

УДК 621.838:621.891

ТЕПЛОВОЙ РЕЖИМ РАБОТЫ ТОРМОЗОВ КАРЬЕРНЫХ САМОСВАЛОВ БелАЗ В УСЛОВИЯХ ИХ ЭКСТРЕННОГО ТОРМОЖЕНИЯ

В. А. БАЛАКИН^а, В. П. СЕРГИЕНКО^б, Ю. В. ЛЫСЕНКО^а, М. М. ЗАБОЛОЦКИЙ^в

Проведен тепловой расчет рабочих барабанных и дисково-колодочных тормозов автомобилей БелАЗ при их экстренном торможении на горизонтальной сухой дороге.

Ключевые слова: тормоз, температура, удельная сила трения, фрикционное тепловыделение, тепловые потоки.

Введение. Современные карьерные самосвалы БелАЗ имеют полную массу от 51500 до 366000 кг, движутся с максимальной скоростью от 40 до 50 км/ч (табл. 1).

Таблица 1. Технические характеристики автомобилей БелАЗ

Марка автомобиля БелАЗ	m_n , т	v_{max} , км/ч	m_r , т	m_c , т	k	Распределение массы самосвала с грузом, %	
						передняя ось	задняя ось
75405	51,5	50	30	21,5	0,67	33,0	67,0
75485	71,5	50	42	29,5	0,67	33,0	67,0
7549	147,0	50	80	67,0	0,67	33,1	66,9
7512	210,0	48	120	90,0	0,67	33,0	67,0
7555	240,0	42	140	100,0	0,80	33,0	67,0
7530	340,0	40	220	146,0	0,68	32,4	67,6

Их габаритные размеры находятся в пределах от 3,48 до 7,78 м по ширине и от 7,13 до 13,78 м по длине (рис. 1, табл. 2).

Они оборудованы рабочими и стояночными тормозами. Рабочие тормоза в основном барабанного типа (рис. 2) с автоматическим регулированием зазора между колодками и барабаном. В тормозах автомобилей БелАЗ 75405 и 75485 привод пневматический, отдельный для передних и задних колес. В тормозе автомобиля БелАЗ 7512 привод гидравлический, также отдельный для передних и задних колес.

Самосвалы БелАЗ 7555 и 7530 имеют тормоза разных конструкций: передние — барабанные, задние — дисково-колодочные с тремя механизмами на один диск (в БелАЗ 7555 два механизма относятся к рабочему тормозу, один — к стояночному; в БелАЗ 7530 три механизма относятся к рабочему, один из них используется в качестве стояночного). В тормозе автомобиля БелАЗ 7555 (рис. 3) поршни имеют диаметр $d = 50$ мм; на одну фрикционную накладку приходится по два поршня. Давление в гидросистеме при торможении — 16 МПа. Тормозной момент в передних колесах составляет 25% от тормозного момента в задних колесах.

а Гомельский политехнический институт, Беларусь, 246746, г. Гомель, пр. Октября, 48.

б Институт механики металлополимерных систем им. В. А. Белого НАНБ, Беларусь, 246050, г. Гомель, ул. Кирова, 32-а.

в ПО "Белорусский автомобильный завод"

+ Автор, с которым следует вести переписку.

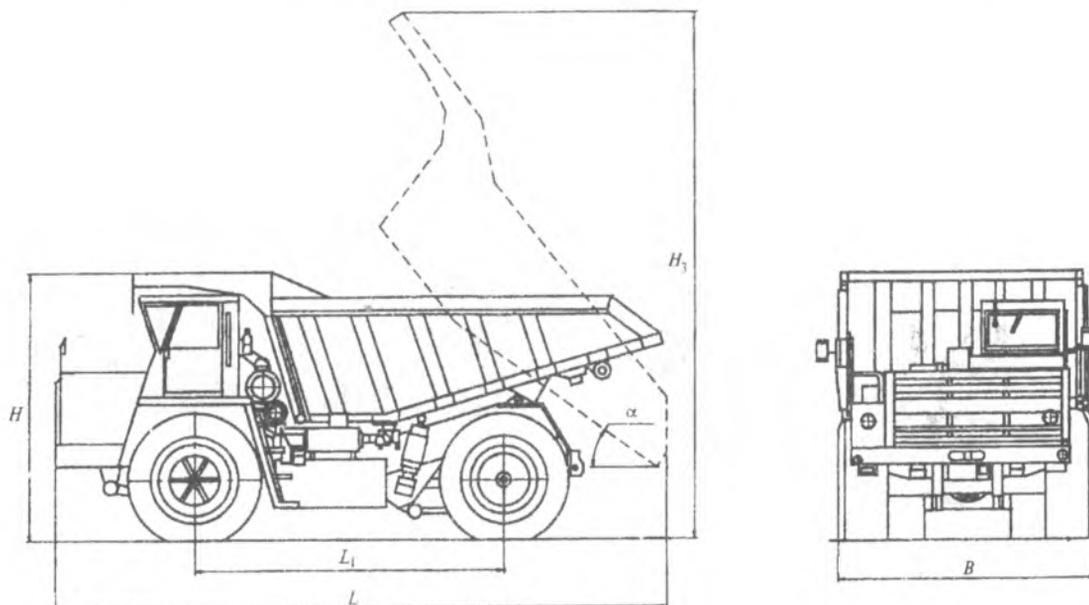


Рис. 1. Общий вид современных моделей карьерных самосвалов БелАЗ

Таблица 2. Габаритные размеры современных моделей карьерных самосвалов БелАЗ

Марка автомобиля БелАЗ	Габаритные размеры, мм							
	L	L_1	H	H_3	B	B_1	R_k	α°
75405	7130	3550	3560	6850	3480	2820	823	53
75485	8120	4200	3800	7750	3790	2800	925	53
7512	11270	5300	5280	11000	6140	4980	1350	48
7555	8850	4000	4320	8300	3650	2940	1400	47
7530	13380	6100	6130	12000	7780	6100	1600	47

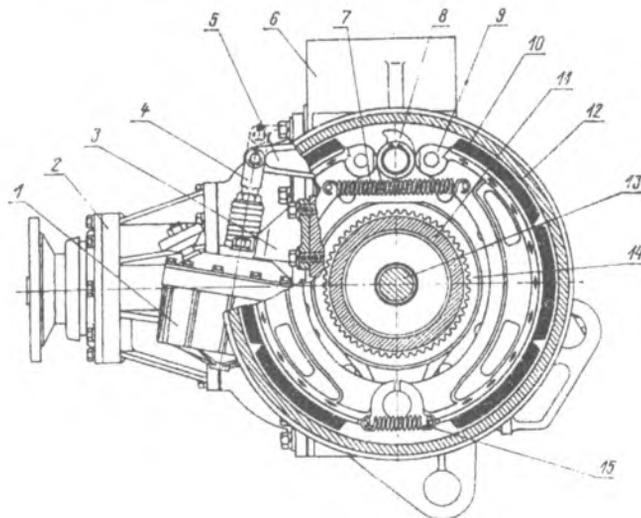


Рис. 2. Тормоз автомобиля БелАЗ 75405: 1 – пневмоцилиндр; 2 – кронштейн; 3 – суппорт; 4 – вилка; 5 – рычаг; 6 – корпус заднего моста; 7, 15 – пружины; 8 – разжимной кулак; 9 – колодка; 10 – фрикционная накладка; 11 – вал; 12 – барабан; 13 – полуось; 14 – ступица барабана

Целью настоящей работы является проведение сравнительного анализа тепловой нагруженности тормозов автомобилей БелАЗ 75405, 75485, 7512, движущихся с максимально допустимыми массами и скоростями, автомобиля БелАЗ 7555, движущегося с максимальной массой и скоростью $v = 30$ км/ч, а также автомобиля БелАЗ 7530 максимальной массы, движущегося со скоростью 25 км/ч при их экстренном торможении на горизонтальной сухой асфальтовой дороге.

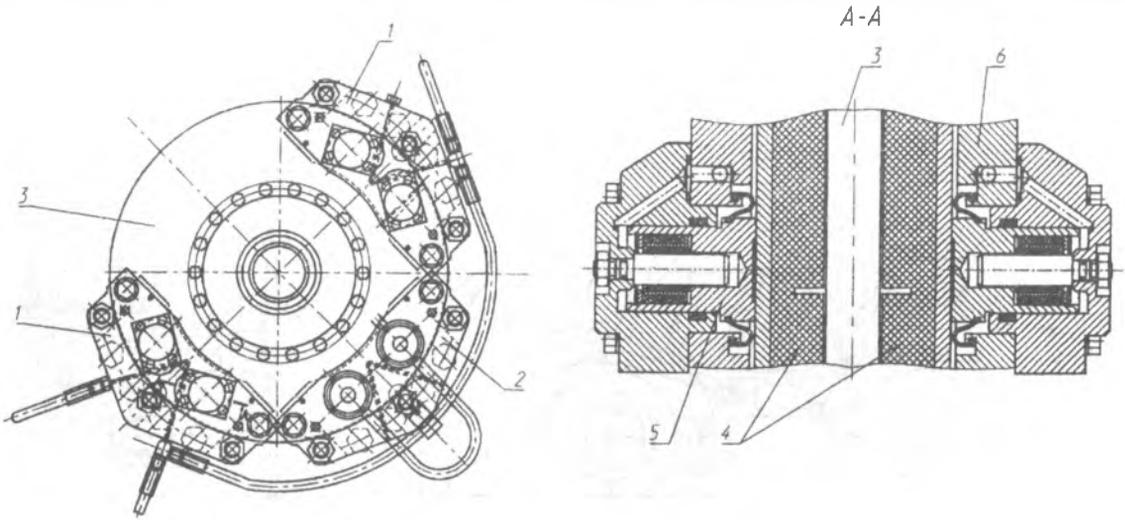


Рис. 3. Конструкция дисково-колодочного тормоза автомобиля БелАЗ 7555: 1 — тормозные механизмы рабочего тормоза; 2 — тормозной механизм стояночного тормоза; 3 — диск; 4 — фрикционные накладки; 5 — поршень; 6 — скоба (суппорт)

Постановка задачи. Будем считать, что в процессе торможения $T = \text{const}$, а интенсивности фрикционного тепловыделения и тепловые потоки изменяются по линейным зависимостям [1—5]:

$$q(t) = q_0 \left(1 - \frac{t}{t_T}\right), \quad q_1(t) = \alpha_T q_0 \left(1 - \frac{t}{t_T}\right), \quad q_2(t) = (1 - \alpha_T) q_0 \left(1 - \frac{t}{t_T}\right),$$

где $\alpha_T = \frac{K_{вз} \sqrt{\lambda_1 c_1 \rho_1}}{K_{вз} \sqrt{\lambda_1 c_1 \rho_1} + \sqrt{\lambda_2 c_2 \rho_2}}$, $K_{вз} = \frac{n^* A_{a1}}{A_{a2}}$. Для БелАЗ 75405, 75485, 7512, 7555 $n^* = 2$, для БелАЗ 7530 — 3.

Если пренебречь силой аэродинамического сопротивления воздуха, то в процессе экстренного торможения кинетическая энергия движущего автомобиля равна работе сил трения в тормозах.

При полном использовании сцепления шин с дорогой ($\varphi = 0,7$) на горизонтальном участке пути удовлетворяется равенство

$$\frac{m_n v_0^2}{2} = (2T_{K_1} + 2T_{K_2}) S_T = m_n a S_T = \varphi m_n g S_T,$$

откуда

$$S_T = \frac{v_0^2}{2\varphi g}. \tag{1}$$

Эта формула дает возможность вычислять тормозной путь при условии мгновенного срабатывания тормозов. Он меньше реального, соответственно меньше и время торможения $t_T = \frac{2S_T}{v_0}$.

При этом расчетные значения приращений температур в зоне фрикционного контакта получаются несколько выше фактических, что необходимо учитывать при анализе тепловой нагруженности элементов трущихся пар тормозов.

Поскольку на оси задних колес приходится большая часть массы самосвала с грузом, будем считать, что тормоза задних колес гасят при торможении большую кинетическую энергию, определяемую как

$$W_1 = \frac{km_n v_{\max}^2}{4}.$$

Для задних тормозов БелАЗ 7555 $k = 0,8$ (а не 0,67), что обеспечено конструктивно, для остальных марок автомобилей БелАЗ значение k берется из табл. 1 (без учета сил инерции, поскольку неизвестны координаты центра масс груженых самосвалов).

В каждом тормозе автомобилей (за исключением заднего тормоза БелАЗ 7530) имеется по две колодки с фрикционными элементами, следовательно одна фрикционная пара задних тормозов поглощает кинетическую энергию

$$W_1 = \frac{km_n v_0^2}{8}.$$

Средняя интенсивность фрикционного тепловыделения

$$q_{cp} = \frac{W_1}{A_{o1} t_{\tau}} = \frac{km_n v_0^2}{8A_{o1} t_{\tau}}.$$

Для заднего тормоза БелАЗ 7530

$$q_{cp} = \frac{W_1}{A_{o1} t_{\tau}} = \frac{km_n v_0^2}{12A_{o1} t_{\tau}}.$$

Следовательно, начальная интенсивность $q_0 = 2q_{cp}$.

Проанализируем тепловой режим работы задних тормозов автомобилей БелАЗ. Считаем, что фрикционные накладки изготовлены из одних и тех же материалов. Для материала фрикционной накладки в расчетах будем использовать следующие теплофизические свойства [1–5]: $\lambda_1 = 0,42$ Вт/(м·К), $c_1 = 800$ Дж/(кг·К), $\rho_1 = 2600$ кг/м³, $a_1 = 2,0 \cdot 10^{-7}$ м²/с, теплофизические свойства материала контртела в тормозах (барабанов или дисков): $\lambda_2 = 30$ Вт/(м·К), $c_2 = 540$ Дж/(кг·К), $\rho_2 = 7,3$ т/м³, $a_2 = 7,6 \cdot 10^{-6}$ м²/с.

Теоретическая часть. Средние приращения температур определяем по формуле [1–5]:

$$\vartheta_2(\eta_2, Fo_2) - \vartheta_0 = \frac{(1 - \alpha_{\tau}) K_{вз} q_0 h_2}{\lambda_2} \theta'_2(\eta_2, Fo_2) - \frac{(1 - \alpha_{\tau}) K_{вз} q_0 h_2^3}{t_{\tau} \lambda_2 a_2} \theta''_2(\eta_2, Fo_2),$$

где
$$\theta'_2(\eta_2, Fo_2) = Fo_2 - \eta_2 + \frac{\eta_2^2}{2} + \frac{1}{3} + \sum A'_n \cos[\mu_n(1 - \eta_2)] \times \exp(-\mu_n^2 Fo_2),$$

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

$$\eta_2 = \frac{z_2}{h_2}, \quad Fo_2 = \frac{a_2 t}{h_2^2}, \quad \mu_n = n\pi, \quad A'_n = (-1)^{n+1} \frac{2}{\mu_n^2}, \quad A''_n = (-1)^{n+1} \frac{2}{\mu_n^4}.$$

Приращение температуры на поверхности трения (при $\eta_2 = 0$) определяется как

$$\vartheta_2(0, Fo_2) - \vartheta_0 = \frac{(1 - \alpha_{\tau}) K_{вз} q_0 h_2}{\lambda_2} \Theta'_2(0, Fo_2) - \frac{(1 - \alpha_{\tau}) K_{вз} q_0 h_2^3}{t_{\tau} \lambda_2 a_2} \Theta''_2(0, Fo_2), \tag{2}$$

где
$$\Theta'_2(0, Fo_2) = Fo_2 + \frac{1}{3} + \sum A'_n \cos \mu_n \times \exp(-\mu_n^2 Fo_2),$$

$$\Theta''_2(0, Fo_2) = \frac{Fo_2^2}{2} + \frac{Fo_2}{3} - \frac{1}{45} - \sum_{n=1}^{\infty} A''_n \cos \mu_n \times \exp(-\mu_n^2 Fo_2).$$

Удельную силу трения определяем по формуле $\tau = \frac{q_0 R_k}{v_{\max} R}$.

Результаты расчетов. Было установлено, что в дисково-колодочных тормозах автомобилей БелАЗ 7555, 7530 удельные силы трения на порядок превышают значения τ в тормозах барабанного типа, которыми оснащены самосвалы БелАЗ 75405, 75485, 7512 (табл. 3).

Таблица 3. Геометрические характеристики и удельные силы трения в тормозах автомобилей БелАЗ

Марка автомобиля БелАЗ	$A_{a1}, \text{см}^2$	K_{μ}	$h_2, \text{мм}$	$R, \text{м}$	$R_k, \text{м}$	$\tau, \text{МН/м}^2$
75405	0,090	0,695	30	0,250	0,823	2,16
75485	0,146	0,715	30	0,325	0,925	1,60
7512	0,213	0,571	30	0,475	1,350	3,22
7555	0,032	0,307	16	0,355	1,4	24,13
7530	0,032	0,461	16	0,355	1,6	22,14

Максимальные приращения средних температур поверхностей трения при экстренном торможении автомобиля БелАЗ 7555 достигают 690 К, а БелАЗ 7530 — 630 К (рис. 4). Такой тепловой режим может наблюдаться при скоростях движения самосвалов, равных соответственно 30 и 25 км/ч.

При высоких температурах может происходить отказ тормозов из-за деструкции связующего в материалах фрикционных накладок, а также появление трещин на поверхностях трения стальных дисков. При этом температурные градиенты достигают 289 К/мм в момент времени $t = 0,2$ с после начала торможения у самосвала БелАЗ 7555 и 173 К/мм в момент времени $t = 0,1$ с у самосвала БелАЗ 7530 (рис. 5, табл. 4). В приповерхностном слое эти температурные градиенты существенно выше, являясь причиной возникающих термонапряжений.

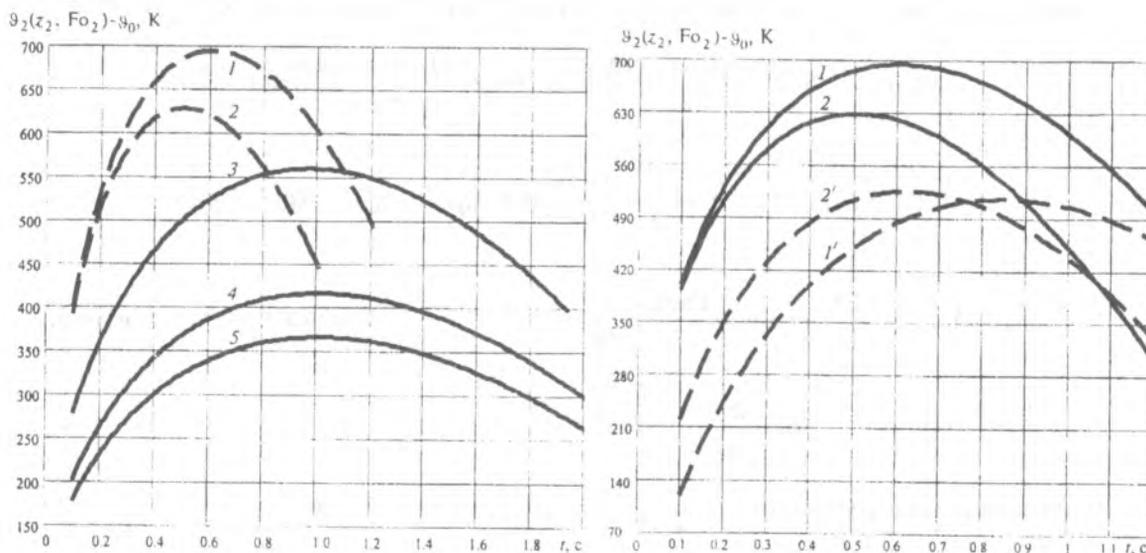


Рис. 4. Сравнительная оценка приращений температур в тормозах самосвалов БелАЗ: 1 — 7555; 2 — 7530; 3 — 7512; 4 — 75405; 5 — 75485

Рис. 5. Сравнительная оценка приращений температур в тормозах самосвалов БелАЗ 7555 (1, 1' — $v_0 = 30$ км/ч) и БелАЗ 7530 (2, 2' — $v_0 = 25$ км/ч): 1, 1' — приращение температуры на поверхности трения диска; 2, 2' — приращение температуры в диске на глубине 1 мм от поверхности трения

Таблица 4. Тепловой режим работы тормозов автомобилей БелАЗ = 30 км/ч $v_0 = 25$

Марка автомобиля БелАЗ	Скорость $v_0, \text{км/ч}$	$\vartheta(z_2, t), \text{К}$ при $t, \text{с}$:					$\frac{\partial \vartheta(z_2, t)}{\partial z_2}, \text{К/мм}$ при $t, \text{с}$:				
		0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
7555	30	401/120	533/244	612/335	660/402	686/451	281	289	277	258	235
7530	25	392/219	515/350	583/433	617/485	628/515	173	165	150	132	113

Примечание. Слева от черты при $z_2 = 0$, справа — 1 мм

Таблица 5. Тепловой режим работы тормозов автомобилей БелАЗ

Марка автомобиля БелАЗ	Скорость v_0 , км/ч	$\vartheta(z_2, t)$, К при t , с:					$\frac{\partial \vartheta(z_2, t)}{\partial z_2}$, К/мм при t , с:				
		0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
7555	20	259/79	333/156	368/207	378/240	371/258	180	177	161	138	113
7530	20	308/173	396/272	437/329	450/359	441/370	135	124	108	91	71

Примечание. Слева от черты при $z_2 = 0$, справа — 1 мм

Следовательно движение тяжелогрузных самосвалов БелАЗ 7555, 7530 должно быть ограничено, например, скоростью < 20 км/ч. Тепловые режимы работы тормозов самосвалов БелАЗ 7555 и БелАЗ 7530 при такой скорости приведены на рис. 6 и в табл. 5.

Видно, что максимальные приращения температур на поверхности трения снизились до 378 К у БелАЗ 7555 и 450 у БелАЗ 7530, а температурные градиенты — до значений 180 К/мм у БелАЗ 7555 и 135 у БелАЗ 7530 в $t = 0,1$ с.

Заключение. Сравнительный анализ результатов теплового расчета тормозов карьерных самосвалов БелАЗ показал, что несмотря на переход от барабанных тормозов к дисково-колодочным со сплошным диском, тепловая нагруженность тормозов тяжелогрузных самосвалов БелАЗ 7555 и БелАЗ 7530 является экстремальной. В условиях экстренного торможения этих автомобилей, движущихся с полной массой и скоростями приближающимися к максимальным, такие тормоза испытывают значительные тепловые перегрузки. Очевидно, что эти перегрузки еще более возрастают при многократных торможениях на длинных карьерных спусках.

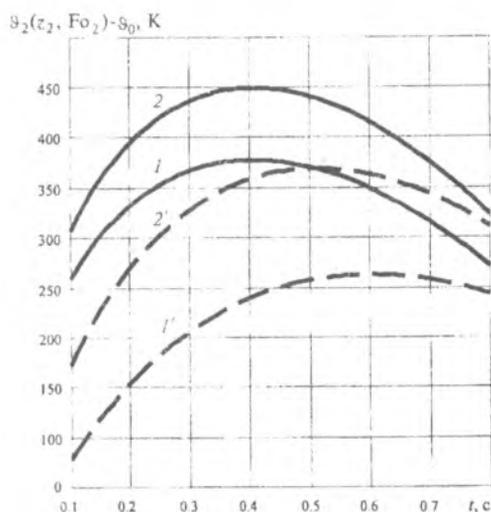


Рис. 6. Сравнительная оценка приращений температур в тормозах самосвалов БелАЗ 7555 (1, 1' — $v_0 = 20$ км/ч) и БелАЗ 7530 (2, 2' — $v_0 = 20$ км/ч): 1, 1' — приращение температуры на поверхности трения диска; 2, 2' — приращение температуры в диске на глубине 1 мм

Обозначения

t — текущее время с момента торможения; t_t — полное время торможения; ϑ_2 — температура барабана (диска); ϑ_0 — начальная температура; v_0 — начальная скорость машины; S_t — тормозной путь; α_t — коэффициент распределения тепловых потоков; K_t — коэффициент взаимного перекрытия; A_{a1} , A_{a2} — номинальные площади контакта фрикционной накладки и барабана (диска); $\lambda_{1,2}$, $c_{1,2}$, $\rho_{1,2}$, $a_{1,2}$ — теплопроводность, теплоемкость, плотность, температуропроводность фрикционной накладки и барабана (диска); φ — коэффициент сцепления; W_1 — кинетическая энергия, поглощаемая одной фрикционной парой; T — сила трения; τ — удельная сила трения; R_1 — радиус колеса; R — радиус барабана (средний радиус дорожки трения диска); h_2 — полутолщина сплошного, толщина «вентилируемого» дисков (барабана); F_0 — число Фурье; q_0 — начальная интенсивность фрикционного тепловыделения; q_{cp} — средняя интенсивность фрикционного тепловыделения; $q_{1,2}$ — тепловые потоки в фрикционную накладку и диск (барабан); n — количество тормозов; n^* — количество фрикционных накладок на одной дорожке трения; T_{k1} , T_{k2} — сила трения качения в зоне контакта переднего и заднего колес с дорогой; k — коэффициент распределения кинетических энергий; m_n — полная масса автомобиля; m_r — грузоподъемность автомобиля; m_c — масса автомобиля без груза; R_k — радиус колеса; L , B , H — длина, ширина и высота автомобиля, соответственно; L_1 — межосевое рассояние; H_1 — высота подъема кузова самосвала, α — максимальный угол наклона кузова при подъеме.

Литература

1. Балакин В. А., Сергиенко В. П. Тепловые расчеты тормозов и узлов трения. Гомель: ИММС НАН РБ, 1999
2. Балакин В. А., Сергиенко В. П. Тепловой расчет тормозов легковых автомобилей // Трение и износ, 1999 (20), № 3, 270—281
3. Балакин В. А., Сергиенко В. П., Родзевич П. Е. Сравнительный анализ дисково-колодочных тормозов легковых автомобилей // Трение и износ, 2000 (21), № 4, 408—413
4. Балакин В. А., Сергиенко В. П., Родзевич П. Е., Лысенко Ю. В. Сравнительный анализ тепловой нагруженности тормозов грузовых автомобилей // Трение и износ, 2001 (23), № 2, 123—126
5. Балакин В. А., Сергиенко В. П., Лысенко Ю. В. Теплофизические процессы в зоне фрикционного контакта // Трение и износ, 2001 (22), № 1, 3—7

Поступила в редакцию 12.06.2001.

Balakin V.A., Serguienko V.P., Lysenok Yu.V. Zabolockii M.M. Heating conditions in the brakes of belaz rock haulers during emergency braking.

The heating of drum and disk-block brakes of BelAZ rock haulers has been calculated during emergency braking on a horizontal dry hard tar road.