

УДК 625.2-592.001.24

## ИСПЫТАНИЯ И ТЕПЛОВОЙ РАСЧЕТ КОЛОДОЧНЫХ ТОРМОЗОВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПОДВИЖНОГО СОСТАВА

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

Рассмотрены результаты натурных испытаний колодочных фрикционных тормозов, применяемых на железнодорожном подвижном составе. Приведен расчет температур поверхности трения колодок разной толщины с учетом теплоотдачи в окружающую среду.

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

**Введение.** Важнейшим условием увеличения скорости и массы поезда при надежном обеспечении безопасности движения является высокая эффективность тормозов. Планируется, что в Беларуси массовые пригородные и междугородные пассажирские перевозки на железнодорожном транспорте будут выполняться со скоростью до 130 км/ч подвижным составом, оборудованным колодочными и дисковыми тормозами. Максимальные значения сил трения, которые можно реализовать в таких тормозах, ограничены по условиям сцепления колес с рельсами и по тепловому режиму фрикционных узлов. Уровень использования запаса по сцеплению при торможении пассажирских и моторвагонных поездов не превышает 50—70%. Одним из способов реализации имеющегося запаса мощности тормозов может быть применение автоматического регулирования тормозной силы в зависимости от скорости движения. При этом сила нажатия тормозных колодок на высокой скорости в 1,5—2,0 раза превышает силу нажатия штатного тормоза. Соответственно возрастает и тепловая нагруженность фрикционной пары колодка—колесо.

В 1997 г. на Белорусской железной дороге проводились испытания электропоезда ЭР9Е-611, оборудованного устройствами для многоступенчатого автоматического изменения силы нажатия чугунных тормозных колодок в соответствии с программой, позволяющей практически полностью использовать расчетное сцепление колес с рельсами.

В ходе испытаний электропоезда было произведено 84 экстренных торможения с применением системы скоростного регулирования и 26 торможений штатным тормозом с различных начальных скоростей.

Испытания показали высокую эффективность модернизированных тормозов. Сокращение длины тормозного пути при экстренных торможениях электропоезда составило 18—22% по сравнению с торможением штатным тормозом. Нормальная сила нажатия тормозных колодок в наиболее нагруженных моторных выгонах достигала 45 кН при конструктивной — 27 кН.

Температурный режим фрикционного узла не превышал допустимых значений, что подтвердило сделанные ранее выводы по результатам тепловых расчетов.

Методика и результаты решения задачи по определению параметров нестационарного теплового режима в зоне фрикционного контакта колодка—колесо приведены ниже.

**Постановка тепловой задачи.** Работа колодочных тормозов происходит в двух режимах: 1 — переходной период нарастания тормозной силы продолжительностью до 5 с и 2 — рабочий период торможения с заданным давлением в тормозных цилиндрах [1, 2]. Допускаемая толщина чугунных

<sup>а</sup> Белорусский государственный университет транспорта. г. Гомель.

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

<sup>+</sup> Автор, с которым следует вести переписку.

тормозных колодок находится в пределах от 12 мм (у изношенных) до 60 мм (у новых). Чем меньше толщина колодок, тем больше теплоты аккумулирует единица их массы, тем выше температура на поверхности  $z_1 = h_1$  и тем больше теплоотдача в окружающую среду.

При решении тепловой задачи будем считать, что:

— в переходном периоде нарастания тормозной силы интенсивность фрикционного тепловыделения, а следовательно и тепловой поток, направленный в чугунную колодку, возрастают по линейному закону;

— в рабочем периоде торможения с заданным давлением в тормозных цилиндрах интенсивность фрикционного тепловыделения и тепловой поток — уменьшается по линейной зависимости от времени.

Чугунные колодки принимаем за неограниченные пластины толщиной  $h_1$ . Коэффициент распределения тепловых потоков определяем по формуле [2]

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

Расчет приращений температур в колодке будем вести в одномерной постановке задачи как без учета теплоотдачи в окружающую среду, так и с учетом теплоотдачи. При этом воспользуемся точными решениями классической теории теплопроводности и методом суперпозиции [3—6].

**Теоретическая часть.** В переходном периоде срабатывания тормозов одномерный фрикционный нагрев линейно возрастающим тепловым потоком колодки представляем системой уравнений

$$\frac{\partial \vartheta}{\partial t} = a_1 \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial z_1^2}, \quad (2)$$

$$q_1 = kt = -\lambda_1 \frac{\partial \vartheta(0, t)}{\partial z_1}, \quad (3)$$

$$\frac{\partial \vartheta(h_1, t)}{\partial z_1} = 0, \quad (4)$$

$$\vartheta(z_1, 0) = \vartheta_0. \quad (5)$$

Граничное условие (4) предполагает отсутствие теплоотдачи в окружающую среду.

Решение уравнения (2) при крайних условиях (3)—(5) дает следующее выражение для приращений температур в колодке

$$\vartheta(\eta_1, Fo_1) - \vartheta_0 = \frac{kh_1^3}{\lambda_1 a_1} \Theta'_1(\eta_1, Fo_1), \quad (6)$$

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

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

Приращение температуры на поверхности трения находится из выражения

$$\vartheta(0, Fo_1) - \vartheta_0 = \frac{kh_1^3}{\lambda_1 a_1} \Theta'_1(0, Fo_1), \quad (7)$$

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

Приращение температуры на поверхности  $z_1 = h_1$  равно

$$\vartheta(1, Fo_1) - \vartheta_0 = \frac{kh_1^3}{\lambda_1 a_1} \Theta'_1(1, Fo_1), \quad (8)$$

где 
$$\Theta'_1(1, Fo_1) = \frac{Fo_1}{3} - Fo_1 + \frac{Fo_1}{2} + \frac{1}{24} - \frac{1}{45} - \sum_{n=1}^{\infty} A'_n \exp(-\mu_n^2 Fo_1).$$

В практических расчетах принимают

$$k = \frac{\alpha_T q_0}{t_T}, \quad (9)$$

где  $q_0 = q(t_1) = f(t_1)p(t_1)v(t_1)$ , или [1]

$$q_0 = q(t_1) = \frac{b_T(t_1)v(t_1)P_k}{2A_{v_1}}. \quad (10)$$

С момента времени  $t_1$  начинается уменьшение теплового потока по линейному закону

$$q_1(t) = \alpha_T q_0 \left( 1 - \frac{t - t_1}{t_T - t_1} \right),$$

или

$$q_1(t) = \alpha_T q_0 - \alpha_T q_0 \frac{t - t_1}{t_T - t_1}. \quad (11)$$

Решение уравнения (2) при краевых условиях

$$q_1 = \alpha_T q_0 = -\lambda_1 \frac{\partial \vartheta(0, t)}{\partial z_1} = \text{const}, \quad \frac{\partial \vartheta(h_1, t)}{\partial z_1} = 0, \quad \vartheta(z_1, 0) = \vartheta_0$$

дает следующие выражения для приращений температур в колодке без учета теплоотдачи в окружающей среду:

$$\vartheta(\eta_1, Fo_1) - \vartheta_0 = \frac{\alpha_T q_0 h_1}{\lambda_1} \Theta''_1(\eta_1, Fo_1), \quad (12)$$

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

$$Fo_1 = \frac{a_1(t - t_1)}{h_1^2}, \quad \mu_n = n\pi, \quad A''_n = (-1)^{n+1} \frac{2}{\mu_n^2}.$$

Приращения температур на поверхностях  $z_1 = 0$  и  $z_1 = h_1$  соответственно находятся как

$$\vartheta(0, Fo_1) - \vartheta_0 = \frac{\alpha_T q_0 h_1}{\lambda_1} \Theta''_1(0, Fo_1), \quad (13)$$

$$\vartheta(1, Fo_1) - \vartheta_0 = \frac{\alpha_T q_0 h_1}{\lambda_1} \Theta''_1(1, Fo_1), \quad (14)$$

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

$$\Theta_1''(1, Fo_1) = Fo_1 - 1 + \frac{1}{2} + \frac{1}{3} + \sum_{n=1}^{\infty} A_n'' \exp(-\mu_n^2 Fo_1).$$

В соответствии с методом суперпозиции на основе использования решений (7), (8) и (13), (14) для промежутка времени  $t_1 < t \leq t_T$  находим значения температур на поверхностях  $z_1 = 0$  и  $z_1 = h_1$  в виде

$$\vartheta(0, Fo_1) = \vartheta(0, t_1) + \frac{\alpha_T q_0 h_1}{\lambda_1} \Theta_1''(0, Fo_1) - \frac{\alpha_T q_0 h_1^3}{\lambda_1 a_1 (t_T - t_1)} \Theta_1'(0, Fo_1), \quad (15)$$

$$\vartheta(1, Fo_1) = \vartheta(h_1, t_1) + \frac{\alpha_T q_0 h_1}{\lambda_1} \Theta_1''(1, Fo_1) - \frac{\alpha_T q_0 h_1^3}{\lambda_1 a_1 (t_T - t_1)} \Theta_1'(1, Fo_1). \quad (16)$$

Здесь температуры  $\vartheta(0, t_1)$  и  $\vartheta(h_1, t_1)$ , найденные по формулам (7) и (8) для момента времени  $t_1$ , являются начальными условиями при решении тепловой задачи, относящейся ко второй стадии фрикционного нагрева (когда  $t > t_1$ ). Выражения (15) и (16) также не учитывают теплоотдачу в окружающую среду.

Решение уравнения (2) при граничных условиях

$$q_1 = \alpha_T q_0 = -\lambda_1 \frac{\partial \vartheta(0, t)}{\partial z_1} = \text{const},$$

$$-\lambda_1 \frac{\partial \vartheta(h_1, t)}{\partial z_1} = \alpha [\vartheta(h_1, t) - \vartheta_c]$$

и известном начальном условии  $\vartheta(z_1, t_1)$  с учетом, что  $\alpha = \text{const}$ , дает следующее выражение для температурного поля

$$\vartheta(\eta_1, Fo_1) = \vartheta(z_1, t_1) + \frac{q_1 h_1}{\lambda_1} \Theta_1'''(\eta_1, Fo_1), \quad (17)$$

где

$$\Theta_1'''(\eta_1, Fo_1) = 1 - \eta_1 + \frac{1}{Bi_1} - \sum_{n=1}^{\infty} A_n''' \cos(\mu_n \eta_1) \exp(-\mu_n^2 Fo_1),$$

$$Bi_1 = \frac{\alpha h_1}{\lambda_1}, \quad \text{ctg} \mu_n = \frac{1}{Bi_1} \mu_n, \quad A_n''' = \frac{2(\mu_n^2 + Bi_1^2)}{\mu_n^2 (\mu_n^2 + Bi_1^2 + Bi_1)}.$$

На самом деле в промежуток времени  $t_1 < t \leq t_T$  тепловой поток  $q_1$  не является постоянным, а уменьшается по линейному закону. Поэтому в соответствии с методом суперпозиции на основе решений (6) и (17) выражение для приращений температур можно представить в виде

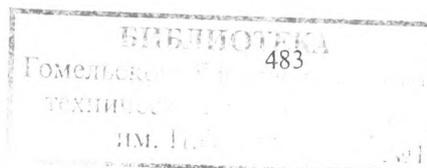
$$\vartheta(\eta_1, Fo_1) - \vartheta(z_1, t_1) = \frac{q_1 h_1}{\lambda_1} \Theta_1'''(\eta_1, Fo_1) - \frac{q_1 h_1^3}{\lambda_1 a_1 (t_T - t_1)} \Theta_1'(\eta_1, Fo_1).$$

На поверхностях  $z_1 = 0$  и  $z_1 = h_1$  температуры равны

$$\vartheta(0, Fo_1) = \vartheta(0, t_1) + \frac{q_1 h_1}{\lambda_1} \Theta_1'''(0, Fo_1) - \frac{q_1 h_1^3}{\lambda_1 a_1 (t_T - t_1)} \Theta_1'(0, Fo_1), \quad (18)$$

$$\vartheta(h_1, Fo_1) = \vartheta(h_1, t_1) + \frac{q_1 h_1}{\lambda_1} \Theta_1'''(1, Fo_1) - \frac{q_1 h_1^3}{\lambda_1 a_1 (t_T - t_1)} \Theta_1'(1, Fo_1). \quad (19)$$

**Результаты испытаний.** В июле и октябре 1997 г. на участке железной дороги Минск — Брест проводились испытания колодочных тормозов с обычным (штатным) режимом рабочего давления в тормозных цилиндрах и в режиме автоматического регулирования давления (силы нажатия ко-



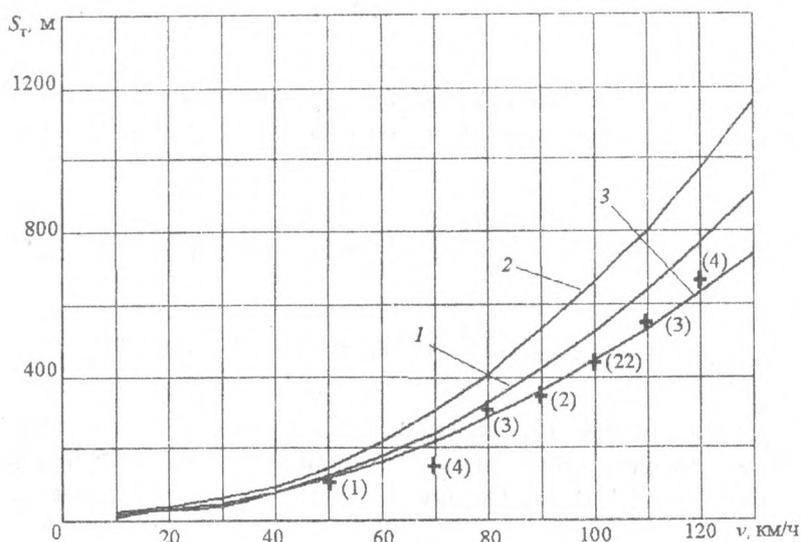


Рис. 1. Зависимости длины тормозного пути электропоезда от скорости: 1 – при действии штатного тормоза (поезд без пассажиров); 2 – то же – (поезд с пассажирами, 200 чел./вагон); 3 – при действии модернизированного тормоза (поезд без пассажиров); + – средние данные по результатам эксперимента, в скобках – количество торможений

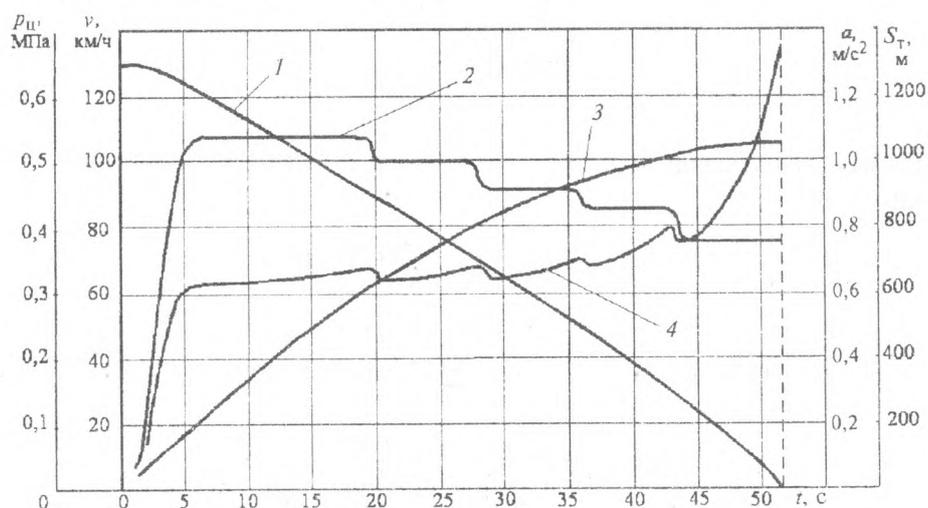


Рис. 2. Параметры процесса торможения электропоезда при действии системы регулирования тормозной силы в зависимости от скорости: 1 –  $v(t)$ ; 2 –  $p_{ш}(t)$ ; 3 –  $S_T(t)$ ; 4 –  $a_t(t)$ . Торможение со скорости 130 км/ч, поезд с пассажирами (200 чел./вагон), на спуске с уклоном – 0,01

лодок). Результаты испытаний приведены на рис. 1. Каждая группа точек соответствует торможению с некоторой скорости при определенном режиме работы тормоза. Разброс по величине тормозного пути связан с наличием уклонов железнодорожного пути на различных участках дороги и с погодными условиями. В каждом торможении измерялось давление в тормозных цилиндрах и частота вращения колес. Обработка результатов одного из испытаний в режиме скоростного регулирования силы нажатия колодок приведена на рис. 2.

**Пример теплового расчета.** Рассчитаем средние приращения температур в чугунных колодках разной толщины ( $h_1 = 12; 30; 60$  мм) при экстренном торможении электропоезда со скорости 130 км/ч (36,1 м/с) в режиме автоматического регулирования силы нажатия колодок. Параметры процесса торможения приведены на рис. 2.

Исходные данные:  $\lambda_1 = 38$  Вт/(м·К),  $\rho_1 = 7770$  кг/м<sup>3</sup>,  $\lambda_2 = 43$  Вт/(м·К),  $c_1 = c_2 = 480$  Дж/(кг·К),  $\rho_2 = 7850$  кг/м<sup>3</sup>,  $b = 0,08$  м,  $l = 0,381$  м,  $A_{д1} = lb = 0,0305$  м<sup>2</sup>,  $R = 0,475$  м,  $K_{вз} = 1/\pi R = 0,255$ ,  $\vartheta_0 = \vartheta_c$ . По формуле (1) вычисляем  $\alpha_T = 0,19$ .

Энергетические характеристики процесса торможения моторного вагона электропоезда с пассажирами приведены в табл. 1.

Таблица 1. Расчетные данные

$t, c$	0	3,8	10	16	22	28	35	42	50,7
$v, км/ч$	130	125,4	113,0	98,5	84,4	68,4	52,4	32,5	0
$b_r, Н$	0	749	774	812	810	814	870	968	1659
$q(t), МВт/м^2$	0	4,06	3,52	3,00	2,49	1,96	1,36	0,76	0
$q_1(t), кВт/м^2$	0	772	670	571	472	373	258	144	0

Время переходного процесса возрастания давления в цилиндрах  $t_1 = 3,8$  с. Полное время торможения  $t_t = 50,7$  с. Табл. 1 содержит экспериментальные данные о значениях  $v(t)$  и  $b_r(t)$ . Однако в дальнейших расчетах принималось, что в промежуток времени от 3,8 с до 50,7 с интенсивность фрикционного тепловыделения изменялась по линейному закону. В момент времени  $t_1 = 3,8$  с,  $q_0 = 4,06$  МВт/м<sup>2</sup>.

В табл. 2 приведены результаты теплового расчета чугунных колодок разной толщины как без учета теплоотдачи в окружающую среду, так и с учетом теплоотдачи. В промежуток времени  $0 < t \leq t_1$  расчет приращений температур проводился по формулам (7) и (8), в которых при:  $h_1 = 12$  мм,  $q_1 h_1^3 / \lambda_1 a_1 t_1 = 900$ ;  $h_1 = 30$  мм,  $q_1 h_1^3 / \lambda_1 a_1 t_1 = 14060$ ;  $h_1 = 60$  мм,  $q_1 h_1^3 / \lambda_1 a_1 t_1 = 112480$ .

Таблица 2. Фрикционный нагрев колодки

$t, c$	$ Fo_1$	$ \Theta_1'(0, Fo_1)$	$ \Theta_1'(l, Fo_1)$	$ \Theta_1''(0, Fo_1)$	$ \Theta_1''(l, Fo_1)$	$ \Theta_1'''(0, Fo_1)$	$ \Theta_1'''(l, Fo_1)$	Без учета теплоотдачи		С учетом теплоотдачи	
								$ \vartheta_1(0, t) - \vartheta_{c,0}$ К	$ \vartheta_1(h_1, t) - \vartheta_{c,0}$ К	$ \vartheta_1(0, t) - \vartheta_{c,0}$ К	$ \vartheta_1(h_1, t) - \vartheta_{c,0}$ К
Толщина колодки $ h_1 = 12$ мм											
3,8	0,271	—	—	0,107	0,011	0,58	0,13	96,3	9,9	96,3	9,9
10,0	0,442	0,775	0,275	0,218	0,042	0,71	0,22	269,2	73,8	253,3	60,4
16,0	0,869	1,203	0,703	0,645	0,252	1,15	0,52	342,3	162,8	329,4	118,2
22,0	1,297	1,630	1,130	1,251	0,645	1,47	0,83	402,1	238,2	363,2	165,1
28,0	1,724	2,058	1,558	2,039	0,820	1,78	1,05	449,0	329,6	381,3	205,9
35,0	2,223	2,556	2,056	3,190	2,121	2,05	1,42	526,3	356,2	363,1	201,8
42,0	2,722	3,055	2,555	4,589	2,337	2,35	1,62	506,0	461,9	334,3	194,1
50,7	3,342	3,675	3,175	6,675	3,926	2,61	1,90	504,9	497,1	295,5	186,5
30 мм											
3,8	0,043	—	—	0,006	0,000	—	—	87,6	0	87,6	0
10,0	0,071	0,29	0,00	0,018	0,000	0,29	0,00	243,7	0	243,7	0
16,0	0,139	0,39	0,01	0,040	0,001	0,39	0,01	279,5	5,0	279,5	5,0
22,0	0,207	0,50	0,07	0,069	0,005	0,49	0,07	313,5	36,9	307,4	36,9
28,0	0,276	0,58	0,12	0,108	0,011	0,57	0,11	317,8	60,6	311,7	54,5
35,0	0,356	0,67	0,19	0,152	0,025	0,63	0,17	322,5	87,2	298,2	75,0
42,0	0,435	0,76	0,27	0,217	0,041	0,71	0,21	303,2	117,7	272,8	81,2
50,7	0,535	0,87	0,36	0,299	0,074	0,81	0,25	276,8	134,9	240,3	68,0
60 мм											
3,8	0,0108	—	—	0,0007	0,000	—	—	78,9	0	78,9	0
10,0	0,0177	0,10	0,00	0,0060	0,000	0,10	0,000	146	0	146	0
16,0	0,0348	0,19	0,00	0,0122	0,000	0,19	0,000	199	0	199	0
22,0	0,0519	0,27	0,00	0,0186	0,000	0,27	0,000	238	0	238	0
28,0	0,0690	0,30	0,00	0,0254	0,000	0,30	0,000	213	0	213	0
35,0	0,0889	0,33	0,00	0,0335	0,000	0,33	0,000	176	0	176	0
42,0	0,1089	0,36	0,01	0,0422	0,001	0,36	0,001	133	3	133	3
50,7	0,1337	0,38	0,05	0,0495	0,003	0,38	0,003	91	34	91	34

В промежуток времени  $t_1 < t \leq t_T$  приращения температур при расчетах, не учитывающих теплоотдачу в окружающую среду проводились по формулам (15) и (16), в которых при

$$h_1 = 12 \text{ мм}, \frac{\alpha_T q_0 h_1}{\lambda_1} = 243,6, \frac{\alpha_T q_0 h_1^3}{\lambda_1 a_1 (t_T - t_1)} = 72,9;$$

$$h_1 = 30 \text{ мм}, \frac{\alpha_T q_0 h_1}{\lambda_1} = 609, \frac{\alpha_T q_0 h_1^3}{\lambda_1 a_1 (t_T - t_1)} = 1139;$$

$$h_1 = 60 \text{ мм}, \frac{\alpha_T q_0 h_1}{\lambda_1} = 1218, \frac{\alpha_T q_0 h_1^3}{\lambda_1 a_1 (t_T - t_1)} = 9113.$$

Расчеты, учитывающие теплоотдачу в окружающую среду, проводились при значениях  $\alpha_{ср} = 100 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}) = \text{const}$  по формулам (18) и (19). При этом:  $Bi_1 = 0,032$ , если  $h_1 = 12 \text{ мм}$ ;  $Bi_1 = 0,079$ , если  $h_1 = 30 \text{ мм}$ ;  $Bi_1 = 0,158$ , если  $h_1 = 60 \text{ мм}$ . Коэффициент теплоотдачи находился по эмпирической зависимости [7]

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

Зависимость  $\alpha$  от скорости следующая:

$v, \text{ км}/\text{ч}$	125,4	113,0	98,5	84,4	68,4	52,4	32,5	0
$\alpha, \text{ Вт}/\text{м}^2 \cdot \text{К}$	130,3	123,2	116,1	108,8	99,6	89,2	73,8	16,7

Видно, что формулы (18) и (19) несколько завышают приращения температур в промежуток времени  $3,8 \text{ с} < t < 50,7 \text{ с}$  и занижают в промежуток времени  $28 \text{ с} < t < 50,7 \text{ с}$ . На рис. 3 и 4 приведены сравнительные графики приращений температур на поверхности трения и поверхности  $z_1 = h_1$  для чугунных колодок разной толщины как без учета теплоотдачи, так и с учетом теплоотдачи в окружающую среду.

Как и следовало ожидать, максимальные приращения температур наблюдаются у колодки

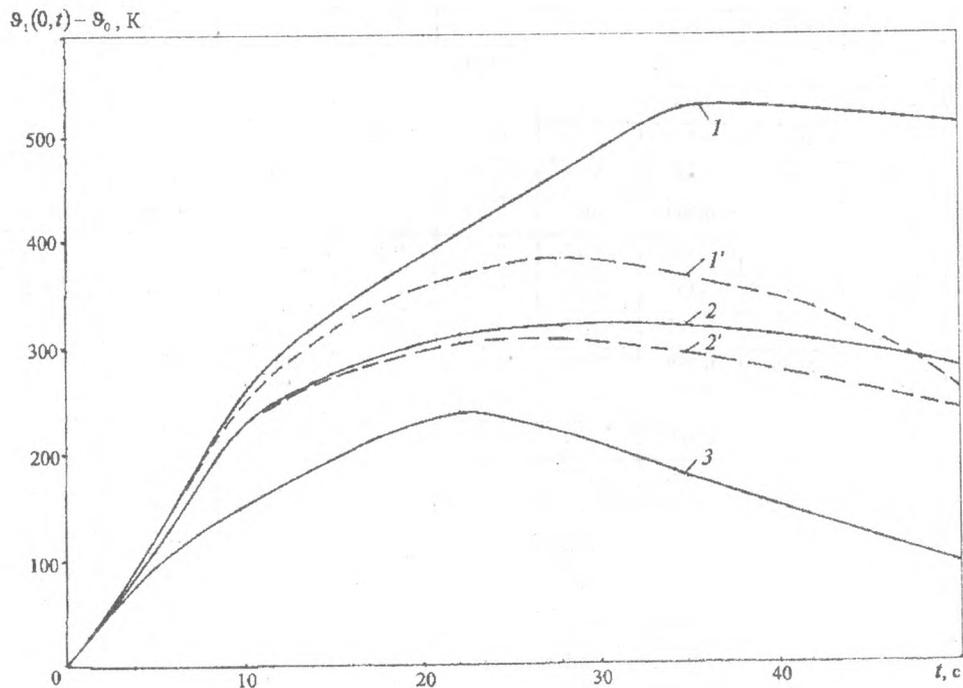


Рис. 3. Зависимость приращений температур на поверхности трения от времени, толщины колодок и условий теплоотдачи в окружающую среду: 1 —  $h_1 = 12 \text{ мм}$ , 2 —  $30 \text{ мм}$ , 3 —  $60 \text{ мм}$ ; 1, 2, 3 — без учета теплоотдачи, 1', 2' — с учетом теплоотдачи

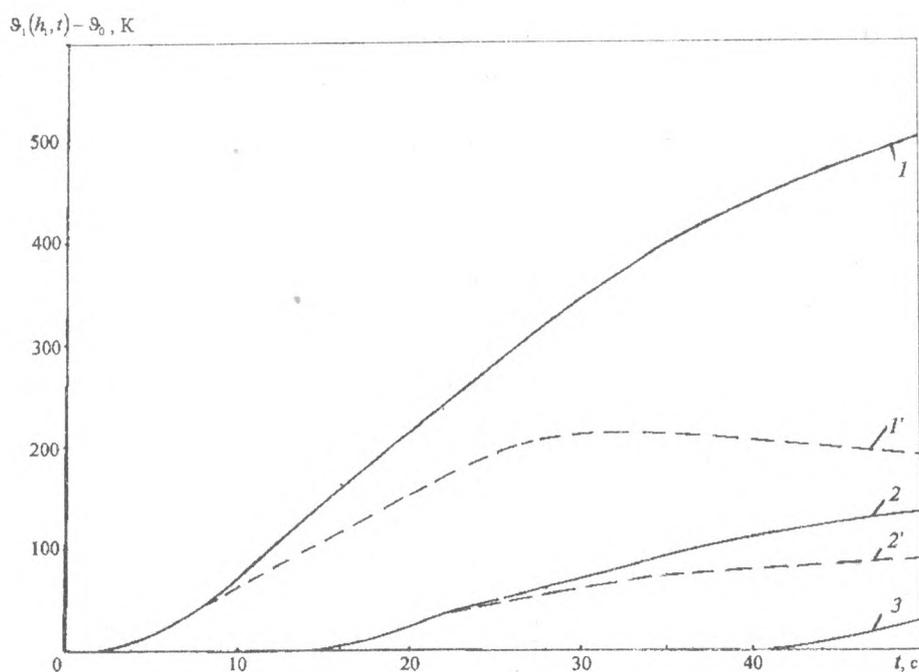


Рис. 4. Зависимость приращений температур на поверхности  $z_1 = h_1$  от времени, толщины колодок и условий теплоотдачи в окружающую среду: 1 —  $h_1 = 12$  мм, 2 — 30 мм, 3 — 60 мм; 1, 2, 3 — без учета теплоотдачи, 1', 2' — с учетом теплоотдачи

меньшей толщины ( $h_1 = 12$  мм). Без учета теплоотдачи приращение температуры поверхности трения достигает 526,3 К в момент времени 35 с. С учетом теплоотдачи в окружающую среду оно равно 381,3 К при  $t = 28$  с. У колодки толщиной  $h_1 = 30$  мм (без учета теплоотдачи) максимальное приращение температуры поверхности трения, равное 322,5 К, возникает при  $t = 35$  с. С учетом теплоотдачи оно равно 311,7 К при  $t = 28$  с.

В колодке толщиной  $h_1 = 60$  мм максимальное приращение температуры 238 К соответствует моменту времени  $t = 22$  с. У этой колодки практически отсутствует теплоотдача в окружающую среду с поверхности  $z_1 = h_1$ .

**Заключение.** Результаты испытаний колодочных тормозов железнодорожного подвижного состава показали, что скоростное регулирование силы нажатия чугунных колодок на 18–22% сокращает тормозные пути по сравнению с обычным режимом работы тормозов. Проведен тепловой расчет чугунных колодок разной толщины как без учета, так и с учетом теплоотдачи в окружающую среду. При этом использованы точные решения классической теории теплопроводности методом суперпозиции.

### Обозначения

$t$  — время;  $t_1$  — время переходного процесса;  $t_T$  — полное время торможения;  $v$  — скорость;  $a$  — ускорение;  $f$  — коэффициент трения;  $p$  — давление в зоне фрикционного контакта;  $p_{ц}$  — давление в тормозных цилиндрах;  $P_k$  — нагрузка на колесо;  $S_T$  — тормозной путь;  $A_{a1}$  — номинальная площадь контакта колодки;  $b$  — ширина колодки;  $l$  — длина дуги колодки;  $K_{вз}$  — коэффициент взаимного перекрытия;  $b_T$  — сила трения, отнесенная к единице массы;  $h_1$  — толщина колодки;  $R$  — радиус колеса;  $q$  — интенсивность фрикционного тепловыделения;  $q_0$  — максимальная интенсивность тепловыделения в момент времени  $t_1$ ;  $\Theta_0, \Theta_c$  — начальная температура и температура среды;  $z_1$  — координата по нормали к поверхности трения в направлении колодки;  $q_1$  — тепловой поток в колодку;  $\alpha_T$  — коэффициент распределения тепловых потоков;  $\alpha$  — коэффициент теплоотдачи;  $\alpha_{ср}$  — средний коэффициент теплоотдачи;  $\lambda_1, \lambda_2, c_1, c_2, \rho_1, \rho_2, a_1, a_2$  — теплопроводность, теплоемкость, плотность, температуропроводность колодки и колеса;  $\eta$  — безразмерная координата;  $Fo_1, Bi_1$  — числа Фурье и Био для колодки;  $\Theta', \Theta'', \Theta'''$  — безразмерные комплексы;  $k$  — коэффициент.

**Литература**

1. **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
2. **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
3. **Кондратьев Г. М.** Регулярный тепловой режим. М.: Гостехиздат (1954)
4. **Лыков А. В.** Теория теплопроводности. М.: Высшая школа (1967)
5. **Лыков А. В.** Тепломассообмен. М.: Энергия (1978)
6. **Михайлов М. Д.** Нестационарный тепло- и массоперенос в одномерных телах. Мн.: ИТМО (1969)
7. **Казаринов В. М., Карвацкий Б. Л.** Расчет и исследование автотормозов. М.: Трансжелдориздат (1961)

*Поступила в редакцию 09.02.99.*

Galaj E.I., Balakin V.A. Tests and heat calculation of railway shoe brakes

Results of full-scale tests of railway shoe frictional brakes are analyzed. Calculation of the temperatures of friction surfaces of shoes of various thickness is demonstrated with the account of heat rejection into the environment.