

УДК 629.4.027

DOI: 10.30987/1999-8775-2020-4-31-42

П. И. Шалупин

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ТЕПЛОВОГО КОНТРОЛЯ КОЛОДОЧНЫХ ТОРМОЗОВ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА МЕТОДОМ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Целью статьи является исследование процесса теплового контроля колодочных тормозов с точки зрения оценки влияния ориентации инфракрасной оптики на получаемые результаты контроля. Исследование проведено методом компьютерного имитационного моделирования. Впервые получены расчетные осциллограммы изменения теплового сигнала при различных вариантах ориен-

тации оптики на объект контроля. На основе расчетных данных сделан вывод о рациональной ориентации оптики.

**Ключевые слова:** тепловой контроль, диагностика, колодочные тормоза, температура, термомеханические повреждения, имитационное моделирование.

P.I. Shalupin

## THERMAL CONTROL INVESTIGATION OF ROLLING-STOCK SHOE BRAKES BY SIMULATION METHOD

The development of heavy speed freight train communications in the Russian Federation results in the increased thermal loading of braking system elements of rolling-stock, in particular, in shoe brakes. Taking into account the requirements of branch program documents on wheel life increase, it is evident that the further development of freight communications requires a complex application of thermal diagnostics means for auto-brake equipment of rolling-stock during a train motion.

The statistics shows that the fifth part of wheel pair failures is connected with thermal-mechanical damages and the situation goes on to be aggravated. In view of this hardware and software means for thermal diagnostics of shoe brakes require further improvement. The purpose of this paper is the process investigation of shoe brake thermal control by method of computer simulation and the estimate of infrared optics position impact upon control results.

There is considered a model for the definition of a scanning path and computation of a signal level being part of a complex simulation model of wheel thermal control. The model offered is based on the methods of solid dynamics system investigations in the basis of which there is an application of theorems on mass center motion and changes of a solid kinetic moment.

The model is used for finding a form and a spot area at every time moment of scanning by a solution of a problem on a dynamic spatial intersection of a wheel surface with the control area. There are considered different versions of optics orientation to an object of control for each of which for the first time there are obtained calculated thermal signals from the object under control. The analysis has shown that at the optics orientation to wheels from the outside a wheel tread appears to be in the control area that allows defining a maximum temperature of a wheel. But at the realization of emergency brake application a sharp short-time temperature increase of a tread is possible which indicates an improper operation of a brake unit.

The optics orientation to a wheel from its inner side allows excluding false alarm indices at emergency brake application. The correctness of the results shown in the paper is confirmed by convergence with the results of wheel heating monitoring and environmental tests of experimental complexes of thermal control means of shoe brakes.

**Key words:** thermal control, diagnostics, shoe brakes, temperature, thermal-mechanical failures, simulation.

### Введение

Стратегией развития железнодорожного транспорта до 2030 года [1] в качестве одного из ключевых моментов социально-экономического роста страны выделена необходимость повышения безопасности функционирования железнодорож-

ного транспорта. Одним из важнейших условий её обеспечения является надежная работа ходовых частей подвижного состава железных дорог и, в частности, их тормозных систем. Особую актуальность этому вопросу придаёт направленность же-

лезнодорожной отрасли на увеличение нагрузок на ось грузовых вагонов до 27-30 тс, повышения их максимальных скоростей движения до 140 км/ч и, как следствие, увеличение тепловой нагруженности элементов тормозных систем. Повышаются и требования к сроку службы подвижного состава – Стратегией установлено требование по увеличению ресурса ободьев колёс грузовых вагонов до 600 тыс. км. Реализация этих требований невозможна без развития и комплексного использования средств тепловой диагностики автотормозного оборудования подвижного состава на ходу поезда.

В России тепловой контроль ходовых частей подвижного состава (в частности, буксовых узлов и колодочных тормозов) первоначально осуществлялся при помощи систем ПОНАБ и ДИСК, а в дальнейшем их модернизированными вариантами – КТСМ-01 и КТСМ-01Д. В конструкции КТСМ-01Д для теплового контроля колодочных тормозов применялись вспомогательные напольные камеры, инфракрасная оптика которых ориентирована на ступицы колёс с наружной стороны. В 2006 году началось массовое внедрение аппаратуры нового поколения КТСМ-02, а также выполнение работ по модернизации приборов КТСМ на КТСМ-02. Несмотря на более современную элементную базу и гибкость в отношении вариантов настройки пороговых значений теплового контроля, отказ от вспомогательных напольных камер, применявшихся в КТСМ-01Д и ориентированных на ступицы колёс, в пользу основных напольных камер КНМ-05 с креплением на рельсе привел к невозможности непосредственной оценки нагрева колёс при колодочном торможении. Их использование позволяет выявлять заторможенные тележки по тепловой аномалии боковин рам тележек, однако создание на их базе полноценной системы бесконтактного теплового контроля колодочных тормозов не представляется возможным. Тем не менее, рост отцепок вагонов в последние годы происходит в основном как раз за счет неисправностей колёсных пар [2]. В период 2013-2016 гг. среднегодовой темп роста отцепок по этим причинам составил

15,9 %. Для сравнения, среднегодовой темп роста совокупного числа отцепок в тот же период составил 8 %. При этом количество неисправностей колёсных пар увеличивается с темпом, значительно более высоким, чем рост грузооборота: 15,9 % против 2,2 % в период 2013-2016 гг. Значительный относительный рост неисправностей колёсных пар привел к тому, что к 2016 году доля отцепок по ним достигла 60 %. По имеющимся данным, среди основных видов неисправностей колёсных пар около 19 % занимают термомеханические повреждения – выщербины, ползуны, навары, являющиеся дефектами тормозного происхождения.

Очевидно, что технические и программные средства тепловой диагностики автотормозного оборудования, в частности, наиболее распространенных колодочных тормозов, нуждаются в дальнейшем совершенствовании. В этой связи особую актуальность имеет задача по исследованию процесса теплового контроля средствами тепловой диагностики колодочных тормозов с целью выбора наиболее информативной зоны теплового контроля, ориентации инфракрасной оптики на объект контроля, назначения пороговых значений теплового контроля, формирования системы диагностических признаков, характеризующих текущее техническое состояние объекта. Для решения такой задачи целесообразно применение методов компьютерного имитационного моделирования с системной интеграцией моделирования процессов торможения и осуществления теплового контроля колодочных тормозов. В предыдущих работах автора подробно рассмотрены вопросы моделирования процесса торможения подвижного состава с точки зрения нагрева колёс [3, 4] в рамках разработанной диагностической модели теплового контроля колодочных тормозов [5, 6]. Целью настоящей статьи является развитие положений предыдущих работ, а именно – исследование процесса теплового контроля колодочных тормозов с точки зрения оценки влияния ориентации инфракрасной оптики на получаемые результаты контроля.

## Метод исследования

Основной особенностью упомянутой выше комплексной модели теплового контроля колодочных тормозов является её блочное описание, когда выходные данные одного блока являются входными для другого. Модель состоит из трёх обособленных блоков:

1. Модель взаимодействия колеса и тормозной колодки при торможении, в состав которой входят подмодели тормозного расчета, определения теплового потока при взаимодействии колеса и колодки, а также расчета коэффициентов конвективной теплопередачи.

2. Модель нагрева колеса при торможении, реализованная на основе метода конечных элементов (МКЭ). Входными данными для моделирования нагрева колеса служат результаты расчетов в модели взаимодействия колеса и тормозной колодки при торможении.

3. Модель определения траектории сканирования и вычисления уровня сигнала, которую предлагается рассмотреть более подробно в рамках настоящей статьи.

Исходными данными к моделированию траектории сканирования и вычисления уровня сигнала, получаемого приемником ИК-излучения, являются результаты моделирования нагрева колеса. В модели определения траектории сканирования принято существенное допущение – вертикальные перемещения колеса, как объекта теплового контроля, вследствие движения по неровностям пути приняты не существенными и в рамках модели не учитываются. С учетом этого допущения форма траектории сканирования является достаточно простой и представляет собой с некоторой степенью упрощения параболу, начальная и конечная точки которой находятся на окружности колеса, а вершина лежит на оси мгновенного центра вращения колеса, соответствующего моменту начала пересечения колесом сканирующего луча приемника ИК-излучения, а высота её расположения на колесе зависит от угла ориентации приемника.

Более сложной является задача определения формы и площади участка колеса, попадающего в зону контроля приемника

ИК-излучения (пятно). Это связано с тем, что составные части колеса (обод, диск, ступица), а также соединение между ними, имеют сложные формы со скруглениями больших радиусов, плавными изгибами, конусными переходами. Для отыскания формы и площади пятна в каждый момент времени сканирования необходимо решать задачу динамического пространственного пересечения поверхности колеса с зоной контроля, имеющей вид конуса с вершиной в точке, из которой исходит оптическая ось приемника. В этой связи, а также с целью точного описания траектории сканирования колеса приемником ИК-излучения и определения формы и площади пятна в каждый момент времени сканирования разработана математическая модель движения колёсной пары по железнодорожному пути. Предложенная модель базируется на применении методов исследования динамики систем твердых тел [7], в основе которых лежит применение следствий из второго закона Ньютона:

а) теоремы о движении центра масс:

$$Ma_c = \sum F_k^e = R^e, \quad (1)$$

где  $M$  – масса тела;  $a_c$  – ускорение в базовой системе координат;  $F_k^e$  – равнодействующая внешних сил;

б) теоремы об изменении кинетического момента тела:

$$I_c^1 \varepsilon^1 + \mathfrak{D} I_c^1 \omega^{(1)} = M_c^{e1}, \quad (2)$$

где  $I_c^1$  – тензор инерции тела относительно центра масс;  $\varepsilon^1$  – угловое ускорение тела;  $\mathfrak{D}$  – кососимметрический тензор угловой скорости;  $\omega^{(1)}$  – угловая скорость тела;  $M_c^{e1}$  – главный момент внешних сил относительно центра масс.

Рассматривая механическую систему из абсолютно твердых тел, соединенных шарнирами нормального типа, для каждого тела теорема о движении центра масс (1) и уравнение Эйлера (2) запишется в виде:

$$\begin{aligned} m_i a_i &= F_i + T_i, \\ I_i^i \varepsilon_i^i + \mathfrak{D} I_i^i \omega_i^i &= L_i^i + S_i^i, \\ i &= 1 \dots N, \end{aligned} \quad (3)$$

где  $i$  – номер тела;  $N$  – число тел в системе;  $F_i, L_i$  – главный вектор и главный момент относительно центра масс активных сил;  $T_i, S_i$  – главный вектор и главный момент относительно центра масс сил реакций и связей.

Систему уравнений (3) можно переписать в матричном виде:

$$M_i W_i + K_i = G_i + R_i, \quad (4)$$

где  $M_i = \begin{pmatrix} m_i E & 0 \\ 0 & I_i \end{pmatrix}$  – матрица масс отдельного тела;

$W_i = \begin{pmatrix} a_i \\ \varepsilon_i \end{pmatrix}$  – столбец актив-

$$\begin{aligned} r_i^{(0)} &= r_i^{(0)}(q, t), & A_{i0} &= A_{i0}(q, t), \\ v_i^{(0)} &= D_i^{(0)} \dot{q} + v_i^{(0)}, & \omega_i^{(0)} &= B_i^{(0)} \dot{q} + \omega_i^{(0)}, \\ a_i^{(0)} &= D_i^{(0)} \ddot{q} + a_i^{(0)}, & \varepsilon_i^{(0)} &= B_i^{(0)} \ddot{q} + \varepsilon_i^{(0)}, \end{aligned} \quad (5)$$

где  $i$  – номер произвольного тела системы;  $r_i^{(0)}$  – радиус-вектор начала связанной с телом системы координат;  $v_i^{(0)}, \omega_i^{(0)}, a_i^{(0)}, \varepsilon_i^{(0)}$  – линейные и угловые скорости и ускорения тела относительно базовой системы координат.

Присоединяя соотношения (5) к уравнениям (3),

$$W_i = \Phi_i \ddot{q} + W_i^*, \quad (6)$$

получим полные уравнения движения системы:

ных сил;  $G_i = \begin{pmatrix} F_i \\ L_i \end{pmatrix}$  – столбец активных

сил;  $R_i = \begin{pmatrix} T_i \\ S_i \end{pmatrix}$  – столбец реакций сил.

Зависимости кинематических характеристик всех тел системы от обобщенных координат и их первых и вторых производных по времени имеют вид:

$$M_i \Phi_i \ddot{q} + M_i W_i^* + K_i = G_i + R_i, \quad (7)$$

которые представляют собой систему  $6N$  линейных алгебраических уравнений относительно неизвестных вторых производных от обобщенных координат  $\ddot{q}$  и сил реакций связи.

Разработанная динамическая модель представлена твердотельными моделями колеса и пути. Её общий вид приведен на рис. 1.

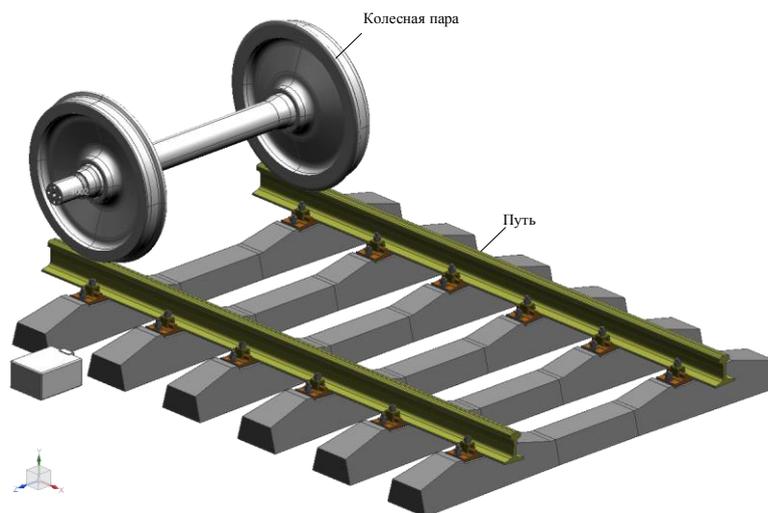


Рис. 1. Общий вид динамической модели движения колёсной пары по железнодорожному пути

Модель рельса принимается в качестве безмассового элемента со следующими допущениями: деформации левого и правого рельса не зависят друг от друга; при вертикальной деформации и поперечном отжатии рельса возникают линейные упруго-диссипативные силы.

Силы, действующие на рельс вследствие деформаций, определяются линейными соотношениями:

$$\begin{aligned} R_y &= -c_{ry} \Delta y_r - d_{ry} \dot{\Delta y}_r, \\ R_z &= -c_{rz} \Delta z_r - d_{rz} \dot{\Delta z}_r, \end{aligned} \quad (8)$$

где  $c_{ry}, c_{rz}, d_{ry}, d_{rz}$  – коэффициенты жесткости и демпфирования рельса в поперечном и вертикальном направлениях соответственно.

Силы  $R_y, R_z$  совместно с контактными силами, действующими между колесом и рельсом, образуют уравновешенную систему сил. В модели контакт полагается одноточечным. В этом случае уравнения равновесия в проекциях на оси пути имеют вид:

$$\begin{aligned} R_y - F_1 \cos \beta_1 + N_1 \sin \beta_1 &= 0, \\ R_z - N_1 \cos \beta_1 + F_1 \sin \beta_1 &= 0, \end{aligned} \quad (9)$$

В рамках модели предлагается рассматривать только качение колёсной пары по рельсам без учета остальной конструкции единицы подвижного состава. Тогда модель колёсной пары можно с достаточной для заявленных целей моделирования точностью представить единым телом. В качестве примера процесс сканирования проиллюстрируем рис. 2, а, на котором он представлен в трех фрагментах вращательно-поступательного движения колеса с шагом по оборотам колеса, показывающим

прохождение характерных точек сканирующим лучом – точки начала сканирования (НС), оси колеса и точки окончания сканирования (ОС). Приемник ИК-излучения ориентирован на ступицу колеса.

На рис. 2, б укрупненно представлены полученные в результате моделирования формы пятна сигнала приемника для нескольких характерных моментов пересечения элементов конструкции колеса со сложной формой и сканирующего луча.

Для оценки формы и уровня сигнала, получаемого приемником ИК-излучения при сканировании колеса, на каждом шаге моделирования рассчитывается средняя температура пятна по формуле:

$$\bar{T} = \frac{\sum_{i=1}^n T_i}{n}, \quad (10)$$

где  $T_i$  – температура  $i$ -го узла конечно-элементной модели, попавшего в зону контроля;  $n$  – количество узлов, попавших в зону контроля.

Значение осциллограммы сигнала, пропорционального температуре участка колеса в зоне контроля, определяется из рассчитанных средних температур в каждый момент времени. Результаты моделирования нагрева колеса передаются в модель определения траектории сканирования и вычисления уровня сигнала, где моделируется прохождение нагретого колеса и считывание температуры с его поверхности при сканировании. Общий вид реализованной модели с иллюстрацией процесса сканирования нагретого колеса представлен на рис. 2, в.

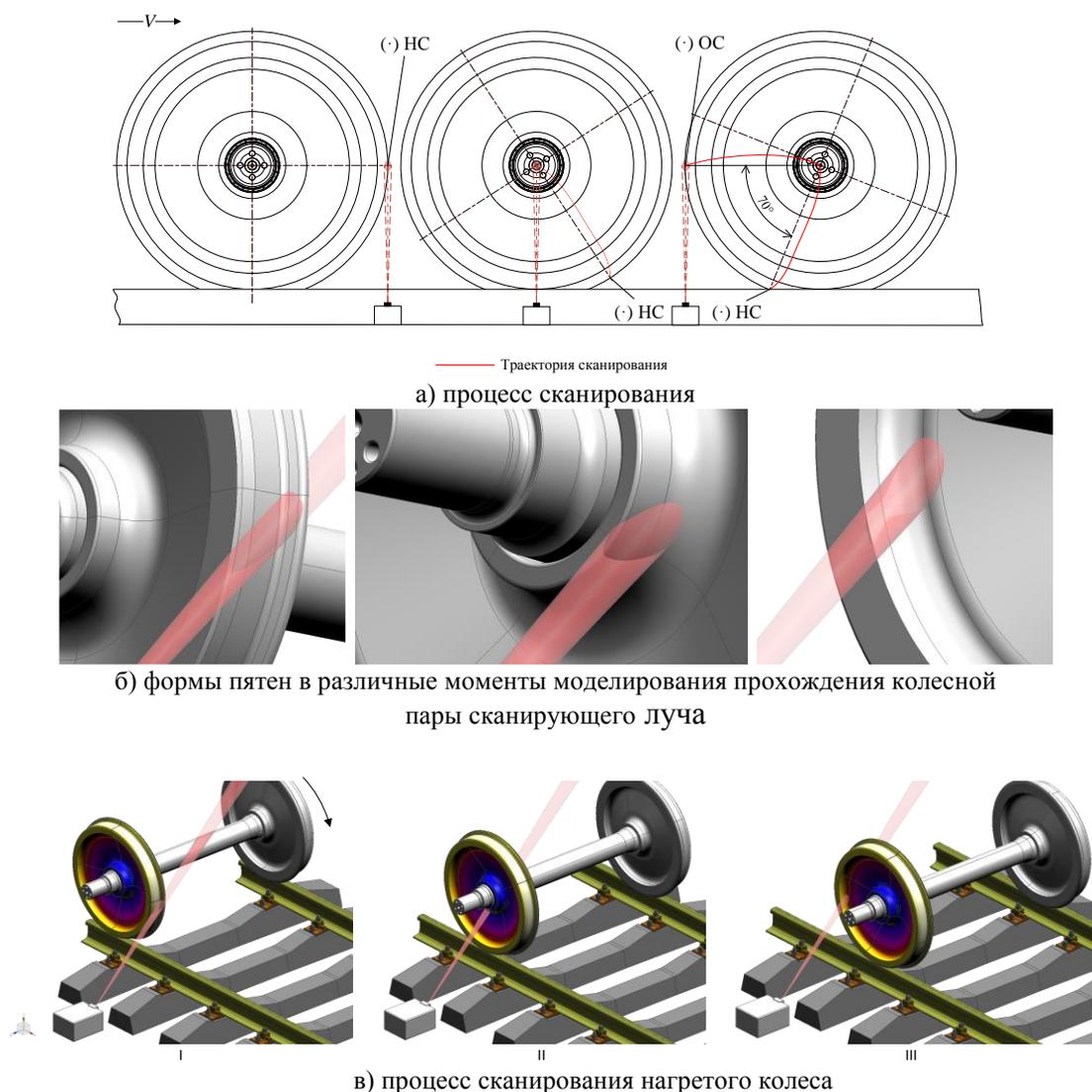


Рис. 2. Сканирование колеса при ориентации приемника ИК-излучения на ступицу колеса

### Результаты исследования

Предлагается рассмотреть четыре варианта ориентации приемника ИК-излучения на колесо – при расположении приемника с внутренней или внешней стороны колеса и ориентацией на ступицу или обод колеса. Для каждого из предлагаемых вариантов получены осциллограммы изменения сигнала, принимаемого ИК-оптикой, по рассчитанным с помощью модели нагрева режимам торможения. Предлагается рассмотреть полученные сигналы в наиболее показательных кратковременных режимах торможения, когда торможение происходит с высоких скоростей на порожних и груженых режимах воздухо-распределителя, а также длительные ре-

жимы для сравнительного анализа (табл. 1).

На рис. 3 приведены осциллограммы изменения сигнала при ориентации ИК-оптики на ступицу колеса с внешней его стороны. Как видно из рис. 3, осциллограммы сигналов в целом имеют параболическую форму. Для кратковременных режимов торможения при этом характерно появление широкой «плоской» зоны между ветвями параболы, которая соответствует моментам прохождения дисковой частью колеса сканирующего луча. В груженых режимах на осциллограммах можно отметить наличие «площадок», соответствующих началу сканирования колеса

(зоны гребня и поверхности катания). Возникновение «площадки» обусловлено большей длительностью процесса торможения и лучшим прогревом материала колеса по сечению вследствие явления теплопроводности. В длительных режимах

торможения форма сигнала стремится к классической параболической форме с более плавным достижением экстремума в нижней части, что, очевидно, обусловлено более интенсивным прогревом колеса по всему сечению.

Таблица 1

Характеристики режимов нагрева колеса при торможении

№	Начальная скорость <sup>1</sup> , км/ч	Тип колодки	Режим ВР	Уклон пути, ‰	Температура воздуха, °С	Толщина обода колеса, мм
Кратковременные режимы						
1	100	чугунная	порожний	0	0	70
2			груженный			
3	100	композиционная	порожний			
4			груженный			
Длительные режимы (длительность торможения 1200 с)						
5	30	композиционная	порожний	0	0	70
6			груженный			

Примечание: 1 – для длительных режимов скорость на протяжении исследуемого режима торможения принята постоянной.

Рассмотрим осциллограммы изменения сигналов при ориентации ИК-оптики на обод колеса с внешней его стороны (рис. 4).

Как видно из рис. 4, у всех сигналов при подобной ориентации ИК-оптики можно отметить несколько характерных зон. Для удобства анализа отметим эти зоны на рис. 4, а. Зона 1 показывает прохождение сканирующим лучом участка от гребня (первые точки сигнала) к поверхности катания. В кратковременных режимах торможения регистрируемая разница температур между гребнем и поверхностью катания выше, чем при длительных режимах, и имеет ярко выраженный градиент с быстро достигаемым экстремумом. При использовании композиционных тормозных колодок эта разница еще больше, а максимум температуры достигается значительно быстрее, чем при использовании чугунных колодок. Зона 2 иллюстрирует прохождение сканирующим лучом боковой поверхности обода колеса, температура которой несколько ниже температуры поверхности катания колеса. При использовании композиционных колодок разница между максимальным уровнем сигнала в зоне 1 и минимальным уровнем сигнала в зоне 2 на несколько порядков превосходит аналогичный показатель при использова-

нии чугунных колодок. Зона 3 в некоторой степени является зеркальным отражением зоны 1 и показывает прохождение сканирующим лучом участка колеса от обода к гребню через поверхность катания.

На рис. 5 приведены осциллограммы изменения сигнала при ориентации ИК-оптики на ступицу колеса с его внутренней стороны. Сравнение результатов моделирования на рис. 3 и 5 показывает, что при ориентации ИК-оптики на ступицу колеса с его внутренней стороны регистрируемая аппаратурой температура значительно ниже, чем при расположении оптики с внешней стороны колеса. Это, очевидно, обусловлено попаданием в зону контроля поверхности катания колеса, подвергающейся наиболее интенсивному нагреву при торможении. Величина разницы в уровне сигналов имеет зависимость от продолжительности торможения – с ростом длительности торможения разница в получаемых сигналах также растет. Форма получаемых сигналов при сравниваемых вариантах ориентации ИК-оптики можно считать приблизительно одинаковой за исключением локальных отклонений при переходах от обода к дисковой части колеса и наоборот, обусловленных различной формой сканируемых поверхностей.

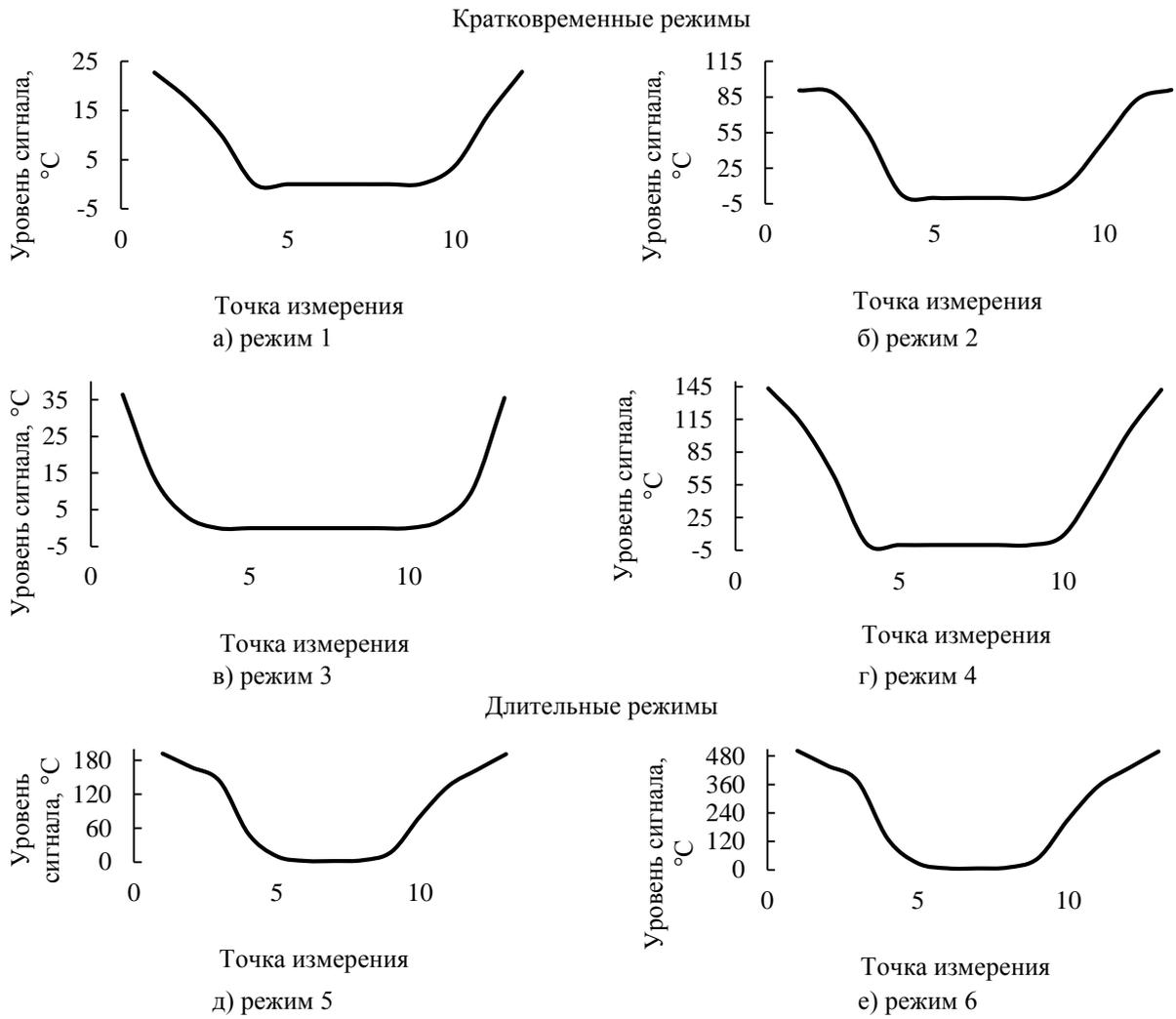
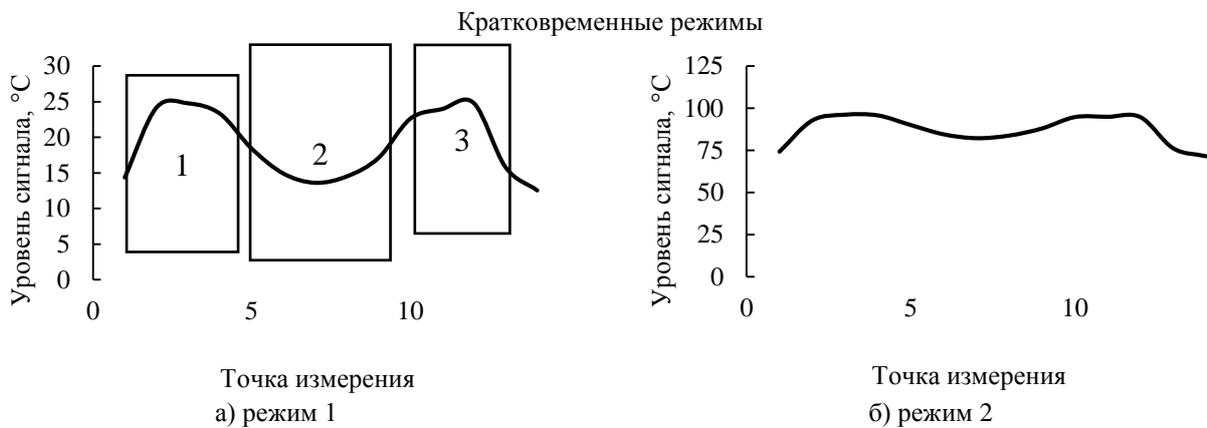
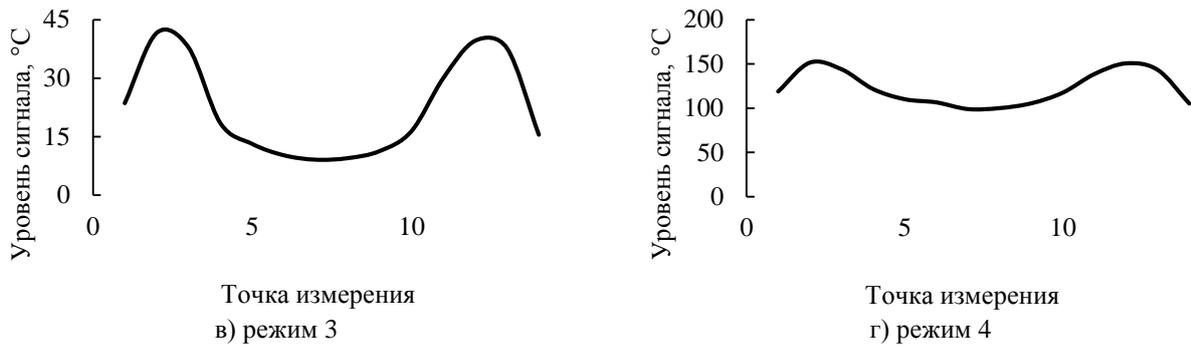


Рис. 3. Осциллограммы сигнала, получаемого приемником ИК-излучения при его ориентации на ступицу колеса с внешней стороны





Длительные режимы

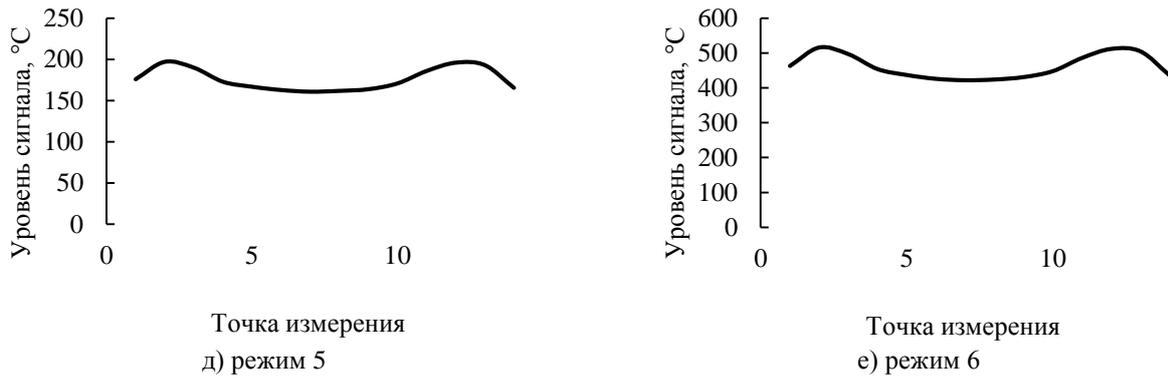
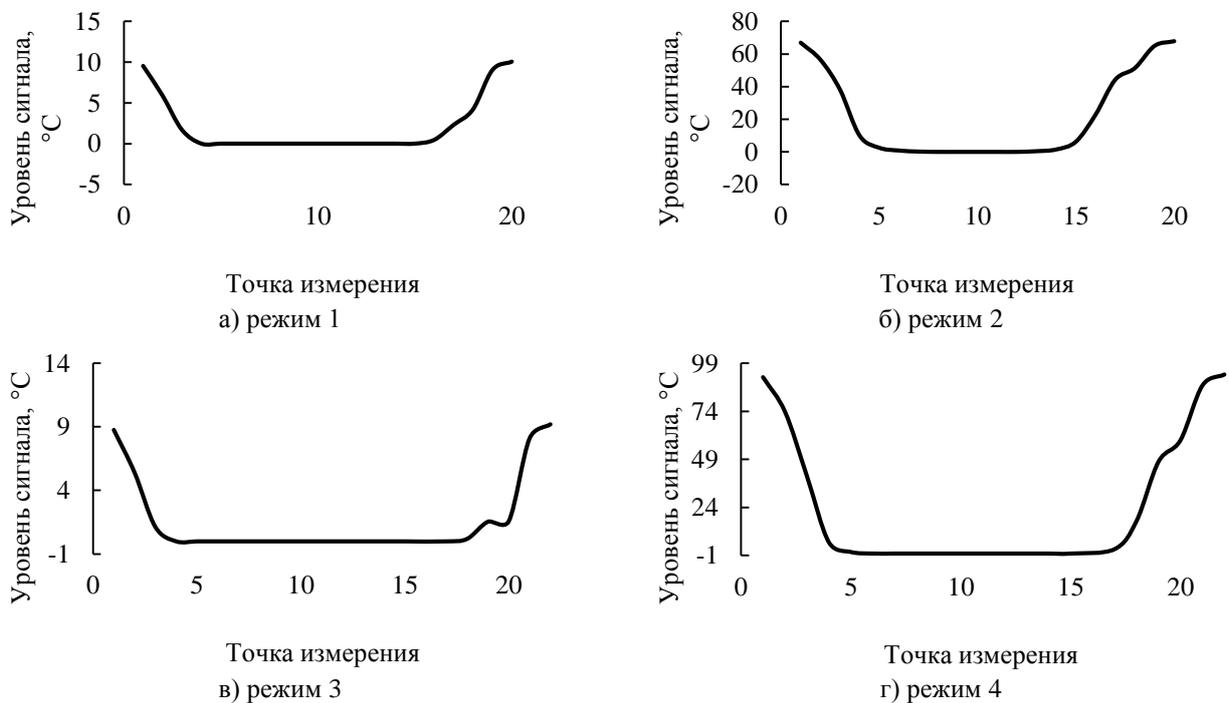


Рис. 4. Осциллограммы сигнала, получаемого приемником ИК-излучения при его ориентации на обод колеса с внешней стороны

Кратковременные режимы



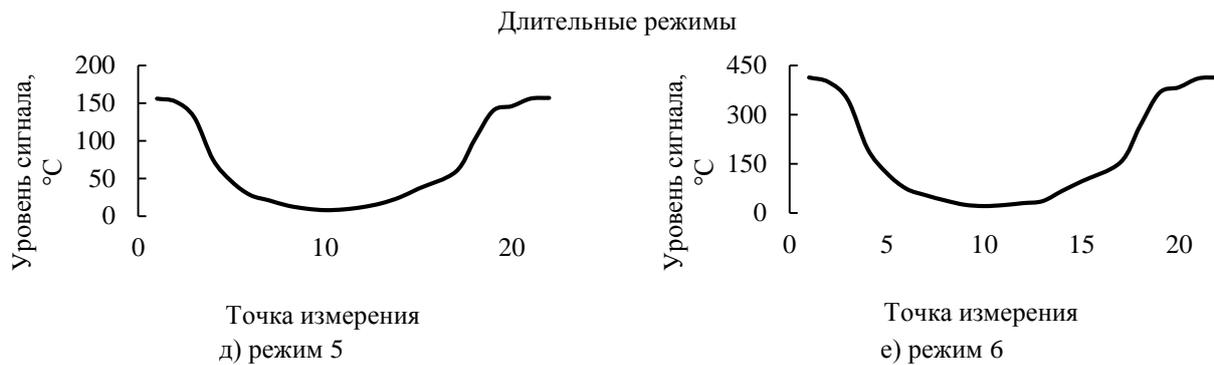
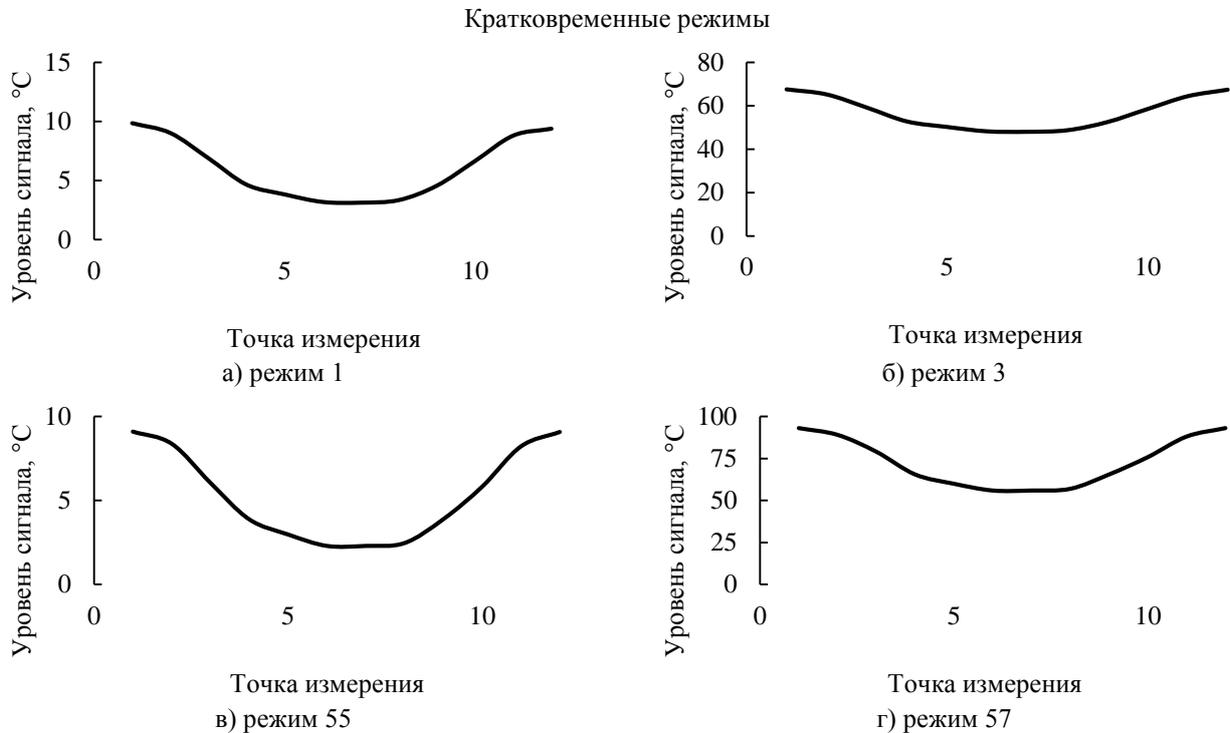


Рис. 5. Осциллограммы сигнала, получаемого приемником ИК-излучения при его ориентации на ступицу колеса с внутренней стороны

Осциллограммы изменения сигнала при ориентации ИК-оптики на обод колеса с его внутренней стороны приведены ниже (рис. 6).

Анализ динамических картин прохождения колесной парой участка контроля и графиков на рис. 6 показывает, что в зону контроля при принятой ориентации ИК-оптики попадает только боковая поверхность обода колеса. Этим обусловлена их приближенность к параболической форме и отсутствие дополнительных экс-

тремумов, как на рис. 5, обусловленных попаданием в зону контроля поверхности катания. Оценивая приведенные графики, заметим также, что они имеют незначительные отклонения между минимальным и максимальным уровнями принимаемых сигналов. При этом, как и в случае ориентации на ступицу, разница между регистрируемым уровнем температур с внутренней стороны обода значительно ниже, чем при ориентации с внешней.



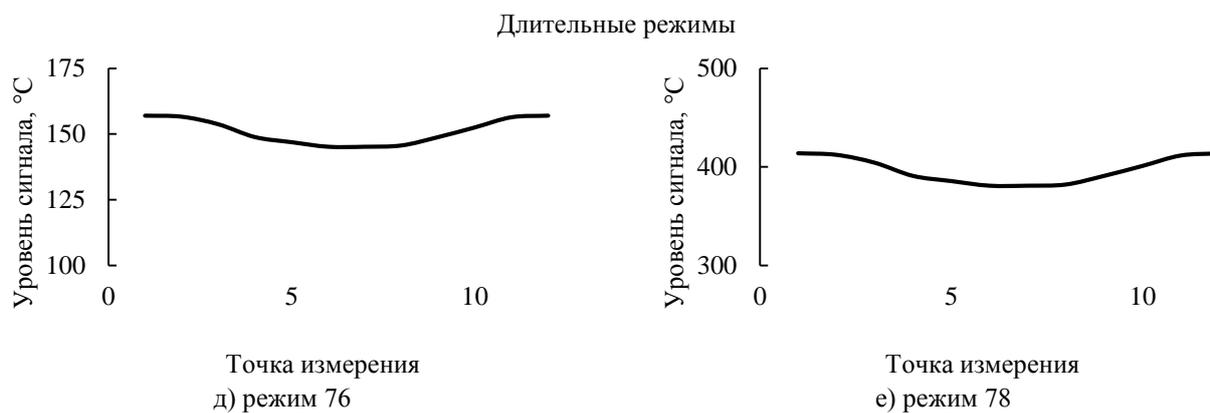


Рис. 6. Осциллограммы сигнала, получаемого приемником ИК-излучения при его ориентации на обод колеса с внутренней стороны

### Заключение

Обобщенный анализ приведенных результатов моделирования вычисления уровня сигнала, принимаемого ИК-оптикой, показывает, что при ориентации оптики на колеса с внешней стороны в зону контроля попадает поверхность катания колеса. В этой части подобная ориентация оптики видится наиболее информативной, поскольку позволяет определить максимальную температуру колеса. Несмотря на это, необходимо также учитывать тот факт, что при реализации режима экстренного торможения возможно резкое кратковременное повышение температуры поверхности катания колеса, что не отражает адекватной картины работы тормозного узла. В таких случаях возможно ложное срабатывание средств теплового контроля (СТК). Ориентация ИК-оптики на колесо с его внутренней стороны позволяет исключить возможное ложное срабатывание СТК при экстренном торможении поезда, а также получить приблизительное пред-

ставление о максимальной температуре поверхности катания колеса на основании температуры гребня.

Корректность приведенных в статье результатов моделирования траектории сканирования при тепловом контроле колодочных тормозов и вычисления уровня сигнала, получаемого приемником ИК-излучения, подтверждается сходимостью с результатами мониторинга нагрева колёс и натуральных испытаний экспериментальных комплектов СТК колодочных тормозов, проводившихся ООО «Инфотэкс АТ» при непосредственном участии автора в мае-августе 2018 года на станции Исток Свердловской железной дороги. Максимальная разница в сигналах, полученных экспериментально и расчетным путем с использованием имитационной модели, составила не более 5%. Более подробный анализ полученных экспериментальных результатов, по мнению автора, является предметом дальнейшей дискуссии.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Стратегия развития железнодорожного транспорта в РФ до 2030 года: распоряжение Правительства РФ № 877-р. [Электронный ресурс]. – URL: [www.mintrans.ru/documents/detail.php?ELEMENT\\_ID=13009](http://www.mintrans.ru/documents/detail.php?ELEMENT_ID=13009) (дата обращения: 01.02.2020).
2. Концепция развития средств диагностики подвижного состава на ходу поезда [Электронный ресурс]. – URL: [http://www.pkbcv.ru/nts/docs\\_2019-06-04/00\\_Концепция\\_диагностика\\_3.4.pdf](http://www.pkbcv.ru/nts/docs_2019-06-04/00_Концепция_диагностика_3.4.pdf) (дата обращения: 23.01.2020).
3. Салтыков Д.Н., Шалупина П.И. Моделирование нестационарного температурного поля цельнокатанного колеса при колодочном торможе-

нии // Материалы III Всеросс. научн.-техн. конф. с международным участием «Приборы и методы измерений, контроля качества и диагностики в промышленности и на транспорте» (Омск, 18-19 октября 2018). Омск: Омский гос. университет путей сообщения. С. 34-40.

4. Shalupina P.I., Pavlyukov A.E., Saltykov D.N. Transient Temperatures Patterns of Wheel During Braking // Materials of International Conference Scientific Research of the SCO countries: Synergy and Integration. Reports in English. Part 2. Beijing, PRC. P. 189-197.

- |  |   |
|--|---|
| <p>5. Павлюков А.Э., Шалупина П.И. Моделирование работы системы теплового контроля колёс подвижного состава // Сб. тр. конф. «Проблемы и перспективны развития вагоностроения» (Брянск, 18-19 апреля 2019). Курск, 2019. С. 125-128.</p> <p>6. Миронов А.А. Диагностическая модель теплового контроля колес подвижного состава / А.А.</p>  | <p>Миронов, Д.Н. Салтыков, А.Э. Павлюков, П.И. Шалупина // Транспорт Урала. 2019. №3 (62). С. 36-40. DOI: 10.20291/1815-9400-2019-3-36-40.</p> <p>7. Погорелов Д.Ю. Введение в моделирование динамики систем тел: учеб. пособие. Брянск: Изд-во БГТУ, 1997. 156 с.</p>  |
| <p>1. Strategy of Railway Transport Development in the RF up to 2030: The Decree of the Government of the RF No.877-r [electronic resource]. - URL: <a href="http://www.mintrans.ru/documents/detail.php?ELEMENT_ID=13009">www.mintrans.ru/documents/detail.php?ELEMENT_ID=13009</a> (address date: 01.02.2020).</p> <p>2. Concept of Development of Rolling-Stock Diagnostics Means on Train Run [electronic resource]. - URL: <a href="http://www.pkbcv.ru/nts/docs_2019-06-04/00-Concept_Diagnostics_3.4.pdf">http://www.pkbcv.ru/nts/docs_2019-06-04/00-Concept_Diagnostics_3.4.pdf</a> (address date: 23.01.2020).</p> <p>3. Saltykov D.N., Shalupina P.I. Modeling of non-stationary temperature field of solid-rolled wheel at shoe brake action // Proceedings of the III-th All-Russian Scientif.-Tech. Conf. with Inter. Participation “Devices and Methods of Measure, Quality Control and Diagnostics in Industry and Transport” (Omsk, October 18-19, 2018). Omsk: Omsk State University of Railway Communications. P. 34-40.</p> | <p>4. Shalupina P.I., Pavlyukov A.E., Saltykov D.N. Transient Temperatures Patterns of Wheel During Braking // Materials of International Conference Scientific Research of the SCO countries: Synergy and Integration. Reports in English. Part 2. Beijing, PRC. P. 189-197.</p> <p>5. Pavlyukov A.E., Shalupina P.I. Modeling of wheel thermal control system operation in rolling-stock // Proceedings of the Conf. “Problems and Outlooks of Car Building” (Bryansk, April 18-19, 2019). – Kursk, 2019. P. 125-128.</p> <p>6. Mironov A.A., Saltykov D.N., Pavlyukov A.E., Shalupina P.I. Diagnostic model of wheel thermal control of rolling-stock // Transport of the Urals. 2019. No. 3 (62). P. 36-40. DOI: 10.20291/1815-9400-2019-3-36-40.</p> <p>7. Pogorelov D.Yu. Introduction in Modeling of Solid System Dynamics: manual. Bryansk: BSTU Publishers, 1997. 156 p.</p> |

Ссылка для цитирования:

Шалупин П. И. Исследование процесса теплового контроля колодочных тормозов подвижного состава методом имитационного моделирования // Вестник Брянского государственного технического университета. 2020. № 4. С. 31–42. DOI: 10.30987/1999-8775-2020-4-31-42.

Статья поступила в редакцию 17.02.20.

Рецензент: д.т.н., профессор Брянского государственного технического университета

Кобищанов В.В.,

член редсовета журнала «Вестник БГТУ».

Статья принята к публикации 26. 03. 20.

#### Сведения об авторе:

**Шалупин Павел Игоревич**, аспирант кафедры «Вагоны» Уральского государственного университета путей сообщения, начальник конструкторского

**Shalupin Pavel Igorevich**, Post graduate student of the Dep. “Cars”, Urals State University of Railway Communications, Chief of Design Office for Computa-

бюро расчетов и надежности АО «Брянский автомобильный завод», e-mail: p.shalupina@gmail.com .

tions and Reliability, PC “Bryansk Car Factory”, e-mail: p.shalupina@gmail.com.