



## Моделирование тепловых нагрузений цельнокатаных колёс



Андрей САВРУХИН  
Andrey V. SAVRUKHIN

Алексей НЕКЛЮДОВ  
Aleksei N. NEKLYUDOV



Роман ЕФИМОВ  
Roman A. EFIMOV

*Саврухин Андрей Викторович – доктор технических наук, профессор Московского государственного университета путей сообщения (МИИТ), Москва, Россия.*  
*Неклюдов Алексей Николаевич – кандидат технических наук, доцент МИИТ, Москва, Россия.*  
*Ефимов Роман Александрович – ассистент МИИТ, Москва, Россия.*

**Применяемые ныне системы диагностики не позволяют достаточно объективно оценить предысторию нагружения объекта, выявить такие состояния, которые характеризуются отсутствием дефекта, но вместе с тем и предупреждают о наличии сформировавшихся условий для его образования. То есть не обеспечивают в полном объеме оценку рисков и остаточного ресурса объекта. Главным же недостатком является то, что они не позволяют проводить анализ кинетики нестационарных процессов, связанных с эксплуатационными или технологическими воздействиями.**

**В статье уточняются подходы к оценке кинетики нестационарных тепловых процессов в цельнокатаном работающем колесе (система «колесо-колодка») на основе созданной авторами методики и результатов компьютерного моделирования.**

*Ключевые слова:* железная дорога, подвижной состав, система «колесо-колодка», торможение, тепловое нагружение, кинетика, цельнокатаное колесо, мощность тепловложений.

**В** процессе эксплуатации железнодорожные колеса подвергаются двум основным видам нагружения: механическим, связанным с передачей нагрузки от вагона на путь, и тепловым при торможении – в системе «колесо-колодка». Анализ данных по отказам цельнокатаных колес (ЦКК) свидетельствует, что наибольшее количество дефектов в последние годы приходится на выщербины поверхности катания (до 40%) и дефекты тормозного происхождения (ползуны, навары – до 25%).

Обращает на себя внимание тот факт, что доля повреждений выщербинами в общем количестве отказов за минувшие 20 лет увеличилась в 2 раза и остается стабильной в течение долгого времени. Выделяются три вида выщербин: а) по светлым пятнам, ползунам, наварам; б) по усталостным трещинам; в) по термическим трещинам на поверхности катания обода колеса. Все они являются следствием эксплуатационных тепловых и механических воздействий на ЦКК, представляют собой «местное разрушение в виде выкрашивания металла поверхности катания колеса» [1] и объективно отражают всю совокупность сложных нестационарных процессов.

Следует отметить, что если механические воздействия на ЦКК приводят главным образом к деформационным процессам и накоплению пластических деформаций в приповерхностных слоях поверхности катания колеса, то тепловые воздействия, связанные с торможениями, могут приводить к сложным нестационарным процессам теплопереноса, структурным и фазовым превращениям, кинетике напряженно-деформированного состояния, возникшего на этапе термической обработки после закалки и последующего отпуска, накоплению пластической деформации как на поверхности катания, так и в зоне перехода от обода к диску. Кинетика тепловых процессов при торможении в приповерхностных слоях может приводить к существенному снижению механических характеристик металла колеса, что способствует увеличению интенсивности протекающих в результате механических нагрузений пластических деформаций в этих зонах и формированию локальных дефектов усталостного характера.

## МЕТОДИКА РАСЧЕТА ТЕПЛОВЛОЖЕНИЙ

При современном уровне техники нестационарные термдеформационные процессы, протекающие в ЦКК, не могут быть проанализированы инструментальными методами. Оценка их влияния на текущее состояние, надежность, безотказность, ремонтпригодность колеса может быть получена только с помощью компьютерного моделирования нелинейных нестационарных процессов теплопереноса, структурных и фазовых превращений, решения задач термовязкоупругопластичности с учетом кинетики фазового и структурного состояния, а также всего комплекса свойств.

Базовые положения методики анализа параметров тепловых воздействий на ЦКК при торможении опираются на общепринятые подходы, изложенные в работах целого ряда ученых [2, 3, 4].

В основе процесса торможения лежит преобразование кинетической энергии поезда в тепловую. Тепло, выделяющееся в зоне контакта колеса с колодкой, распределяется между ними. Количество тепла, поступающего в колесо, зависит от типа

тормозной колодки. При композиционных тормозных колодках 95% выделяемого при торможении на контактных поверхностях трущейся фрикционной пары тепла воспринимается лишь ободом колеса [5]. Если стоят чугунные тормозные колодки, коэффициент разделения тепловых потоков принимается равным 0,8 для колеса и 0,2 для колодки при одностороннем торможении и соответственно 0,6 и 0,4 – при двухстороннем [4]

Разработанная нами методика расчетной оценки интенсивности выделения тепла в паре «колесо-колодка» [6] основана на использовании следующих положений.

При определении фактического времени торможения состава и количества тепла, выделяющегося при торможении, учитываются:

- начальная и конечная скорости поезда в расчётном интервале  $V_n$  и  $V_k$ , км/ч;
- основное удельное сопротивление движению  $\omega_{ox}$ , кгс/т;
- уклон пути  $i$ , ‰;
- замедление поезда под действием удельной замедляющей силы  $\xi$ ;
- режим воздухораспределителя (груженный, средний, порожний);
- осевая нагрузка  $q_0$ , т;
- расчётный коэффициент трения тормозных колодок  $\varphi_k$ ;
- сила нажатия тормозных колодок, действительная  $K_d$  и расчётная  $K_p$ , тс;
- тип тормозных колодок (чугунные, композиционные);
- вид вагона (грузовой, пассажирский);
- количество тормозных колодок на одно колесо;
- расчётный коэффициент тормозного нажатия поезда  $\mathcal{P}_p$ , тс/т;
- вес состава;
- тип торможения (экстренное, полное служебное, ступень торможения);
- удельная тормозная сила  $b_m$ , кгс/т;
- другие параметры.

Действительный тормозной путь вычисляется суммированием тормозных путей, определяемых по интервалам скорости, при условии постоянства тормозной силы, удельного сопротивления движению и уклона в принятом интервале скоростей [7].





Таблица 1

Значения силы нажатия на тормозную колодку для четырехосного полувагона, тс

Тип колодок	Режим воздухораспределителя		
	груженный	средний	порожний
композиционные	2,4	1,48	0,82
чугунные	3,8	2,3	1,26

$$\Delta S_{\theta} = \sum \frac{500 \cdot [V_n^2 - V_k^2]}{\xi \cdot (b_m + \omega_{ox} + \omega_i)}, \quad (1)$$

где  $V_n$  и  $V_k$  – начальная и конечная скорости поезда в принятом расчётном интервале скоростей;

$\xi$  – замедление поезда под действием удельной замедляющей силы;

$b_m$  – удельная тормозная сила при средней скорости в каждом интервале, кгс/т;

$\omega_{ox}$  – удельное сопротивление движению поезда при средней скорости в каждом интервале, кгс/т;

$\omega_i$  – удельное замедляющее или ускоряющее усилие, вызванное весом поезда при движении по уклону железнодорожного пути, кгс/т.

Ускорение  $a_i$  определяется зависимостью:

$$a_i = \frac{V_n^2 - V_k^2}{2 \cdot 3,6^2 \cdot \Delta S_{\theta}}. \quad (2)$$

Общее время торможения складывается из фактического времени торможения  $t_{\phi}$  и подготовительного  $t_n$ :

$$t_{\text{общ}} = t_{\phi} + t_n. \quad (3)$$

В течение подготовительного времени  $t_n$  тормоза не работают и поезд проходит подготовительный путь  $S_n$ . По истечении этого времени тормоза мгновенно срабатывают, и поезд проходит остальную часть тормозного пути при полной силе нажатия тормозных колодок.

Поэтому для определения количества выделившейся теплоты учитывается только составляющая  $t_{\phi}$ , которая находится формулой:

$$t_{\phi} = \sum \frac{V_n - V_k}{3,6 \cdot a_i}. \quad (4)$$

В качестве примера произведен расчёт тормозного пути и времени торможения,

представленный в таблицах 2 и 3 для состава из 50 груженых полувагонов на роликовых подшипниках и двухсекционного локомотива с учётным весом 192 т, на площадке ( $i=0$ ) бесстыкового пути. Значение  $\xi$  принято равным 120.

Сила нажатия ( $K_d$ ) для четырехосного полувагона принималась при груженом режиме воздухораспределителя (таблица 1).

Полученные данные для экстренного торможения со скорости 120 км/ч сведены в таблицы 2 и 3.

Значения действительного тормозного пути, полученного по методике суммирования по интервалам скоростей, составили 1054 м при композиционных колодках и 1894 м в пересчете на чугунные. Подготовительный путь для состава от 200 до 300 осей с начальной скорости 120 км/ч на площадке пути с уклоном  $i=0\%$  определен в 334 м. Соответственно, полный тормозной путь при композиционных колодках – 1388 м, в пересчете на чугунные – 2228 м.

По номограммам, представленным в работе [6], тормозной путь грузового поезда при экстренном торможении на площадке составляет при композиционных колодках ( $\rho_p = 0,204$ ) –  $S \approx 1390$  м, при чугунных ( $\rho_p = 0,297$ ) –  $S \approx 2100$  м.

Таким образом, погрешность рассчитанных данных расходится со значениями по номограммам менее чем на 6%.

### КИНЕТИКА НЕСТАЦИОНАРНЫХ ПРОЦЕССОВ

Кинетическая энергия состава при торможении:

$$\Omega = \frac{m \cdot V^2}{2}, \quad (5)$$

где  $m$  – масса состава, т;  $V$  – начальная скорость торможения, м/с.

Средняя мощность за время торможения:

$$q = \frac{\Omega}{t}, \quad (6)$$

где  $t$  – фактическое время торможения, с.

Средняя мощность выделяемого тепла за время торможения, при использовании композиционных и чугунных колодок:

$$q_k = \frac{\Omega}{t_k}, \quad (7)$$

Таблица 2

## Данные для определения действительного тормозного пути при использовании чугунных тормозных колодок

Vн	Vк	фк	Кд	фкр	Кр	ωо	ωх	ωох	ΣК	Q	ρ	bt, кгс/г	tф	Сд
120	110	0,076	3,8	0,086	3,358	2,394	8,06375	2,616157	1455	4892	0,297	25,580	10,6398	339,8824
110	100	0,078	3,8	0,089	3,358	2,168	7,20375	2,365724	1455	4892	0,297	26,341	10,4504	304,8033
100	90	0,081	3,8	0,092	3,358	1,960	6,41375	2,134391	1455	4892	0,297	27,235	10,21465	269,5533
90	80	0,084	3,8	0,095	3,358	1,768	5,69375	1,922159	1455	4892	0,297	28,299	9,926714	234,3808
80	70	0,088	3,8	0,099	3,358	1,594	5,04375	1,729027	1455	4892	0,297	29,587	9,579611	199,5752
70	60	0,093	3,8	0,105	3,358	1,436	4,46375	1,554996	1455	4892	0,297	31,179	9,164856	165,4766
60	50	0,099	3,8	0,112	3,358	1,296	3,95375	1,400065	1455	4892	0,297	33,194	8,671923	132,4877
50	40	0,107	3,8	0,120	3,358	1,172	3,51375	1,264235	1455	4892	0,297	35,830	8,087484	101,0936
40	30	0,117	3,8	0,133	3,358	1,066	3,14375	1,147506	1455	4892	0,297	39,424	7,394286	71,88889
30	20	0,133	3,8	0,150	3,358	0,977	2,84375	1,049877	1455	4892	0,297	44,616	6,56945	45,62118
20	10	0,157	3,8	0,177	3,358	0,904	2,61375	0,971349	1455	4892	0,297	52,774	5,581836	23,25765
10	0	0,201	3,8	0,227	3,358	0,849	2,45375	0,911922	1455	4892	0,297	67,459	4,387801	6,094167
													100,7	1894,11

Таблица 3

## Данные для определения действительного тормозного пути при использовании композиционных тормозных колодок

Vн	Vк	фк	Кд	фкр	Кр	ωо	ωх	ωох	ΣК	Q	ρ	bt	tф	Сд
120	110	0,232	2,4	0,251	2,216	2,394	8,064	2,616	998	4892	0,204	51,232	5,571173	177,968
110	100	0,236	2,4	0,255	2,216	2,168	7,204	2,366	998	4892	0,204	52,038	5,514327	160,8345
100	90	0,240	2,4	0,259	2,216	1,960	6,414	2,134	998	4892	0,204	52,938	5,447344	143,7494
90	80	0,245	2,4	0,264	2,216	1,768	5,694	1,922	998	4892	0,204	53,951	5,369288	126,7749
80	70	0,250	2,4	0,270	2,216	1,594	5,044	1,729	998	4892	0,204	55,099	5,279079	109,9808
70	60	0,256	2,4	0,276	2,216	1,436	4,464	1,555	998	4892	0,204	56,411	5,175452	93,44567
60	50	0,263	2,4	0,284	2,216	1,296	3,954	1,400	998	4892	0,204	57,925	5,056913	77,2584
50	40	0,271	2,4	0,293	2,216	1,172	3,514	1,264	998	4892	0,204	59,691	4,921672	61,5209
40	30	0,280	2,4	0,303	2,216	1,066	3,144	1,148	998	4892	0,204	61,778	4,767561	46,35129
30	20	0,291	2,4	0,315	2,216	0,977	2,844	1,050	998	4892	0,204	64,282	4,591922	31,88834
20	10	0,305	2,4	0,330	2,216	0,904	2,614	0,971	998	4892	0,204	67,343	4,391444	18,29768
10	0	0,323	2,4	0,349	2,216	0,849	2,454	0,912	998	4892	0,204	71,170	4,161952	5,78049
													60,2	1053,85



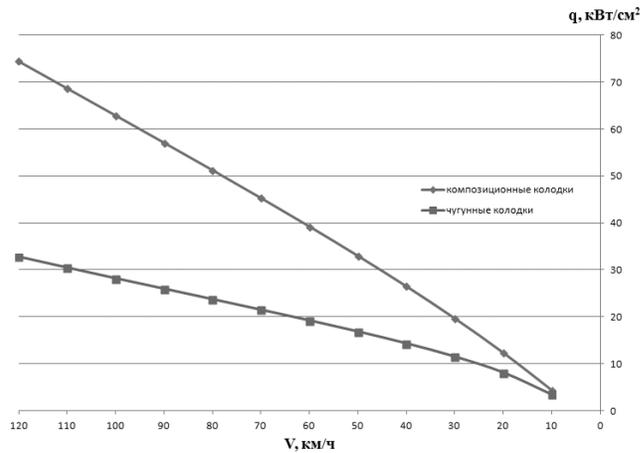


Рис. 1. Изменение значений мощности тепловложений в ЦКК в зависимости от текущей скорости движения вагона при торможении с учетом типа тормозной колодки.

$$q_{\text{ч}} = \frac{\Omega}{t_{\text{ч}}}, \quad (8)$$

где  $t_{\text{к}}, t_{\text{ч}}$  – время торможения для соответствующего типа тормозных колодок.

В качестве примера расчетной оценки интенсивности выделения тепла в паре «колодка-колесо» возьмем вариант экстренного торможения грузового поезда, массой 4892 т (двухсекционный локомотив ВЛ80к – учётный вес 192 тс, количество автотормозных осей – 8), состоящего из 50 четырехосных полувагонов со скорости 120 км/ч на площадке ( $i=0$ ) бесстыкового пути. При расчёте тепловложений берется фактическое время торможения 60 с при использовании композиционных колодок и 101 с – при чугунных (таблицы 2 и 3). Начальная скорость  $V = 120 \frac{\text{км}}{\text{ч}} = 33,33 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ .

Тогда кинетическая энергия состава при торможении будет равна:

$$\Omega = \frac{4892 \cdot 10^3 \cdot 33,33^2}{2} = 2717234,249 \text{ кДж}. \quad (9)$$

Средняя мощность за время торможения при использовании композиционных и чугунных колодок составляет:

$$q_{\text{к}} = \frac{2717234,249}{60} = 45287,238 \text{ кВт}; \quad (10)$$

$$q_{\text{ч}} = \frac{2717234,249}{101} = 26903,31 \text{ кВт}. \quad (11)$$

Мощность теплового потока на каждом из колес:

$$q_{\text{к}}^1 = \frac{q_{\text{к}}}{m_{\text{л}} + m_{\text{г}} \cdot n} = \frac{45287,238}{16 + 8 \cdot 50} = 108,86 \text{ кВт}; \quad (12)$$

$$q_{\text{ч}}^1 = \frac{q_{\text{ч}}}{m_{\text{л}} + m_{\text{г}} \cdot n} = \frac{26903,31}{16 + 8 \cdot 50} = 64,67 \text{ кВт}. \quad (13)$$

При КПД  $\eta = 0,95$  для композиционной колодки и  $\eta = 0,8$  для чугунной:

$$q_{\text{к}}^2 = q_{\text{к}}^1 \cdot \eta = 108,86 \cdot 0,95 = 103,417 \text{ кВт}; \quad (14)$$

$$q_{\text{ч}}^2 = q_{\text{ч}}^1 \cdot \eta = 64,67 \cdot 0,8 = 51,736 \text{ кВт}. \quad (15)$$

Для определения суммарной площади воздействия теплового потока на поверхность катания колеса учитываются ширина тормозной колодки и геометрические параметры колеса (с учетом текущего состояния – износа). Согласно [8] ширина чугунной тормозной колодки составляет 0,08 м. По ТУ 2571–028–00149386–2000 черт. 25610–Н ширина композиционной колодки также равна 0,08 м. Площадь поверхности введения тепла на поверхности катания колеса  $S = 2\pi r \cdot h$ , где  $r$  – радиус колеса, составляет 0,475 м,  $h$  – ширина тормозной колодки, м. Площадь поверхности –  $S = 0,239 \text{ м}^2$ .

$$q_{\text{к}}^{2\text{cp}} = \frac{q_{\text{к}}^2 \cdot \eta}{S} = \frac{103,417}{0,239} = \dots = 43,27 \text{ Вт/см}^2; \quad (16)$$

$$q_{\text{ч}}^{2\text{cp}} = \frac{q_{\text{ч}}^2 \cdot \eta}{S} = \frac{51,736}{0,239} = \dots = 21,65 \text{ Вт/см}^2. \quad (17)$$

Поскольку значение массы локомотива по сравнению с массой всего состава не-

Таблица 4

**Коэффициенты мощности тепловыделений в контакте тормозной колодки с ободом колеса по интервалам скорости**

Интервал скорости	$\Omega$ , кДж	$t_k$ , с	$q_k$ , кВт/см <sup>2</sup>	$t_u$ , с	$q_u$ , кВт/см <sup>2</sup>
120–110	8341,049	5,5	74,39	10,6	32,8
110–100	7615,741	5,5	68,62	10,4	30,49
100–90	6890,432	5,4	62,85	10,2	28,22
90–80	6165,123	5,3	57,05	9,9	25,99
80–70	5439,815	5,3	51,2	9,6	23,76
70–60	4714,506	5,2	45,26	9,2	21,52
60–50	3989,198	5,1	39,2	8,7	19,25
50–40	3263,889	4,9	32,95	8,1	16,89
40–30	2538,58	4,8	26,46	7,4	14,36
30–20	1813,272	4,6	19,62	6,6	11,55
20–10	1087,963	4,4	12,31	5,6	8,16
10–0	362,6543	4,2	4,33	4,4	3,46
Сумма	52222,22	60,2	-	100,7	-

Таблица 5

**Коэффициент мощности тепловложений, постоянный на всем интервале торможения**

Начальная скорость торможения, км/ч	Значения среднего коэффициента мощности тепловложений, Вт/см <sup>2</sup>	
	Композиционные колодки	Чугунные колодки
120–0	43,07	21,7
110–0	39,88	20,39
100–0	36,65	19,07
90–0	33,39	17,72
80–0	30,07	16,34
70–0	26,7	14,91
60–0	23,26	13,42
50–0	19,73	11,85
40–0	16,09	10,14
30–0	12,34	8,26
20–0	8,43	6,09
10–0	4,33	3,46

лико, допустимо осуществлять расчёт интенсивности тепловых потоков применительно к вагону.

В этом случае кинетическая энергия вагона:

$$\Omega = \frac{m \cdot V^2}{2} = \frac{94 \cdot 10^3 \cdot 33,33^2}{2} = 52211,778 \text{ кДж.} \quad (18)$$

Расчётное время экстренного торможения принимается в зависимости от материала тормозных колодок: 60 с –

при композиционных и 101 с – при чугунных.

$$q_k = \frac{\Omega}{t} = \frac{52211,778}{60} = 870,196 \text{ кВт;} \quad (19)$$

$$q_u = \frac{\Omega}{t} = \frac{52211,778}{101} = 516,948 \text{ кВт.} \quad (20)$$

На каждом из восьми колес четырехосного вагона выделяется мощность:

$$q_k^1 = \frac{q_k}{8} = \frac{870,196}{8} = 108,775 \text{ кВт;} \quad (21)$$

$$q_u^1 = \frac{q_u}{8} = \frac{516,948}{8} = 64,62 \text{ кВт.} \quad (22)$$

При КПД  $\eta = 0,95$  для композиционной колодки и  $\eta = 0,8$  для чугунной получаем:

$$q_k^2 = q_k^1 \cdot \eta = 108,775 \cdot 0,95 = 103,336 \text{ кВт;} \quad (23)$$

$$q_u^2 = q_u^1 \cdot \eta = 64,62 \cdot 0,8 = 51,696 \text{ кВт.} \quad (24)$$

Удельная мощность, выделяемая на единице поверхности площадки в контакте колесо-колодка:

$$q_k^{2cp} = \frac{q_k^2 \cdot \eta}{S} = \frac{103,336}{0,239} = \dots = 43,24 \text{ Вт/см}^2; \quad (25)$$

$$q_u^{2cp} = \frac{q_u^2 \cdot \eta}{S} = \frac{51,696}{0,239} = \dots = 21,63 \text{ Вт/см}^2. \quad (26)$$

Сравнивая результаты, полученные по формулам (14) – (15) и (25) – (26), можно сделать вывод, что погрешность не пре-



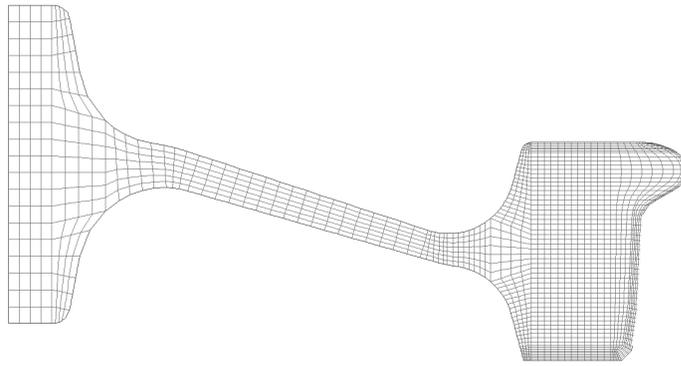


Рис. 2. Осесимметричная модель цельнокатаного колеса с прямолинейным диском.

вышает 1%, и допустимо расчет тепловложений в колесо производить применительно к одному вагону (при допущении, что состав состоит из однотипных вагонов).

В результате полученные значения средних тепловложений в колесо  $q^{2cp}$  и  $\sum t_i$  являются исходными данными для анализа кинетики тепловых процессов в ЦКК при торможении.

Следует заметить, что при анализе тепловых воздействий на колесо в расчетах мощность тепловых нагрузок ранее принималась постоянной на всем отрезке торможения – от начала до его окончания. Однако такой подход можно считать приближенным, ибо в процессе торможения интенсивность выделяемого тепла в паре «колесо-колодка» зависит от скорости вращения колеса (скорости движения состава) и различается во времени.

Отличительная особенность разработанной методики – дифференцированная оценка интенсивности тепловых нагрузок на колесо в зависимости от текущей скорости движения. При расчёте действительного тормозного пути, фактического времени торможения и мощности тепловых потоков рассматриваются интервалы скоростей через 10 км/ч.

В этом случае:

$$\Omega_i = \frac{m \cdot (V_i^2 - V_{i+1}^2)}{2} \tag{27}$$

$$q_i = \frac{\Omega_i}{t_i}, \tag{28}$$

где  $\Omega_i$  – кинетическая энергия в заданном интервале скоростей торможения, кДж;

$t_i$  – время торможения в заданном интервале скоростей торможения, с;

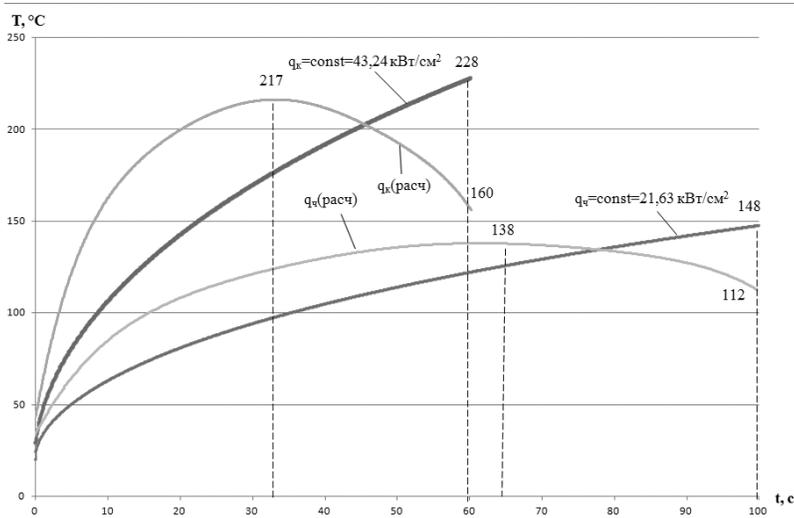
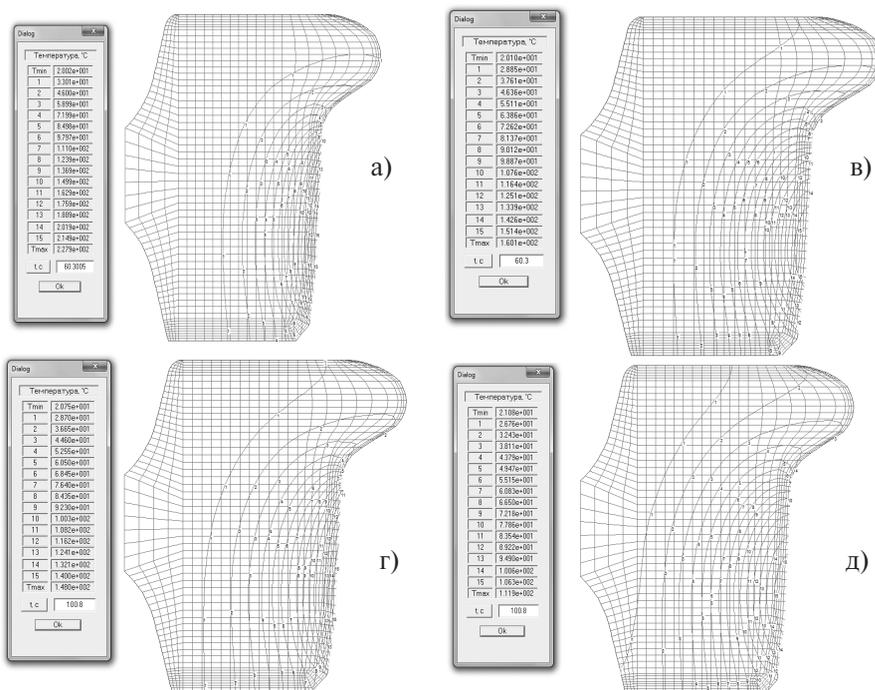
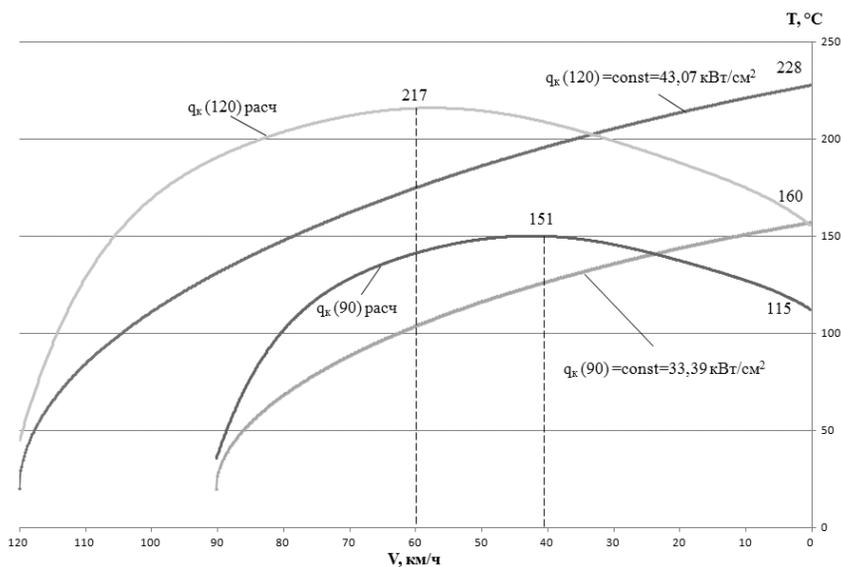


Рис. 3. Распределение значений максимальных температур на поверхности катания колеса при различных коэффициентах мощности тепловложений.



**Рис. 4. Распределение температур в ободе колеса в момент окончания экстренного торможения: коэффициент мощности тепловложений – постоянный (а – композиционные колодки, б – чугунные колодки), коэффициент мощности тепловложений зависит от текущей скорости вагона (в – композиционные колодки, г – чугунные колодки).**



**Рис. 5. Кинетика максимальных температур на поверхности катания обода колеса при торможении со 120 км/ч и с 90 км/ч, композиционные колодки.**

$V_i, V_{i+1}$  – соответственно начальная и конечная скорости торможения в заданном интервале, м/с.

Реализация демонстрируемого подхода представлена на примере результатов расчета тепловложений при торможении вагона (см. таблицу 4).

Сумма кинетической энергии, рассчитанная по интервалам скоростей, совпадает с кинетической энергией, вычисленной по формуле (18), если не округлять скорость до 33,33 м/с.

На рис. 1 изображена диаграмма изменения мощности тепловложений, в зависимости от текущей скорости грузового





вагона при торможении, полученная по интервалам скоростей торможения, составляющим 10 км/ч.

В таблице 5 приведены данные значений коэффициента мощности тепловложений в ЦКК, постоянные на всем отрезке торможения с различной начальной максимальной скорости, рассчитанные по применяемой нами методике.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ НАГРЕВА ОБОДА КОЛЕСА

Для анализа кинетики тепловых процессов в ЦКК при торможении разработана осесимметричная конечно-элементная модель, представленная на рис. 2. Размеры соответствуют указанному в ГОСТ 10791–2011. Модель состоит из 2000 узлов, количество четырехузловых элементов – 1864.

На рис. 3 даны кривые изменения значений максимальных температур на поверхности катания колеса при экстренном торможении для рассмотренного варианта при использовании коэффициента мощности тепловложений: *постоянного* в течение всего торможения ( $43,24 \text{ Вт/см}^2$  – композиционная колодка,  $21,63 \text{ Вт/см}^2$  – чугунная колодка), а также *переменного* с учетом текущей скорости движения.

Анализ приведенных кривых свидетельствует о том, что использование постоянного значения коэффициента мощности тепловложений в течение всего режима торможения обеспечивает рост максимальных температур на всем отрезке торможения с максимальными значениями в конце торможения ( $228 \text{ }^\circ\text{C}$  – при композиционных колодках,  $148 \text{ }^\circ\text{C}$  – при чугунных колодках).

При использовании в ходе компьютерного моделирования переменных значений коэффициента мощности тепловложений в зависимости от текущей скорости вагона максимальные значения температур отмечаются на поверхности колеса не в конце торможения, как это было ранее, а на промежуточном этапе торможения. Это объясняется тем, что с уменьшением скорости движения вагона интенсивность теплового потока, выделяемого в колесо, снижается при наличии процессов интенсивного теплопереноса в обод колеса с поверхности катания.

На рис. 4 представлено распределение температур в сечении обода колеса в мо-

мент окончания экстренного торможения.

Рассмотрим результаты моделирования тепловых процессов в ЦКК при торможении с различной начальной скорости и использовании композиционных тормозных колодок.

На рис. 5 представлены результаты компьютерного моделирования при использовании постоянного коэффициента мощности тепловложений ( $33,39 \text{ Вт/см}^2$  и  $43,07 \text{ Вт/см}^2$ ) и переменного коэффициента мощности тепловложений (данные в таблице 5).

Анализ результатов моделирования, представленных на рис. 5, свидетельствует о том, что использование при формировании граничных условий переменного коэффициента мощности тепловложений в зависимости от текущей скорости вагона приводит к получению максимальных значений температур на поверхности катания колеса не в конце торможения, а в средней его части. Это принципиально важный результат, который имеет особое значение не при анализе тепловых процессов по результатам моделирования полного цикла торможения с максимальной скорости движения до полной остановки, а при моделировании последовательных циклов неполного торможения, что имеет место в эксплуатации при движении поезда.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Классификатор неисправностей вагонных колесных пар и их элементов. - М.: ОАО «РЖД», 2007. – 100 с.
2. Жаров И. А. Применение тепловых моделей для анализа процессов в системе «колодка–колесная пара–рельсы»// Труды ВНИИЖТ. Контактно-усталостные повреждения колес грузовых вагонов/ Под ред. С. М. Захарова. – М.: Интекст, 2004. – 160 с.
3. Петров С. Ю. Свойства материалов трибосистем колодка-колесо-рельс. – М.: МИИТ, 2000. – 210 с. (Деп. ЦНИИТИ МПС № 6309).
4. Расчёт и проектирование пневматической и механической частей тормозов вагонов: Учеб. пособие / П. С. Анисимов, В. А. Юдин, А. Н. Шамаков, С. Н. Коржин; Под ред. П. С. Анисимова. – М.: Маршрут, 2005. – 248 с.
5. Цельнокатаные железнодорожные колёса. Изготовление, эксплуатация, восстановление, обеспечение надёжности / Под общ. ред. С. Н. Киселёва. – М.: Печать-Сервис-XXI век, 2009. – 265 с.
6. Гребенюк П. Т., Долганов А. Н., Скворцова А. И. Тяговые расчёты: Справочник / Под ред. П. Т. Гребенюка. – М.: Транспорт, 1987. – 272 с.
7. ГОСТ 1205–73 «Колодки чугунные, тормозные для вагонов и тендеров железных дорог широкой колеи. Конструкция и основные размеры». ●