процесс некоторого понижения температуры поверхности трения колеса за счет теплопроводности в нижележащие слои колеса (к его центру).

**Заключение.** В результате проведенных исследований показано, что скоростное регулирование нормальной нагрузки позволяет в процессе торможения обеспечивать постоянство силы трения, уменьшая при этом тормозные пути.

### Обозначения

$f$  — коэффициент трения;  $N$  — нормальная нагрузка;  $v$  — скорость;  $v_0$  — начальная скорость;  $t$  — время;  $t_T$  — полное время торможения;  $t^*$  — время одного цикла конвективного теплообмена поверхности катания колеса с воздухом;  $q$  — интенсивность фрикционного тепловыделения;  $q_0$  — начальная интенсивность тепловыделения;  $q_1, q_2, q_3$  — тепловой поток в колодку, колесо и окружающую среду;  $\alpha$  — коэффициент распределения тепловых потоков;  $\alpha'$  — коэффициент теплоотдачи;  $p_a$  — давление на номинальную площадь контакта;  $A_{a1}, A_{a2}$  — номинальная площадь контакта колодки с колесом и дорожки трения колеса;  $l, b$  — длина дуги и ширина колодки;  $R$  — радиус колеса;  $k_{вз}$  — коэффициент взаимного перекрытия;  $\omega$  — частота вращения колеса;  $\vartheta$  — температура;  $\vartheta_0, \vartheta_c$  — начальная температура и температура среды;  $\vartheta_{п}$  — температура поверхности;  $\delta_2$  — толщина теплового слоя колеса;  $\lambda_1, \lambda_2, \rho_1, \rho_2, c_1, c_2, a_1, a_2$  — теплопроводность, плотность, теплоемкость, температуропроводность колодки и колеса;  $Q_2$  — аккумулированная колесом теплота;  $\Delta\vartheta_2$  — амплитуда температурной пульсации;  $k$  — коэффициент.

### Литература

1. Иноземцев В. Г., Казаринов В. М., Ясенцев В. Ф. Автоматические тормоза. Москва: Транспорт (1981)
2. Крылов В. И., Перов А. И., Озолин А. К., Климов Н. Н. Справочник по тормозам. Москва: Транспорт (1975)
3. Галай Э. И. Повышение эффективности фрикционных колодочных тормозов // Динамика и прочность вагонов. Межвуз. сборник научных трудов. Москва: МИИТ (1986), вып. 780, 125—132
4. Способ регулирования силы нажатия тормоза железнодорожного транспортного средства: а. с. 1689160, СССР, МКИ В60Т8/00. Открытия, изобретения (1991), № 41 / Э. И. Галай
5. Галай Э. И. Исследование, разработка и внедрение способа и устройства для повышения эффективности тормозов электропоездов. Гомель: БГУТ (1995)
6. Балакин В. А., Сергиенко В. П., Комков О. Ю. Тепловые процессы, возникающие при включении фрикционных муфт и тормозов // Трение и износ, 17 (1996), № 5, 589—597
7. Балакин В. А., Переверзева О. В. Распределение теплоты между трущимися телами // Трение и износ, 13 (1992), № 3, 507—515
8. Казаринов В. М., Карвацкий Б. Л. Расчет и исследование автотормозов. Москва: Трансжелдориздат (1961)

Поступила в редакцию 15.09.97.

Balakin V. A., Galai E. I. Thermal conditions for electric train brake at speed control of block pressing force.

This is discussed the problem of thermal conditions in the block—wheel contact zone in case of urgent braking at speed control of normal load. The formulas are derived for calculating the coefficient of heat flow distribution, heat layer thickness, temperature fields in block and wheel, as well as temperature fluctuation amplitude on the wheel rolling surface.