

УДК 629.4.077–592:629.463

Э. И. ГАЛАЙ, П. К. РУДОВ, Е. Э. ГАЛАЙ

Белорусский государственный университет транспорта, Гомель, Беларусь

ТЕПЛОВОЙ РАСЧЕТ ФРИКЦИОННЫХ УЗЛОВ ТОРМОЗА ГРУЗОВЫХ ВАГОНОВ

Разработана математическая модель взаимодействия обода колеса и тормозной колодки при торможении поезда, позволяющая оценить температуру контактирующих тел. Определено температурное поле колодки в конце переходного периода, когда тепловой поток начинает уменьшаться, согласно теории теплопроводности для различных периодов торможения от действия параллельных потоков, включаемых последовательно.

Ключевые слова: торможение, композиционная колодка, тормозная сила, тепловой поток.

Торможение вагонов характеризуется значительной тепловой нагруженностью фрикционной пары «колодка – колесо». На участках железных дорог с крутыми затяжными спусками возможно следование приторможенного поезда по уклону с определенной постоянной скоростью. При этом обеспечивается постоянное тепловыделение и соответствующее тепловое нагружение фрикционного узла. Плотность теплового потока, действующего при снижении скорости и увеличении силы нажатия колодок в период запуска тормоза, изменяется по нелинейному закону в связи с нагревом элементов фрикционного узла и одновременным изменением скорости.

Остановочные торможения вагона в составе поезда осуществляются штатным тормозом при повышении силы нажатия колодок до постоянной величины в зависимости от фактической загрузки вагона. Грузовые вагоны оборудуются композиционными тормозными колодками типа ТИИР-300, имеющими повышенный и более равномерный коэффициент трения по сравнению с чугунными. Сила нажатия фиксируется за счет установки воздушораспределителя на средний режим, в некоторых случаях в зимний период устанавливается груженный режим при осевой нагрузке не менее 20 тс [1].

Тепловой режим работы тормозных устройств считается легким, когда объемная температура тормозной колодки и обода колеса находится в пределах 100 °С, средняя температура поверхности трения – 200 °С, а максимальная температура в контакте – 250 °С.

При торможении с максимальной скорости полногрузных вагонов температура в объеме материалов фрикционного узла достигает 250 °С, на поверхности трения – 400 °С, а температура на фактических пятнах контакта – 500 °С. Такой режим считается средним тепловым режимом.

Тяжелый режим работы фрикционных узлов тормоза характерен особыми условиями на фрикционном контакте и в объеме материалов колеса и колодки, когда температура достигает или превышает способность к химическим или структурным преобразованиям и изменению механических свойств. Такие режимы могут быть в критических ситуациях работы подвижного состава.

Условия торможения определяют конечную температуру тормозного узла, причем генерирование теплоты происходит в результате упругой деформации поверхностных слоев колодки и колеса. Тепловая нагруженность зависит от физико-химических свойств материала трущихся тел, она определяется интенсивностью нагрева, который уменьшается по мере снижения скорости. После отпуска тормоза и прекращения действия силы нажатия колодок продолжается перераспределение теплового потока между фронтом и тылом нагреваемых элементов и отдача тепла в окружающую среду.

При торможении вагонов грузового парка сложно установить тепловой режим, соответствующий фактическим условиям, в которых работает фрикционный узел. Необходимо учитывать следующие показатели: тип и осевую нагрузку вагона, скорость в начале торможения, уклон пути, продолжительность торможения, параметры колесной пары (диаметр по кругу катания, толщина обода и гребня колесной пары), материал тормозной колодки и его физико-технические параметры. На конечную температуру тормозного узла существенно влияет изношенность колес и тормозных колодок. Поэтому при разработке математической модели нагрева элементов тормозного узла при торможении следует учитывать различную теплопередачу в атмосферу в зависимости от скорости, загрязненности колес и наружной температуры, а также особенности нагрева изношенных и новых колес. Полученные результаты оцениваются конечной температуре колеса и колодки.

Ученых давно интересовали тепловые процессы во фрикционном контакте «колодка – колесо». Известны работы Л. М. Пыжевича, И. В. Крагельского, А. В. Чичинадзе, Б. Л. Карвацкого. Однако их решения не дают возможности просто оценить температурный перепад, поскольку слишком сложны и разнообразны условия трения фрикционных узлов, отличающиеся материалом и физическими размерами трущихся поверхностей, температурным режимом внешней среды и временем теплового воздействия.

Значительный вклад в разработку теории тепловых процессов в железнодорожных тормозах внес В. Г. Иноземцев. Им решена задача по определению средней температуры на поверхности колеса при допущении, что плотность теплового потока мгновенно возрастает до максимальной величины [2]. Расчеты В. А. Балакина и Э. И. Галая выполнены для крайних условий – при максимальных скоростях, изношенных чугунных колодках и полногрузных вагонах [3, 4].

Все упомянутые исследования проводились при допущении, что тормозная сила изменяется до максимальной величины мгновенно, хотя наполнение тормозных цилиндров сжатым воздухом, возрастание силы нажатия тормозных колодок и, соответственно, тормозной силы происходит в течение некоторого времени. Цель представленной работы – разработка методики теплового расчета элементов тормозной системы, учитывающей неравномерность тепловыделения при переходных режимах движения поезда.

В случае фрикционного торможения генерирование теплоты происходит в результате упругой деформации поверхностных слоев в материале колодки и колеса, а также разрыва адгезионных связей. Интенсивность тепловыделения (плотность теплового потока) на границе фрикционного контакта пропорциональна работе трения

$$q(t) = \varphi_k(t) p_k(t) v(t), \quad (1)$$

где $\varphi_k(t)$ – коэффициент трения фрикционного элемента (в нашем случае тормозной колодки); $p_k(t)$ – давление в контакте «колодка – колесо», кН/м^2 ,

$$p_k(t) = \frac{K(t)}{A_{a1}}, \quad (2)$$

$K(t)$ – сила нажатия тормозной колодки (при запуске тормоза увеличивается от 0 до максимального значения), кН ; A_{a1} – площадь трения тормозной колодки, м^2 ; $v(t)$ – скорость движения вагона, м/с ;

В тормозных расчетах используется параметр $b_T(t)$ – удельная тормозная сила, Н/т , зависящая от скорости v в момент времени t [5]. Через него плотность теплового потока может быть выражена формулой [6]

$$q(t) = \frac{b_T(t) q_0 v(t)}{10^3 n_k A_{a1}}, \quad (3)$$

где q_0 – осевая нагрузка, т ; n_k – число тормозных колодок на колесной паре.

Площадь трения новой неприработанной композиционной колодки $A_{a1} = 0,0255 \text{ м}^2$. При износе колодки номинальная площадь контакта может увеличиваться до $0,029 \text{ м}^2$. Максимальная сила нажатия $K(t)$ при включенном воздухораспределителе на режиме «средний» – $18,1 \text{ кН}$, на режиме «груженный» – 25 кН . Наполнение тормозного цилиндра до достижения в нем 90 % максимального давления на режиме «груженный» происходит примерно за 17–18 с, а полного – за 27–30 с. Для оценки возможной тепловой нагруженности примем параметры режима «груженный».

Допускаемая по условиям сцепления удельная тормозная сила, Н/т ,

$$[b_T] = 10^3 g \psi_k k_c, \quad (4)$$

где g – ускорение свободного падения, $g = 9,81 \text{ м/с}^2$; ψ_k – коэффициент сцепления, который зависит от скорости и осевой нагрузки,

$$\Psi_K = [0,17 - 0,0015(q_0 - 5)]\Psi(v), \quad (5)$$

$\Psi(v)$ – функция скорости, зависящая от динамических свойств подвижного состава,

$$\Psi(v) = \frac{v+81}{2,4v+81}; \quad (6)$$

k_c – коэффициент использования запаса по сцеплению, $k_c = 0,85$ [7].

Фактическая удельная тормозная сила, Н/т

$$b_T(t) = \frac{10^3 K(t)\varphi_K(t)n_K}{q_0}. \quad (7)$$

Коэффициент трения композиционных колодок из материала ТПИР-300

$$\varphi_K(t) = 0,44 \frac{0,1K(t) + 20}{0,4K(t) + 20} \cdot \frac{v(t) + 150}{2v(t) + 150}. \quad (8)$$

Фрикционные тормоза грузовых вагонов в период работы при полной загрузке отличаются достаточно протяженным процессом нарастания тормозной силы после приведения их в действие. Время повышения давления в тормозных цилиндрах в зависимости от режима торможения и места вагона в составе (экстренное или полное служебное) достигает 20–26 с.

Режим рабочего периода при торможении с постоянным давлением в тормозных цилиндрах, постоянной силой прижатия тормозных колодок и уменьшающейся теплопроизводительностью продолжается до полной остановки вагона (поезда). Полное время торможения зависит от начальной скорости, профиля пути и установленного режима торможения.

Поскольку во фрикционном узле применяются композиционные колодки, то при остановочном торможении тепловой поток в колодку составляет около 2–4 % общего теплового потока в зависимости от изношенности фрикционных элементов.

Можно полагать, что при трении композиционной колодки по цельнокатаному колесу толщина нагретого слоя и в колодке, и в колесе значительно меньше их размера, поскольку теплопроводность композиции мала, а размеры колеса при его допустимых износах достаточно велики. Поэтому при начальном развитии тормозной силы и дальнейшем её снижении, связанном с уменьшением скорости, за время протекания процесса трения выделяющееся тепло не успевает достичь противоположной стороны колеса. Теплоотдача с боковых сторон отсутствует, поэтому при анализе нормально текущего процесса торможения можно использовать модель, рассматривающую трение двух неограниченных пластин, а тепловое поле можно описать следующей зависимостью для градиента температур:

$$\frac{\partial \vartheta_i(h_i, t)}{\partial z_i} = 0, \quad (9)$$

где z_i – глубина прогрева элементов фрикционной пары; ϑ_i – температура тормозной колодки и колеса; индекс 1 относится к фрикционному элементу (тормозной колодке), 2 – к контртелу (в данном случае колесу).

В процессе торможения на горизонтальном участке пути происходит увеличение силы прижатия тормозных колодок от нуля до определенной величины (рисунок 1) и постоянное уменьшение скорости движения вагона (рисунок 2), что сказывается на величине теплового потока [8].

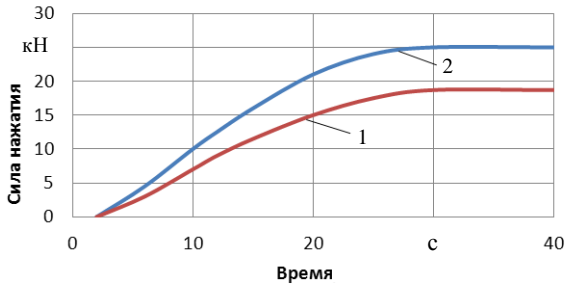


Рисунок 1 – Сила нажатия тормозных колодок при запуске тормоза:
1 – воздухораспределитель (ВР) на среднем режиме; 2 – ВР на груженом режиме

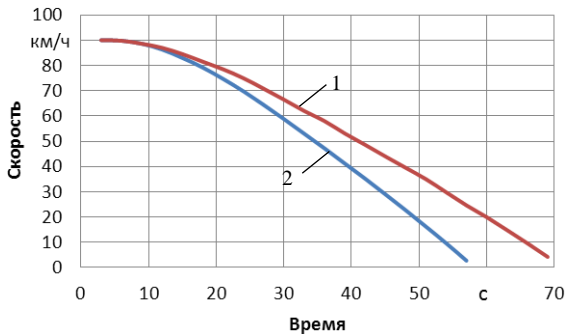


Рисунок 2 – Скоростной режим грузового поезда при остановочном торможении:
1 – ВР на среднем режиме; 2 – ВР на груженом режиме

Таким образом, нагрев можно описать вначале возрастающим, а затем убывающим по параболическому закону тепловым потоком (рисунок 3).

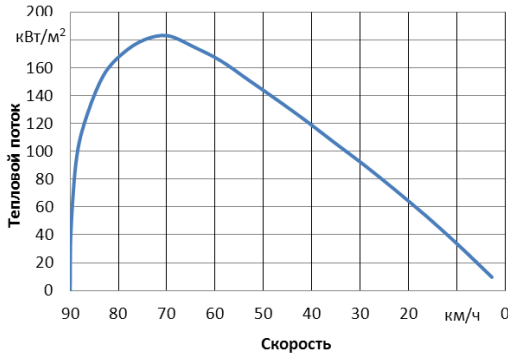


Рисунок 3 – Тепловой поток в композиционную колодку при экстренном торможении грузового вагона и теплопроводности $\lambda = 4$ Вт/м·К

На основе приведенной информации при определении температуры на поверхности трения композиционной колодки воспользуемся допущениями:

- колодка является неограниченной пластиной, теплоизолированной со стороны $z_1 = h_1$ (в теории теплопроводности пластина считается неограниченной при условии тепловой изоляции стороны $z_{1,2} = h_{1,2}$, которая противоположна нагреваемой; тело считается полуограниченным, если толщина теплового слоя в нем значительно меньше размера $z_{1,2} \ll h_{1,2} = \infty$ и теплоизоляцией с его боковых сторон можно пренебречь);

- процесс распространения теплоты в колодке считаем одномерным, полагая, что температурное поле изменяется только по координате z перпендикулярно поверхности трения;

- количество тепла, поступившего в колодку за время торможения, не превышает 4 % общей теплопроизводительности;

- теплофизические свойства колодки и колеса принимаем постоянными;

- отсчет времени при описании теплового процесса начинаем с момента касания колодкой поверхности катания колеса.

Сделанные допущения дают возможность воспользоваться одномерным уравнением теплопроводности Фурье.

$$\frac{\partial \vartheta_i}{\partial t} = a_i \frac{\partial^2 \vartheta_i}{\partial z_i^2}, \quad (10)$$

где a_i – коэффициенты температуропроводности материала тормозной колодки и колеса.

Если $q_1 = m\sqrt{t}$, где $m = \frac{\alpha_p q_0}{\sqrt{t_n}}$, то приращение температуры ϑ на поверхности трения $\eta_1 = 0$

$$\vartheta(\eta_1, Fo_1) - \vartheta_0 = \frac{m\sqrt{a_1}}{\lambda_1} \theta_1(\eta_1, Fo_1). \quad (11)$$

Формула (11) приближенно описывает тепловые процессы при переходном периоде нарастания тормозной силы [4]. На рисунке 4 приведен график зависимости безразмерного комплекса θ_1 от критерия Fo для параметра $\eta_1 = 0$ (на поверхности трения), а на рисунке 5 представлено фактическое изменение от времени теплового потока, направленного в колодку при груженом режиме воздухораспределителя.

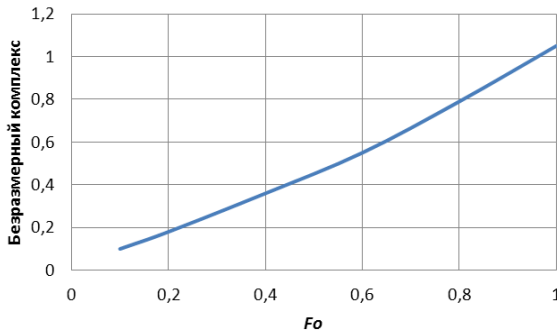


Рисунок 4 – Зависимость безразмерного комплекса θ_1 от критерия Fo для $\eta_1 = 0$ (на поверхности трения)

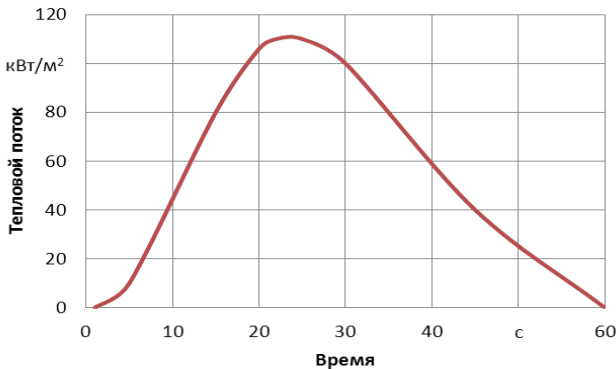


Рисунок 5 – Тепловой поток, направленный в тормозную колодку, на груженом режиме при теплопроводности $\lambda = 2,5$ Вт/м·К

Тепловой поток в колодку к окончанию переходного процесса ($t_n = 24 \dots 27$ с) при скорости 70–65 км/ч составляет на груженом режиме 110–115 кВт/м².

Для определения максимальной температуры поверхности трения композиционной колодки рассмотрим тепловой поток к концу переходного периода 115 кВт/м². Площадь под кривой $q_1(0, t)$ (см. рисунок 5) показывает количество тепла, поступившего в колодку через поверхность трения.

Следует учесть, что в отличие от поверхности обода колеса поверхность трения колодки постоянно остается под воздействием теплового потока.

Для упрощения расчета зависимость теплового потока $q_1(0, t)$, направленного в колодку, разбиваем на n не обязательно равных временных участков, в пределах каждого из которых тепловой поток считаем постоянным. На 1-м участке продолжительностью $0-t_1$ действует тепловой поток, плотность которого определяется выражением

$$q_{1,1} = \frac{1}{t_1} \int_0^{t_1} q_1(t) dt = \text{const} . \quad (12)$$

На 2-м участке продолжительностью $t_2 - t_1$

$$q_{1,2} = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} q_1(t) dt = \text{const} . \quad (13)$$

На i -м участке продолжительностью $t_i - t_{i-1}$

$$q_{1,i} = \frac{1}{t_i - t_{i-1}} \int_{t_{i-1}}^{t_i} q_1(t) dt = \text{const} . \quad (14)$$

На последнем участке продолжительностью $t_n - t_{n-1}$, где сила нажатия тормозной колодки максимальная, а плотность теплового потока в связи с уменьшением скорости начинает снижаться до 0,

$$q_{1,n} = \frac{1}{t_n - t_{n-1}} \int_{t_{n-1}}^{t_n} q_1(t) dt = \text{const} . \quad (15)$$

Поскольку продолжительность каждого из интервалов принимается достаточно малой, то изменение величины $q_1(t)$ происходит по закону, близкому к линейному. Поэтому

$$q_{1,1} = \frac{q_1(t)}{2} ; q_{1,2} = \frac{q_1(t_1) + q_1(t_2)}{2} ; \dots$$

$$q_{1,i} = \frac{q_1(t_{i-1}) + q_1(t_i)}{2} ; \dots q_{1,n} = \frac{q_1(t_{n-1}) + q_1(t_n)}{2} .$$

При определении температурного поля колодки в конце переходного периода t_n , в момент, когда тепловой поток начинает уменьшаться, для случая постоянных потоков можно использовать точное решение теории теплопроводности для определения приращения температуры на поверхности трения композиционной колодки

$$\vartheta_1(0, t) - \vartheta_0 = \frac{\alpha_p q_0}{\lambda} \sqrt{\frac{a_1 t}{\pi}}. \quad (16)$$

Если принято $q_1(0, t)$, то приращение поверхностной температуры

$$\vartheta_1(0, t) - \vartheta_0 = \frac{\alpha_p q_0 h_1}{\lambda_1} \theta'_1(0, Fo) \quad (17)$$

или

$$\vartheta_1(0, Fo_{1,1}) - \vartheta_0 = \frac{q_{1,1} h_1}{\lambda_1} \theta'_1(0, Fo), \quad (18)$$

где $Fo_{1,1} = \frac{a_1 t_1}{h_1^2}$ – число Фурье, характеризующее продолжительность действия теплового потока в период каждого интервала; a_1 – коэффициент температуропроводности материала тормозной колодки, $a_1 = \frac{\lambda_1}{C_1 \rho_1}$; λ_1 – коэффициент теплопроводности композиции для ТИИР-300 – 0,70–0,93 Вт/м·К, для ТИИР-303 – 3,1–3,4 Вт/м·К; C_1 – удельная теплоемкость композиционной колодки, $C_1 = 900$ Вт·с/кг·К; ρ_1 – плотность композиционного материала, $\rho_1 = 2200$ кг/м³.

При $t = t_1, t_2, \dots, t_{n-1}, t_n$ определяем приращение температуры в различных период торможения от действия параллельных потоков, включаемых последовательно.

При $t = t_1, t_2, \dots, t_{n-1}, t_n$ определяем приращение температуры в различных период торможения от действия параллельных потоков, включаемых последовательно.

Складывая результаты действия тепловых потоков разной продолжительности и интенсивности, определим результирующее приращение температуры на поверхности трения композиционной колодки к концу переходного периода t_n . Поскольку время повышения давления в тормозных цилиндрах грузового поезда при максимальной скорости составляет примерно 40–45 % от общего времени торможения, то скорость с 90 км/ч снижается до 60–65 км/ч, а тепловая нагрузка фрикционного узла достигает максимума и начинает уменьшаться.

Возрастающая сила нажатия колодки, особенно в период повышения давления в тормозном цилиндре, практически не влияет на распределение температуры по поверхности трения обода колеса, его прогрев будет незначительным, а величина температуры поверхности при нормальных условиях не превышает 30 °С, хотя зависит от условий торможения и окружающей среды.

Точность расчетов температуры композиционной колодки может быть повышена, если увеличить число элементарных потоков, на которые разбивается поток $q_1(t)$.

Математическая модель фрикционного узла «колодка – колесо» позволяет оценить температуру в зоне контакта тормозной колодки и обода колеса в процессе нарастания тормозной силы и последующего её снижения при уменьшении скорости движения поезда, что дает возможность нахождения предельной силы нажатия колодки на колесо по тепловой нагрузке.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 Правила технического обслуживания тормозного оборудования и управления тормозами железнодорожного подвижного состава : утв. 6–7.05.2014 / Совет по ж.-д. транспорту государств – участников Содружества. – М., 2014. – 268 с.

2 **Иноземцев, В. Г.** Тепловые расчеты при проектировании и эксплуатации тормозов / В. Г. Иноземцев. – М. : Транспорт, 1966. – 40 с.

3 **Галай, Э. И.** Тепловой режим железнодорожного фрикционного тормоза большой мощности в переходном периоде нарастания тормозной силы / Э. И. Галай, В. А. Балакин // Трение и износ. – 1999. – № 2. – С. 137–143.

4 **Галай, Э. И.** Расчет приращения температуры в ободу колеса железнодорожного подвижного состава при торможении / Э. И. Галай, В. А. Балакин // Трение и износ. – 2000. – № 3. – С. 269–275.

5 **Varazhun, I.** Determination of Longitudinal Forces in the Cars Automatic Couplers at Train Electrodynamical Braking / I. Varazhun, A. Shimanovsky, A. Zavarotny // Procedia Engineering. – 2016. – Vol. 134. – P. 415–421.

6 **Галай, Э. И.** Повышение эффективности электропневматических тормозов поезда / Э. И. Галай. – Гомель : БелГУТ, 2002. – 182 с.

7 **Галай, Э. И.** Тормозные системы железнодорожного транспорта. Расчеты пневматических тормозов : учеб. пособие / Э. И. Галай, Е. Э. Галай, П. К. Рудов. – Гомель : БелГУТ, 2014. – 274 с.

8 **Галай, Е. Э.** Нагрев колес грузовых вагонов при запуске тормоза / Е. Э. Галай // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2014. – № 4(44). – С. 130–135.

*E. I. HALAI, P. K. RUDAU, E. E. HALAI
Belarusian State University of Transport, Gomel, Belarus*

THERMAL CALCULATION OF FRICTIONAL BRAKE NODES FOR FREIGHT CARS

There was developed the mathematical model of the wheel rim-brake pad interaction at train braking, allowing to estimate the temperature of the contacting bodies. The temperature field of the pad is determined at the end of the transition period, when the heat flux starts to decrease, according to the theory of thermal conductivity for different periods of braking from the action of parallel streams that are turned on in series.

Получено 15.10.2018