

УДК 625.2-592.001.24

## РАСЧЕТ ПРИРАЩЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ В ОБОДЕ КОЛЕСА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПОДВИЖНОГО СОСТАВА ПРИ ТОРМОЖЕНИИ

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

Рассмотрен инженерный метод расчета средней температуры на поверхности катания колеса в процессе экстренного торможения железнодорожного подвижного состава. Приведены примеры расчета температуры, с использованием исходных данных по результатам натурных испытаний колодочных тормозов.

**Ключевые слова:** колодочный тормоз, железнодорожный состав, торможение, расчет, температура,

**Введение.** Железнодорожное колесо, содержащее ступицу, диск и обод с ребордой имеет сложный профиль. В процессе эксплуатации из-за изнашивания поверхности катания колеса толщина  $h_2$  обода уменьшается.

У нового колеса  $h_2 = 70$  мм, у изношенного она может достигать 25 мм. Ширина обода колеса больше ширины чугунной колодки и ширины диска. На поверхности фрикционного контакта, если оперировать средними значениями параметров, выполняются условия [1, 2]

$$q(t) = \frac{T(t)v(t)}{2A_{a_1}}, \quad q(t) = q_1(t) + q_2(t), \quad q_1(t) = \alpha_T q(t), \quad q_2(t) = (1 - \alpha_T)q(t),$$

где

$$\alpha_T = \frac{K_{вз} \sqrt{\lambda_1 c_1 \rho_1}}{K_{вз} \sqrt{\lambda_1 c_1 \rho_1} + \sqrt{\lambda_2 c_2 \rho_2}}. \quad (1)$$

**Постановка задачи.** Распределение теплового потока в радиальном направлении от поверхности катания колеса к его оси является сложным и зависит от времени торможения. Наличие теплопроводности в сторону реборды требует решения двумерного уравнения теплопроводности Фурье. С течением времени обод прогревается на всю толщину и возникает теплообмен с окружающей средой (рис. 1).

Конвективные тепловые потоки  $q_3(t) = \alpha'[\vartheta_2(h_2, t) - \vartheta_c]$  и  $q_4(t) = \alpha''[\vartheta_2^*(t) - \vartheta_c]$  зависят от коэффициентов теплоотдачи, которые в свою очередь являются функцией скорости вращения колеса и разностей температур нагретых поверхностей обода и среды. Сложность граничных условий не позволяет найти точные решения двумерного уравнения теплопроводности Фурье. Анализ тепловой схемы (рис. 1) показывает, что наиболее нагретыми будут левые грани колодки и обода.

Если колодку и обод рассматривать как неограниченные пластины, то полученные решения для температурных распределений окажутся несколько завышенными. Такую методику теплового расчета колодочного тормоза можно рассматривать как инженерную, дающую результат верхнего предела средних температур поверхностей трения.

а Белорусский государственный университет транспорта. г. Гомель.

б Гомельский государственный технический университет им. П. О. Сухого. Беларусь, 246746, г. Гомель, пр. Октября, 48.

\* Автор, с которым следует вести переписку.

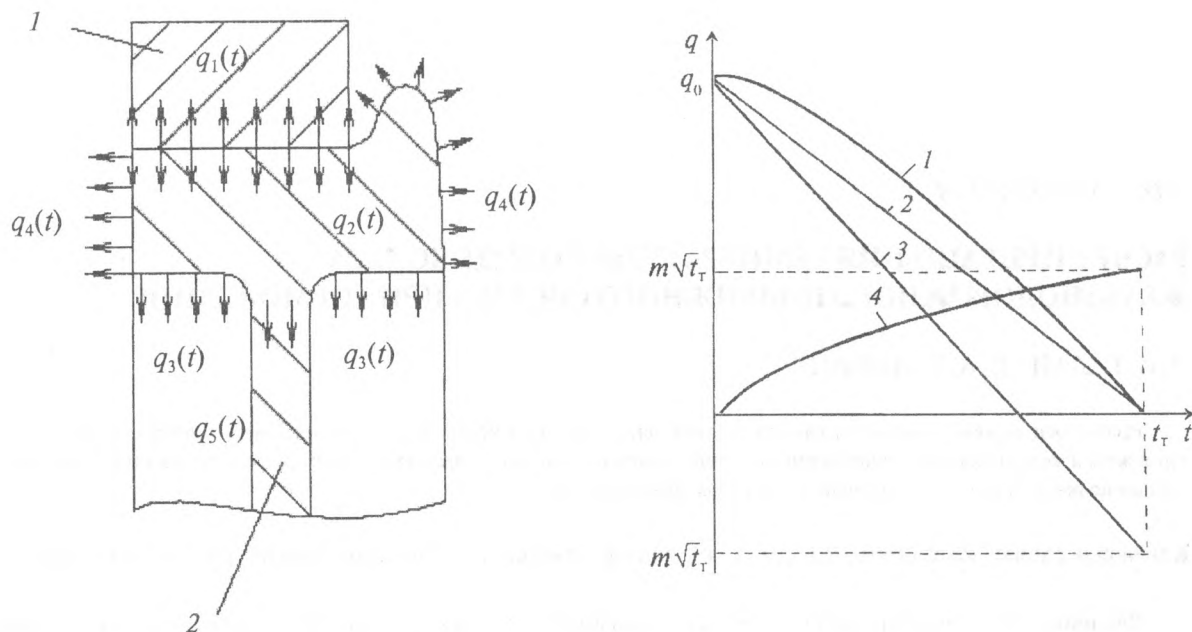


Рис. 1. Тепловая схема фрикционного контакта чугунной колодки 1 с колесом 2

Рис. 2. Зависимость интенсивности тепловыделения от текущего времени: 1 –  $q(t)$ ; 2 –  $q_0(1 - t/t_\tau)$ ; 3 –  $q^*(t)$ ; 4 –  $q^{**}(t)$

**Теоретическая часть.** Рассмотрим случай торможения железнодорожного подвижного состава, при котором интенсивность фрикционного тепловыделения в зоне контакта чугунная колодка–колесо представляет собой кривую выпуклостью вверх (рис. 2).

Площадь под кривой 1 на рис. 2 больше площади под линейной зависимостью 2. Соответственно больше будут и тепловые потоки, направленные в элементы трущихся пар.

Пользуясь методом суперпозиции кривую 1 можно получить сложением ординат прямой 3 и параболы 4 в промежутке времени  $t$  от 0 до  $t_\tau$ . Таким образом

$$q(t) = q^*(t) + q^{**}(t), \tag{2}$$

где

$$q^*(t) = q_0 \left( 1 - \frac{t}{t_\tau} \right) - m \sqrt{t_\tau} \frac{t}{t_\tau}, \tag{3}$$

$$q^{**}(t) = m \sqrt{t}. \tag{4}$$

Численные значения коэффициента  $m$  определяют характер выпуклости кривой 4 и соответственно 1 на рис. 2. Уравнение (2) перепишем в виде

$$q(t) = q_0 - \frac{q_0}{t_\tau} t - \frac{m}{\sqrt{t_\tau}} t + m \sqrt{t}. \tag{5}$$

Тепловые потоки в этом случае равны

$$q_{1,2}(t) = q_{1,2} - k_{1,2} t + m_{1,2} \sqrt{t}, \tag{6}$$

где

$$q_1 = \alpha_\tau q_0, \quad q_2 = (1 - \alpha_\tau) q_0, \quad k_1 = \alpha_\tau \left( \frac{q_0}{t_\tau} + \frac{m}{\sqrt{t_\tau}} \right), \quad k_2 = (1 - \alpha_\tau) \left( \frac{q_0}{t_\tau} + \frac{m}{\sqrt{t_\tau}} \right), \quad m_1 = \alpha_\tau m, \quad m_2 = (1 - \alpha_\tau) m.$$

Процесс теплопроводности в колесе при торможении будем описывать одномерным уравнением Фурье

$$\frac{\partial \vartheta_2}{\partial t} = a_2 \frac{\partial^2 \vartheta_2}{\partial z_2^2}. \quad (7)$$

В соответствии с уравнением (6) на основе использования метода суперпозиции граничные условия на поверхности трения колеса для отдельных независимых друг от друга решений можно представить в виде

$$q_2 = -\lambda_2 \frac{\partial \vartheta_2}{\partial z_2} = \text{const}, \quad (8)$$

$$q_2(0, t) = -\lambda_2 \frac{\partial \vartheta_2}{\partial z_2} = k_2 t, \quad (9)$$

$$q_2(0, t) = -\lambda_2 \frac{\partial \vartheta_2}{\partial z_2} = m_2 \sqrt{t}, \quad (10)$$

На поверхности  $z_2 = h_2$  граничные условия выразим зависимостями

$$q_2(h_2, t) = -\lambda_2 \frac{\partial \vartheta_2}{\partial z_2} = 0, \quad (11)$$

$$q_3(h_2, t) = -\lambda_2 \frac{\partial \vartheta_2}{\partial z_2} = \alpha' [\vartheta_2(h_2, t) - \vartheta_c]. \quad (12)$$

Формула (11) математически описывает случай нагрева теплоизолированной со стороны  $z_2 = h_2$  пластины. Формула (12) указывает на конвективный теплообмен пластины с окружающей средой со стороны  $z_2 = h_2$ .

Начальное условие примем в виде

$$\vartheta_2(z_2, 0) = \vartheta_0. \quad (13)$$

Решение уравнения (7) при граничных (8)–(11) и начальном (13) условиях дает следующие выражения для приращений температур по толщине обода колеса [1, 2]:

$$\vartheta_2(\eta_2, Fo_2) - \vartheta_0 = \frac{q_2 h_2 K_{\text{вз}}}{\lambda_2} \Theta_2'(\eta_2, Fo_2), \quad (14)$$

$$\vartheta_2(\eta_2, Fo_2) - \vartheta_0 = \frac{k_2 h_2^3 K_{\text{вз}}}{\lambda_2 a_2} \Theta_2''(\eta_2, Fo_2), \quad (15)$$

$$\vartheta_2(\eta_2, Fo_2) - \vartheta_0 = \frac{m_2 h_2^2 K_{\text{вз}}}{\lambda_2 \sqrt{a_2}} \Theta_2'''(\eta_2, Fo_2), \quad (16)$$

где

$$\Theta'_2(\eta_2, Fo_2) = Fo_2 - \eta_2 + \frac{\eta_2^2}{2} + \frac{1}{3} + \sum_{n=1}^{\infty} A'_n \cos [\mu_n (1 - \eta_2)] \exp(-\mu_n^2 Fo_2),$$

$$\eta_2 = \frac{z_2}{h_2}, \quad Fo_2 = \frac{a_2 t}{h_2^2}, \quad A'_n = (-1)^{n+1} \frac{2}{\mu_n^2}, \quad \mu_n = n\pi,$$

$$\Theta''_2(\eta_2, Fo_2) = \frac{Fo_2^2}{2} + \frac{Fo_2}{3} - Fo_2 \eta_2 + \frac{Fo_2 \eta_2^2}{2} + \frac{\eta_2^4}{24} - \frac{\eta_2^3}{6} + \frac{\eta_2^2}{6} - \frac{1}{45} - \sum_{n=1}^{\infty} A''_n \cos [\mu_n (1 - \eta_2)] \exp(-\mu_n^2 Fo_2), \quad A''_n = (-1)^{n+1} \frac{2}{\mu_n^4},$$

$$\Theta'''_2(\eta_2, Fo_2) = \Gamma \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ 1 + \frac{(2n-2+\eta_2)^2}{2Fo_2} \operatorname{erfc} \frac{2n-2+\eta_2}{2\sqrt{Fo_2}} - \frac{2n-2+\eta_2}{\sqrt{\pi Fo_2}} \exp \left[ -\frac{(2n-2+\eta_2)^2}{4Fo_2} \right] + \left[ 1 + \frac{(2n-\eta_2)^2}{2Fo_2} \right] \operatorname{erfc} \frac{2n-\eta_2}{2\sqrt{Fo_2}} - \frac{2n-\eta_2}{\sqrt{\pi Fo_2}} \exp \left[ -\frac{(2n-\eta_2)^2}{4Fo_2} \right] \right\}.$$

Воспользовавшись зависимостями (14)–(16), приращения температур от тепловых потоков, описываемых уравнениями (8)–(10), представим в виде суммы решений

$$\vartheta_2(\eta_2, Fo_2) - \vartheta_0 = \frac{q_2 h_2 K_{\text{вз}}}{\lambda_2} \Theta'_2(\eta_2, Fo_2) - \frac{k_2 h_2^3 K_{\text{вз}}}{\lambda_2 a_2} \Theta''_2(\eta_2, Fo_2) + \frac{m_2 h_2^2 K_{\text{вз}}}{\lambda_2 \sqrt{a_2}} \Theta'''_2(\eta_2, Fo_2). \quad (17)$$

Решение уравнения (7) при граничных (8), (12) и начальном (13) условиях с учетом того, что  $\alpha' = \text{const}$  дает выражение для приращений температур в виде [3]

$$\vartheta_2(\eta_2, Fo_2) - \vartheta_0 = \frac{q_2 h_2 K_{\text{вз}}}{\lambda_2} \Theta'''_2(\eta_2, Fo_2),$$

где

$$\Theta'''_2(\eta_2, Fo_2) = 1 - \eta_2 + \frac{1}{Bi_2} - \sum_{n=1}^{\infty} A'''_n \cos [\mu_n \eta_2] \exp(-\mu_n^2 Fo_2),$$

$$Bi_2 = \frac{\alpha' h_2}{\lambda_2}, \quad \operatorname{ctg} \mu_n = \frac{1}{Bi_2} \mu_n, \quad A'''_n = \frac{2(\mu_n + Bi_2^2)}{\mu_n^2 (\mu_n^2 + Bi_2^2 + Bi_2)}.$$

В соответствии с методом суперпозиции на основе решений (15), (16) и (18) выражение для приращений температур описывается зависимостью [4]

$$\vartheta_2(\eta_2, Fo_2) - \vartheta_0 = \frac{q_2 h_2 K_{\text{вз}}}{\lambda_2} \Theta'''_2(\eta_2, Fo_2) - \frac{k_2 h_2^3 K_{\text{вз}}}{\lambda_2 a_2} \Theta''_2(\eta_2, Fo_2) + \frac{m_2 h_2^2 K_{\text{вз}}}{\lambda_2 \sqrt{a_2}} \Theta'''_2(\eta_2, Fo_2). \quad (19)$$

**Результаты испытаний.** В июле и октябре 1997 г. на участке железной дороги Минск–Брест проводились испытания колодочных тормозов [5]. Зависимость интенсивности фрикционного тепловыделения от времени торможения для одного из экспериментов приведена ниже.

q, кВт/м <sup>2</sup>																					
0	169	959	2018	2981	3674	4060	3882	3654	3424	3000	2773	2376	2149	1808	1562	1163	865	682	462	180	0
t, с																					
0	0,4	0,8	1,4	2,2	3,0	3,8	8,1	14,3	16,5	20,7	24,8	28,9	33,0	36,9	40,6	44,0	47,2	48,5	49,7	50,5	50,7

Время переходного процесса нарастания давления в тормозной системе было равно 3,8 с. Полное время торможения  $t_\tau = 50,7$  с.

**Пример теплового расчета.** Рассчитаем средние приращения температур в ободах колес разной толщины ( $h_2 = 70; 25$  мм) при экстренном торможении электропоезда со скорости 130 км/ч (36,1 м/с). Исходные данные:  $\lambda = 38$  Вт/(м·К),  $\rho_1 = 7700$  кг/м<sup>3</sup>,  $\lambda_2 = 43$  Вт/(м·К),  $c_1 = c_2 = 480$  Дж/(кг·К),  $\rho_2 = 7850$  кг/м<sup>3</sup>,  $a_2 = 11,4 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с,  $l = 0,381$  м,  $R_1 = 0,475$  м,  $R_2 = 0,4705$  м,  $K_{вз} = 1/\pi R_1 = 0,255$ ;  $K_{вз} = 1/\pi R_2 = 0,258$ ,  $\vartheta_0 = \vartheta_c$ .

Значение коэффициента  $m$  можно вычислить следующим образом. Возьмем интеграл по времени  $t^*$  в пределах от 0 до  $t_\tau^*$  для правой части уравнения (5):

$$\Omega(t_\tau^*) = \int_0^{t_\tau^*} \left( q_0 - \frac{q_0}{t_\tau^*} t - \frac{m}{\sqrt{t_\tau^*}} t + m\sqrt{t} \right) dt = q_0 t_\tau^* - \frac{q_0 t_\tau^{*2}}{2} - \frac{m t_\tau^{*3/2}}{2} + \frac{2}{3} m t_\tau^{*3/2}. \quad (20)$$

Выражая из формулы (20)  $m$ , имеем

$$m = 6 \left[ \Omega(t_\tau^*) - \frac{q_0 t_\tau^{*2}}{2} \right] / t_\tau^{*3/2}. \quad (21)$$

Разность  $\Omega(t_\tau^*) - \frac{q_0 t_\tau^{*2}}{2}$  в этом уравнении положительна, ее геометрическим смыслом является размер площади между кривыми 1 и 2 на рис. 2.

За время переходного процесса  $t_1 = 3,8$  с среднее приращение температуры в зоне фрикционного контакта колесо—колодка повышается до 118 К [4] и в его конце интенсивность фрикционного тепловыделения достигает максимума —  $q_0 = 4060$  кВт/м<sup>2</sup>.

Результаты испытаний показали, что зависимость  $q(t')$  представляет собой кривую выпуклостью вверх. Экспериментальная величина площади  $\Omega(t_\tau^*) = 116895$  кДж/м<sup>2</sup>. По формуле (23) вычисляем  $m = 405,4$  кВт/(м<sup>2</sup>·с<sup>1/2</sup>). Находим значения параметров, входящих в уравнение (17):

$$k_2 = (1 - \alpha_\tau) \left( \frac{q_0}{t_\tau^*} + \frac{m}{\sqrt{t_\tau^*}} \right) = 118 \text{ кВт}/(\text{м}^2 \cdot \text{с}),$$

$$m_2 = (1 - \alpha_\tau) m = 328 \text{ кВт}/(\text{м}^2 \cdot \text{с}^{1/2}),$$

$$\frac{q_2 h_2 K_{вз}}{\lambda_2} = \frac{(1 - \alpha_\tau) q_0 h_2}{\lambda_2} = 1365 \text{ К} \text{ — для нового обода,}$$

$$\frac{q_2 h_2 K_{вз}}{\lambda_2} = \frac{(1 - \alpha_\tau) q_0 h_2}{\lambda_2} = 488 \text{ К} \text{ — для изношенного обода,}$$

$$\frac{k_2 h_2^3 K_{вз}}{\lambda_2 a_2} = 21055 \text{ К} \text{ — для нового обода,}$$

$$\frac{k_2 h_2^3 K_{вз}}{\lambda_2 a_2} = 959 \text{ К} \text{ — для изношенного обода,}$$

$$\frac{m_2 h_2^2 K_{вз}}{\lambda_2 \sqrt{a_2}} = 2823 \text{ К} \text{ — для нового обода,}$$

$$\frac{m_2 h_2^2 K_{вз}}{\lambda_2 \sqrt{a_2}} = 360 \text{ К} \text{ — для изношенного обода.}$$

Для определения приращений температур в ободке нового колеса выражение (17) с учетом численных значений параметров представим в виде

$$\vartheta_2(\eta_2, Fo_2) - \vartheta_0 = 1365\Theta'_2(\eta_2, Fo_2) - 21055\Theta''_2(\eta_2, Fo_2) + 2823\Theta'''_2(\eta_2, Fo_2). \quad (22)$$

Для расчета приращений температур в ободке изношенного колеса выражение (17) при соответствующих значениях параметров записываем в виде

$$\vartheta_2(\eta_2, Fo_2) - \vartheta_0 = 488\Theta'_2(\eta_2, Fo_2) - 959\Theta''_2(\eta_2, Fo_2) + 360\Theta'''_2(\eta_2, Fo_2). \quad (23)$$

В уравнении (22) число Фурье находится при толщине обода  $h_2 = 70$  мм, в уравнении (23) при  $h_2 = 25$  мм.

В таблице приведены результаты теплового расчета ободков колес разной толщины. Приращения температур определяли с момента времени  $t = 3,8$  с. В этом случае  $Fo_2 = a_2(t - t_1)/h_2^2$ .

Анализ расчетных данных показывает, что за время экстренного торможения в ободке колеса толщиной  $h_2 = 70$  мм максимальное приращение температуры, равное 247 К, возникает на 35-й с торможения. На поверхности  $\eta_2 = 1$  нагрев практически отсутствует.

Фрикционный нагрев обода

$t, \text{ с}$	$Fo_2$	$\Theta'_2(0, Fo_2)$	$\Theta'_2(1, Fo_2)$	$\Theta''_2(0, Fo_2)$	$\Theta''_2(1, Fo_2)$	$\Theta'''_2(0, Fo_2)$	$\Theta'''_2(1, Fo_2)$	$\vartheta_2(0, Fo_2) - \vartheta_0, \text{ К}$	$\vartheta_2(1, Fo_2) - \vartheta_0, \text{ К}$
$h_2 = 70 \text{ мм}$									
10	0,014	0,118	0,000	0,003	0,000	0,010	0,000	126	0
16	0,028	0,179	0,000	0,006	0,000	0,020	0,000	174	0
22	0,042	0,222	0,000	0,010	0,000	0,035	0,000	213	0
28	0,056	0,283	0,000	0,014	0,000	0,052	0,000	238	0
35	0,073	0,311	0,000	0,018	0,000	0,710	0,000	247	0
42	0,089	0,337	0,001	0,025	0,000	0,090	0,000	188	3
50,7	0,109	0,358	0,002	0,032	0,000	0,112	0,000	135	7
$h_2 = 25 \text{ мм}$									
10	0,113	0,362	0,002	0,039	0,000	0,12	0,000	183	1
16	0,233	0,524	0,078	0,079	0,009	0,20	0,000	260	29
22	0,332	0,650	0,181	0,130	0,024	0,29	0,098	296	100
28	0,441	0,771	0,285	0,218	0,045	0,40	0,119	311	139
35	0,569	0,902	0,402	0,330	0,087	0,49	0,170	302	174
42	0,697	1,030	0,530	0,453	0,146	0,61	0,269	289	216
50,7	0,855	1,188	0,688	0,629	0,243	0,83	0,380	276	240

В ободке колеса толщиной  $h_2 = 25$  мм максимальное приращение температуры, равное 311 К, соответствует 28-й с торможения. При этом на поверхности  $\eta_2 = 1$  к концу торможения температура достигает 240 К.

**Заключение.** Метод инженерного расчета приращений температур в ободке железнодорожного колеса, изложенный в данной статье, несколько завышает данные о температурах по сравнению с истинными значениями. Причем оно тем больше, чем тоньше обод.

### Обозначения

$t$  — время;  $t_1$  — время переходного процесса;  $t_r$  — полное время торможения;  $t^*$  — время, отсчитываемое с момента  $t_1$ ;  $t_r^*$  — время торможения с момента  $t_1$ ;  $T$  — сила трения;  $v$  — скорость;  $A_{a1,2}$  — номинальные площади контакта колодки и дорожки трения колеса;  $K_{вз}$  — коэффициент взаимного перекрытия;  $l$  — длина дуги колодки;  $R_1$  — радиус нового колеса;  $R_2$  — радиус изношенного колеса;

#### РАСЧЕТ ПРИРАЩЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ В ОБОДЕ КОЛЕСА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПОДВИЖНОГО СОСТАВА

$h_2$  — толщина обода колеса;  $q$  — интенсивность фрикционного тепловыделения;  $q_0$  — максимальная интенсивность тепловыделения в момент времени  $t_1$ ;  $\vartheta_0, \vartheta_c$  — начальная температура и температура среды;  $q_{1,2}$  — тепловые потоки в колодку и колесо;  $q_{3,4}$  — тепловые потоки в окружающую среду;  $q_5$  — тепловой поток в диск;  $\alpha_r$  — коэффициент распределения тепловых потоков;  $\lambda_{1,2}, c_{1,2}, \rho_{1,2}, a_{1,2}$  — теплопроводность, теплоемкость, плотность, температуропроводность колодки и колеса;  $\alpha', \alpha''$  — коэффициент теплоотдачи;  $z_2$  — координата по нормали к поверхности трения колеса;  $\eta_2$  — безразмерная координата;  $Fo_2, Bi_2$  — числа Фурье и Био для колеса;  $k_1, k_2, m, m_1, m_2$  — коэффициенты;  $\Gamma$  — гамма-функция;  $\Theta_2', \Theta_2'', \Theta_2''', \Theta_2''''$  — безразмерные комплексы;  $\Omega$  — площадь под температурной кривой.

#### Литература

1. Балакин В. А., Галай Э. И. Тепловой режим фрикционного тормоза электропоезда при скоростном регулировании силы нажатия колодок // Трение и износ, **18** (1997), № 5, 636—642
2. 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
3. Лыков А. В. Теория теплопроводности. М.: Высшая школа (1967)
4. Галай Э. И., Балакин В. А. Тепловой режим железнодорожного фрикционного тормоза большой мощности в переходном периоде нарастания тормозной силы // Трение и износ, **20** (1999), № 2, 137—143
5. Галай Э. И., Балакин В. А. Испытания и тепловой расчет колодочных тормозов железнодорожного подвижного состава // Трение и износ, **20** (1999), № 5, 480—488

*Поступила в редакцию 06.09.99.*

Galay E.I. and Balakin V.A. Calculation of temperature rise in the railway wheel rim in braking.

An engineering method of calculating the mean temperature on the rolling surface of the wheel has been analyzed when the railway train is braked in emergency. Examples of temperature calculations are shown in which the original data have been borrowed from full-scale tests of shoe brakes and the thickness of the wheel rim corresponds to that of the new and worn wheels.