

Анализ факторов, влияющих на коэффициент трения тормозной колодки подвижного состава

А.А. Корсун, П.Ю. Иванов✉, Д.В. Осипов, Д.А. Тихонов

Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация

✉savl.ivanov@mail.ru

Резюме

На сегодняшний день одним из ограничивающих факторов в увеличении участковой и максимальной скоростей движения поездов, которые напрямую влияют на прибыль железнодорожной компании, является тормозная эффективность. Колодка в тормозной системе – первый непосредственный элемент, образующий трение на поверхности катания вращающегося колеса, а тормозная рычажная передача и тормозные цилиндры, служат исключительно для обеспечения прижатия тормозной колодки с требуемой силой. При отсутствии тормозных колодок трение неосуществимо, все остальные устройства предназначены непосредственно для управления силой трения в отношении ее величины и времени действия. В образовании тормозной силы большую роль играет коэффициент трения, который также определяет ее величину. В данной статье рассмотрены различные методы определения коэффициента трения, с помощью которых были выявлены зависимости влияния таких факторов, как сила нажатия колодки на колесо, химический состав колодки, ее форма, степень влажности, износ колодки; начальная продолжительность трения, температуры колодки и поверхности катания колеса на величину коэффициента трения. Данными вопросами занимались и отечественные ученые, например, М. Мецков, В.Ф. Егорченко, и иностранные исследователи, наиболее видным представителем из которых является Гальтон. Несмотря на значимый вклад, внесенный учеными, необходимо продолжать исследования в данной области с целью увеличения скоростей движения подвижного состава и связанных с ними других эксплуатационных показателей, что окажет непосредственное влияние на увеличение прибыли компании ОАО «Российские железные дороги» и позволит снизить различные экономические потери.

Ключевые слова

подвижной состав железных дорог, коэффициент трения колодки о колесо, коэффициент сцепления колеса с рельсом, тормозная эффективность

Для цитирования

Анализ факторов, влияющих на коэффициент трения тормозной колодки подвижного состава / А.А. Корсун, П.Ю. Иванов, Д.В. Осипов, Д.А. Тихонов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2022. – № 2 (74). – С. 91–100. – DOI 10.26731/1813-9108.2022.2(74).91-100.

Информация о статье

поступила в редакцию: 26.04.2022 г.; поступила после рецензирования: 6.06.2022 г.; принята к публикации: 7.06.2022 г.

Analysis of factors affecting the brake pad friction coefficient of rolling stock

A.A. Korsun, P.Yu. Ivanov✉, D.V. Osipov, D.A. Tikhonov

Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

✉savl.ivanov@mail.ru

Abstract

At present one of the limiting factors in increasing the local and maximum train speeds, directly affecting the profit of the railway company, is braking efficiency. The pad in the brake system is the first direct element that forms friction on the rolling surface of the rotating wheel, and the brake lever gear and brake cylinders serve solely to ensure that the brake pad is pressed with the required force. If the brake pads are absent, friction is not feasible and all other devices are designed directly to control the friction force in relation to its magnitude and duration. The coefficient of friction plays an important role in the formation of the braking force, which also determines its magnitude. In this article, various methods for determining the coefficient of friction are considered, consequently revealing the dependences of the influence of such factors as the force of pressing the pad against the wheel, the chemical composition of the pad, the shape of the pad, the degree of moisture of the pad, the wear of the pad, the initial duration of friction, the temperature of the pad and the rolling surface of the wheel on the value of the friction coefficient. These issues were dealt with by both domestic scientists, such as M. Metskov, V.F. Egorchenko, and foreign scientists, with Galton as the most prominent representative. Despite the significant contribution made by the scientists, it is necessary to continue research in this area in order to increase the speed of movement of rolling stock and other related operational indicators, which will directly affect the increase in profits of JSC "Russian Railways" and reduce various economic losses.

Keywords

rolling stock of railways, the coefficient of friction of the pad on the wheel, the coefficient of adhesion of the wheel with the rail, braking efficiency

For citation

Korsun A.A., Ivanov P.Yu., Osipov D.V., Tikhonov D.A. Analiz faktorov, vliyayushchikh na koeffitsient treniya tormoznoi kolodki podvizhnogo sostava [Analysis of factors affecting the brake pad friction coefficient of rolling stock]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2022, no. 2 (74), pp. 91–100.– DOI: 10.26731/1813-9108.2022.2(74).91-100.

Article info

Received: April 26, 2022; revised: June 6, 2022; accepted: June 7, 2022.

Введение

На первый взгляд, природа трения и его законы так просты и общеизвестны, что о них едва можно сказать больше, чем есть в курсах физики или теоретической и прикладной механики. Однако теория трения до сих пор не разработана и при попытках построить различные гипотезы авторы вступают в противоречия между собой.

В статье проведен анализ работ предшественников касательно факторов, влияющих на динамику изменения коэффициента трения. К сожалению, фундаментальные наработки по этому вопросу осуществлялись только в XIX–XX вв. В данном разделе приведены основные тезисы [1].

Исследования Гальтона о влиянии изменения скорости движения подвижного состава на коэффициент трения

На рис. 1 представлена диаграмма, дающая представление о зависимости коэффициентов трения от скорости (значения величин нажатий на тормозную колодку не указаны: Гальтон не обнаружил зависимости коэффициента трения от силы нажатия).

На диаграмме даны три кривые, как максимальные, минимальные и средние коэффициенты трения. Средняя кривая получилась в результате наиболее часто применявшихся режимов торможения. Полученные графики имеют сходство с нынешними, представленными в Правилах тяговых расчетов [2]. На основании зависимости коэффициента трения от скорости

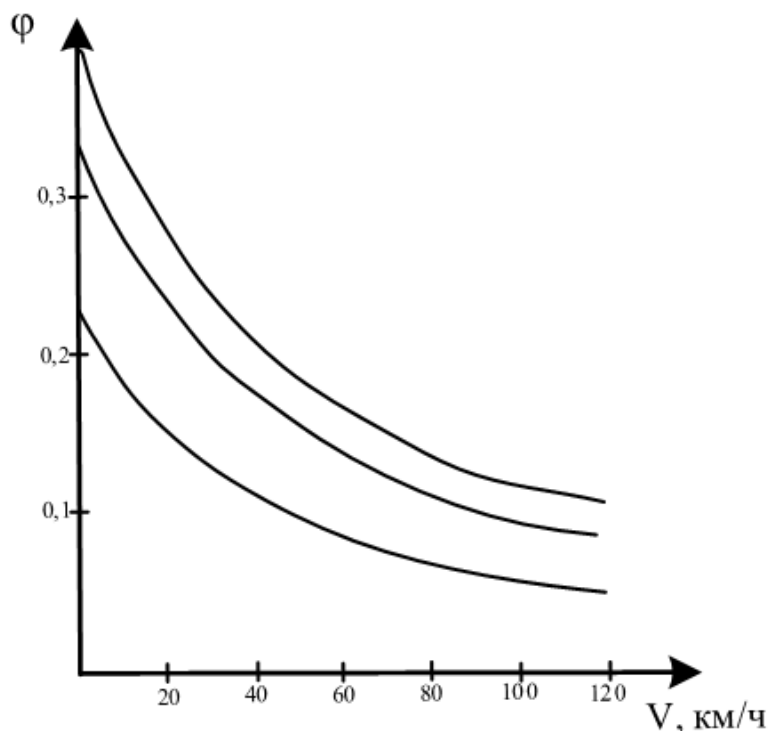


Рис. 1. Зависимость коэффициента трения колодки о колесо от скорости по опытам Гальтона
Fig. 1. Dependence of pad-on-wheel friction coefficient on speed according to Galton's experiments

движения поезда был предложен принцип реализации адаптивного управления тормозным нажатием [3]. На сегодняшний день получена экспериментальным путем формула для определения коэффициента трения с помощью метода бросания подвижной единицы [4].

По поводу своих опытов Гальтон указывает, что все время имелись налицо не поддающиеся учету погрешности (вероятно, вследствие различных величин нажатий на колодки). Ввиду этого он ограничился установлением фактов, полученных из опытов, и воздержался от вывода законов трения, выразив уверенность, что вопрос о трении в будущем получит более полное освещение.

Исследования М. Мецкова

На рис. 2 изображены кривые коэффициента трения в зависимости от скорости движения поезда и силы нажатия колодки на колесо по опытам М. Мецкова, которые производились с моделью в одну треть от реальной тор-

можной колодки.

Вопрос о зависимости коэффициента трения от величины нажатия возник в связи с появлением потребности тормозить скоростные поезда при повышенных нажатиях тормозных колодок на колеса с последующим автоматическим переходом на понижение нажатия при низких скоростях. Интерес в этом отношении вызвало также применение груженого и порожнего режимов торможения в товарных поездах.

Испытание такой модели не могло дать близких к действительности данных, однако позволило установить ряд важных зависимостей коэффициента трения от скорости, величины нажатия, температуры и твердости материала.

Для того чтобы кривыми можно было пользоваться практически, их ординаты уменьшают на 33 % с целью приближения их величины к реальным по данным Научно-исследовательского института железнодорож-

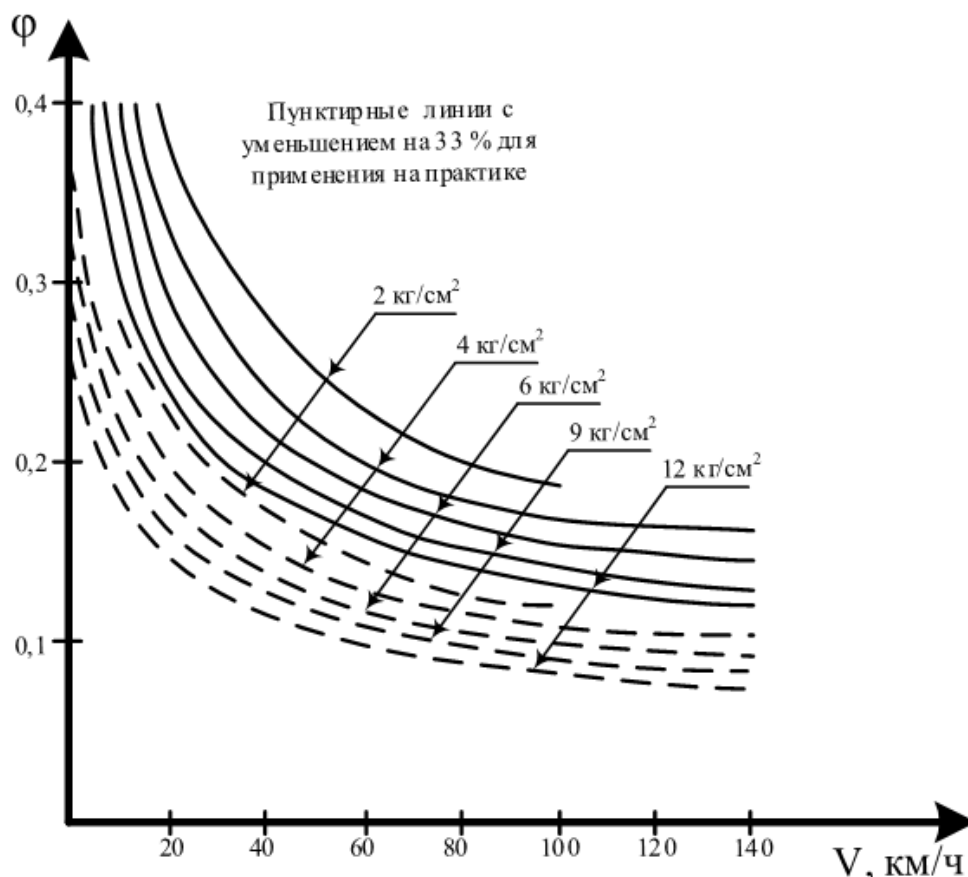


Рис. 2. Коэффициент трения тормозных колодок в зависимости от скорости движения поезда и силы нажатия колодок на колесо по опытам М. Мецкова

Fig. 2. Friction coefficients of pads depending on the train speed and the wheel pressing force according to M. Metzkov's experiments

ного транспорта (НИИЖТ). Кривые М. Мецкова с таким уменьшением ординат показаны на рис. 2 пунктиром.

Кривые М. Мецкова позволили лабораторно проверить, как изменяется коэффициент трения и как ведет себя тормозная колодка при высоких скоростях (порядка 140–160 км/ч). В этом состоит их положительная сторона. Недостаток же заключается в том, что нажатия на колодку не превосходили 12 кг/см^2 , в то время как при высоких скоростях требуется доводить их до значительно большей величины, например, до 25 кг/см^2 .

Исследования Иллинойского университета в области трибологии

Опыты лаборатории, описанные в бюллетене № 257 Иллинойского университета, по своей методике и программе отличаются от представленных. Полученные кривые для малых нажатий колодки на колесо немного отличаются от кривых аналогичных опытов Гальтона, М. Мецкова и др.

Большой интерес представляют три кри-

вые (рис. 4), изображающие зависимость коэффициента трения от больших нажатий и высоких скоростей, когда мощность работы трения доходит до 12 000 и даже до 17 000 кгс/сек при нажатии 9 000 кг на колодку и при скорости 160 км/ч. Коэффициенты трения при последних условиях показаны на диаграмме самой жирной линией. Количество тепла, выделявшегося при таком трении, доходило до 125,60–164,47 Дж, причем тормозная колодка настолько раскалялась, что во время опытов от нее постоянно отрывались расплавленные частицы металла; поверхность трения свидетельствовала о начале разрушения материала из-за высокой температуры и большого нажатия.

На бандажах при таком напряжении работы тормозной колодки появлялись поперечные трещины длиной от 10 до 75 мм, не выходящие, однако, за пределы поверхности трения. Глубина их составляла от 3 до 5 мм. Трещины обычно проявлялись после окончания опыта во время остывания колеса, этот процесс сопровождался громким звенящим звуком. На поверхности трения бандажа обнаруживался также местами

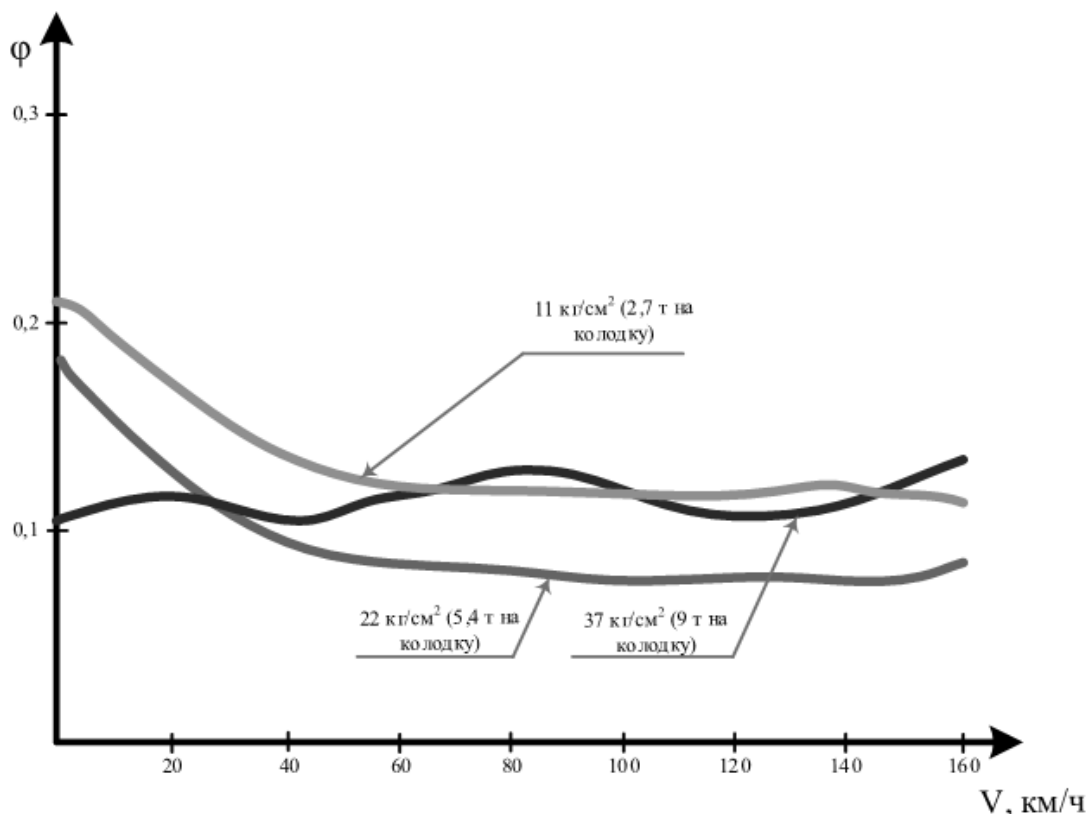


Рис. 3. Зависимости коэффициента трения от скорости движения при больших нажатиях по опытам Иллинойского университета

Fig. 3. Dependence of the friction coefficient on the speed of the train at high pressure according the Illinois University experiments

крепко приваренный металл колодки.

При нажатии на колодку силой больше 6 000 кг (30 кг/см²) получаются совсем иные зависимости коэффициентов трения от скорости, чем те, которые были ранее рассмотрены при меньших нажатиях. Оказывается, что в этих случаях, как это видно из диаграммы, коэффициенты трения иногда бывают выше, чем при меньших нажатиях, например, при 2 700 кг (11 кг/см²). В общем коэффициент трения при нажатиях от 6 000 до 9 000 кг, колеблясь по величине в небольших пределах, остается почти постоянным при всех скоростях от 160 км/ч до 0.

Такие резкие изменения законов трения при больших давлениях и высоких скоростях объясняются началом текучести и изменения поведения материала колодки. На рис. 4 показано состояние нескольких колодок после опытов с большим нажатием (до 9 000 кг) и при больших скоростях. Почти у всех колодок концы разрушены. Это разрушение наступало преимущественно тогда, когда колодка изнашивалась до минимальной допускаемой величины.

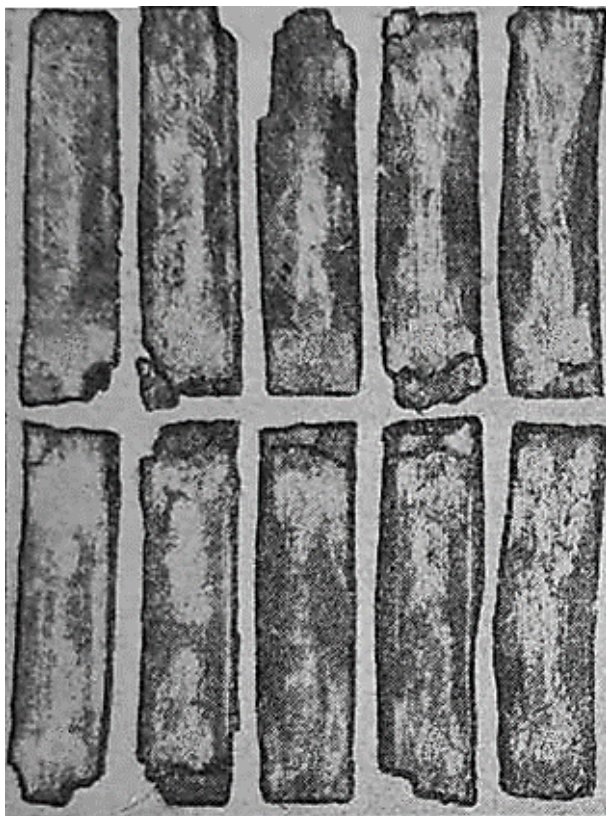


Рис. 4. Состояние тормозных колодок после опытов
Fig. 4. The post experiment condition of the pads

Так как вопрос о большом нажатии тормозной колодки при высокой скорости имеет важное значение при проектировании тормозов для скоростных поездов, то не лишним будет привести здесь следующие выдержки из выводов тормозной лаборатории им. Сарджента:

1. Трещины на поверхности трения бандажа или обода стального колеса имелись тогда, когда нажатие тормозной колодки составляло 37 кг/см² при высоких скоростях 140–160 км/ч, а «волчки» от приваренного материала колодки обнаруживались, когда нажатия на колодку при тех же скоростях достигали 39–40 кг/см². Для того чтобы избежать того и другого, нажатия должны быть такой величины, чтобы при заданной наивысшей скорости не превышалась работа трения 15 000 кгм/сек.

2. Чтобы износ тормозной колодки был более или менее нормальным, последняя должна нагружаться работой трения, не превышающей эффекта в 12 000 кгм/сек.

3. Для получения достаточно устойчивой по износу и прочной чугунной тормозной колодки последняя должна быть армирована стальной арматурой в виде решетки внутри и пластины на спинке. Эта арматура должна быть предварительно облужена, а расплавленный чугун перегрет для получения прочной спайки и монолитности.

4. Твердость колодки по Бринеллю рекомендуется доводить от 220 до 240 при твердости обода колеса 240–300 ед.

Коэффициент трения тормозных колодок по опытам Научно – исследовательского института железнодорожного транспорта

В 1936 г. на опытном кольце НИИЖТ профессор В.Ф. Егорченко производил опыты с тормозными колодками разных типов на товарных четырехосных и двухосных вагонах.

Кривизна рельсового пути не влияла на результаты опытов, так как радиус опытного кольца был сравнительно большой – около 950 м; дополнительное сопротивление от кривой было определено опытным путем и учтено при выводе формулы коэффициентов трения колодок.

Из этих опытов был получен большой материал и сделаны важные выводы:

1. Тормозной путь поезда в значительной степени зависит от качества материала и размеров тормозных колодок.

2. Как общее правило, повышение твердости чугуна колодки сопровождается уменьшением коэффициента трения и снижением износа.

3. Увеличение поверхности соприкосновения колодки с колесом ведет к повышению коэффициента трения и уменьшению износа.

4. Чугунные колеса повышают коэффициент трения тормозных колодок на малых скоростях и понижают при больших.

5. Снабжение колодки гребневым охватом (охватывающим гребень колеса) повышает коэффициент трения колодки, незначительно (2–5 %).

В этих опытах определялась зависимость коэффициента трения от скорости и нажатия 18 типов колодок для 35 комбинаций и трех типов колес.

Полученные в результате опытов кривые подтверждают характер зависимости коэффициентов трения от скорости и нажатия, полученных ранее из американских и немецких опытов. Однако более близкое сходство они имеют с кривыми Гальтона (см. рис.1), в особенности при малых нажатиях колодок. Объясняется это тем, что испытания производились на рельсовых путях в натуре.

Если произвести нажатие тормозной колодки на колесо при поддержании постоянной

скорости, то коэффициент трения некоторое время от начала торможения будут уменьшаться.

На рис. 5 показана зависимость по опытам Гальтона величины коэффициента трения от продолжительности торможения в течение первых 10–20 сек при пяти скоростях: 32, 43, 60, 76 и 97 км/ч. Из этой диаграммы видно, что уменьшение коэффициента трения тем продолжительнее и больше, чем меньше скорость. Например, при скорости 32 км/ч коэффициент трения падает в течение первых 20 сек на величину 0,08, а при скорости 97 км/ч в течение первых 10 сек всего на 0,03.

На рис. 6 изображена диаграмма (из опытов Гальтона), из которой видно, что, несмотря на уменьшающуюся скорость, коэффициент трения в течение 24 сек не повышается, как это должно быть по закону зависимости от скорости, а остается одинаковым и понижается. Это объясняется тем, что после начатого торможения коэффициент трения имеет некоторое стремление уменьшаться.

Закон зависимости коэффициента трения от продолжительности торможения обнаруживается также и в опытах М. Мецкова. Однако в его отчете нет прямых указаний на это.

Закон зависимости коэффициента трения от продолжительности трения, относящийся, правда, только к началу всякого торможения,

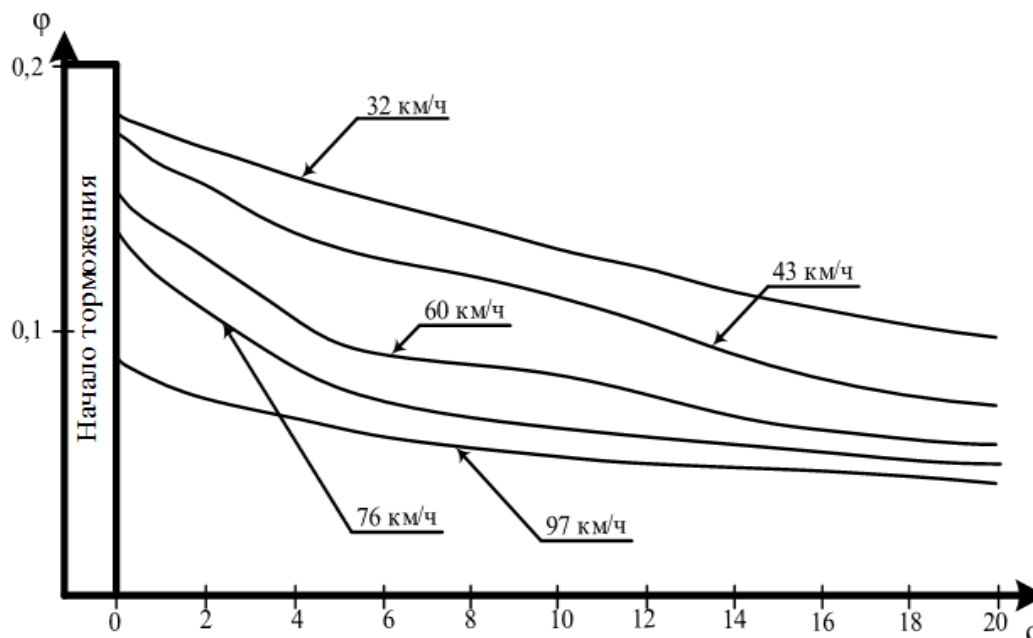


Рис. 5. Зависимость коэффициента трения от начальной продолжительности трения при постоянных скорости и силе нажатия колодки на колесо

Fig. 5. Dependence of the friction coefficient on the initial duration of friction under constant speed and pad-on-wheel pressure force

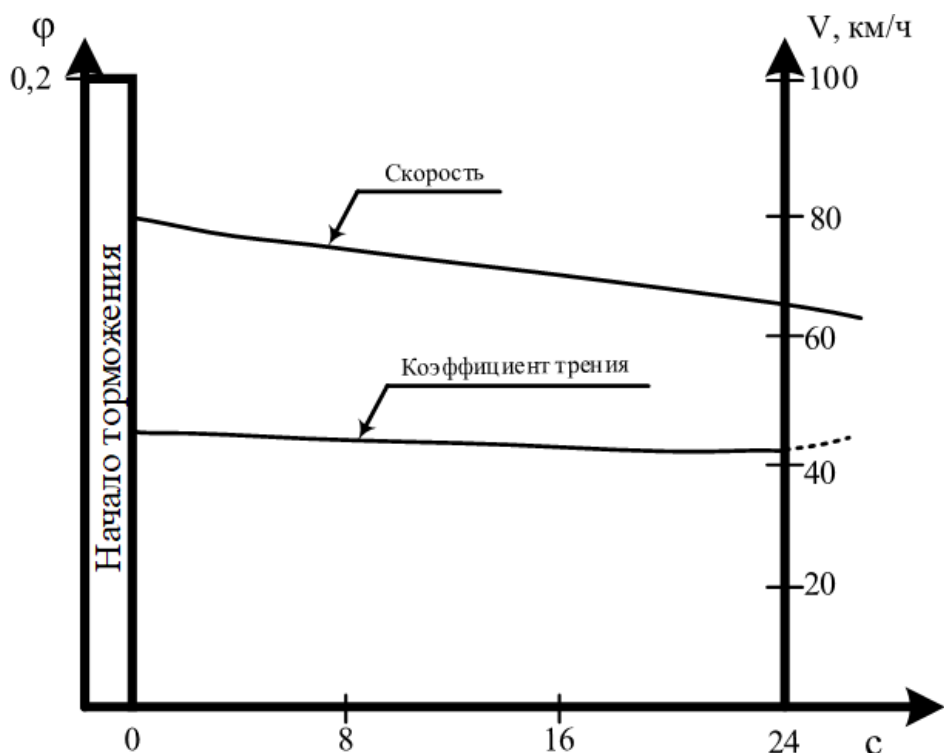


Рис. 6. Начальное падение коэффициента трения, которое компенсируется его повышением вследствие замедления скорости

Fig. 6. Initial friction coefficient decrease compensated by its increase due to deceleration

несколько усложняет вопрос о законе зависимости силы трения от скорости и силы нажатия на колодку.

Зависимость коэффициента трения от нагрева тормозной колодки. При исследовании влияния температуры на коэффициент трения в опытах М. Мецкова было установлено, что коэффициент трения с повышением температуры не понижается, а как будто слегка увеличивается. Проведены исследования влияния температуры на динамику изменения коэффициента трения, которые были изложены в [5, 6].

Опыты в тормозной лаборатории при Иллинойском университете подтверждают эти данные полностью. Помещаем выдержку из отчета по этим опытам: «Среди железнодорожников широко распространено мнение, что при продолжительном торможении происходит понижение тормозных качеств колодки, причем предполагается, что коэффициент трения значительно падает вследствие нагревания колодки и колеса. Опыты этой серии были предприняты для проверки правильности этого мнения. Можно установить, что результаты опытов не подтвердили этого мнения» (при 15-минутных

непрерывных торможениях при разных скоростях и нажатиях).

При этих опытах сравнивались коэффициенты трения кратковременных торможений – от 0,5 до 1,0 мин. с коэффициентами трения при 15-минутном непрерывном торможении.

Разница в коэффициенте в сторону повышения при 15-минутных торможениях, при которых происходил весьма большой нагрев колодок до темно-красного каления, была в среднем около 12 %.

Таким образом, результаты опытов приводят к заключению, что нагрев колодок повышает коэффициент трения. И в этом, как указывается в отчете, нет ничего удивительного, так как из практики известно, что при более мягком материале, хотя бы одной из трущихся поверхностей, при сухом трении коэффициент его больше, чем при твердом материале. Так как длительное трение, нагревая тормозные колодки до высокой температуры, размягчает их, то, естественно, коэффициент трения их должен соответственно повышаться.

Наконец, по опытам Центрального исследовательского отделения подвижного состава Национального общества французских желез-

Изменение коэффициентов трения в процентах при влажных тормозных колодках по сравнению с сухими
Percent change in friction coefficients for damp brake pads as compared to dry ones

Удельное давление в кг/см ² Specific pressure kg/cm ²	V = 25 км/ч	V = 60 км/ч	V = 100 км/ч
	Изменение коэффициента трения, % Change in friction coefficient, %		
5	-14,1	-15,6	+15,2
6	-18,7	-11,8	+24,2
12	-16,9	+3,2	+22,7

ных дорог в 1937 г. комиссия констатирует, что «при испытании тормозов на затяжных уклонах обнаружена независимость коэффициента трения от температуры в измерявшихся пределах от 100 до 700° при помощи термоэлектрических пар, так что при езде по длинному уклону нет основания опасаться ослабления тормозной силы по причине нагрева колодок».

На текущий момент зарубежными учеными активно проводятся исследования вопроса влияния температуры на трибологические свойства взаимодействующих тел, так в [7] рассматривается воздействие термопластических деформаций в процессе торможения. В [7, 8] говорится о влиянии появления третьего тела в области трения колодки и колеса вследствие отделяемых в ходе износа частиц. Но подавляющее большинство авторов исследуют температурную динамику в системе «колодка – колесо» или «колодка – диск» [9–13], чаще всего ее исследуют как фактор, влияющий на разрушение материалов. В работе [14, 15] изучается непосредственное влияние температуры колодки на силу сцепления, для дискового тормоза рассматривается температурное распределение на диске. В работе [16] приводятся экспериментальные исследования процесса торможения грузовых поездов Итальянских железных дорог для различных видов тормозных колодок. Применение колодочных тормозов влияет на температуру круга катания колес. Изменение температуры круга катания также оказывает влияние на силу сцепления колеса с рельсом. Исследованию этого вопроса посвящен ряд работ [17–20].

Влияние влажности на величину коэффициента трения

Инженером М. Мецковым были проделаны опыты, определяющие влияние влажности на коэффициент трения между тормозными колодками и колесами при различных удельных давлениях и скоростях. Во время опытов коле-

со трения искусственно смачивалось водой. Результаты этих опытов в виде средних величин даны в табл., в которой цифры с минусами означают число процентов уменьшения коэффициента трения по сравнению с сухими колодками, а с плюсами – его увеличение. Например, при $x = 6 \text{ кг/см}^2$ и $V = 25 \text{ км/ч}$ коэффициент трения при мокрых колодках на 18,7 % меньше, чем при сухих.

Заключение

Коэффициент трения зависит от следующих факторов:

- силы нажатия колодки на колесо;
- химического состава колодки;
- формы колодки;
- степени влажности колодки;
- износа колодки;
- начальной продолжительности трения;
- температуры колодки и поверхности катания колеса.

Среди вышеуказанных факторов стоит уделить особое внимание влиянию температуры на динамику изменения коэффициента трения. Этот вопрос является особенно актуальным при торможениях подвижного состава на затяжных спусках. Исследования в данной области проводились в недостаточном количестве, а имеющиеся данные не создают единого понимания этого вопроса и требуют проведения дополнительных опытов и систематизации.

В работе [21] были рассмотрены актуальные вопросы, связанные с ремонтом подвижного состава и функционированием тормозного оборудования, в том числе в сложных эксплуатационных условиях. Нами был разработан стенд для исследования динамики изменения коэффициента трения в зависимости от температуры, который проходит завершающий этап сборки и отладки. В дальнейших статьях будет описана конструкция стенда, принцип замера коэффициента трения и тормозной силы. Конечным результатом исследований должна

статья уточненная формула расчета коэффициента трения температурным коэффициентом, что позволит оптимизировать алгоритмы управления тормозной системой поезда, а также исключить значительную погрешность в тормозных расчетах.

Список литературы

1. Карвацкий Б.Л. Общая теория автотормозов. М. : Трансжелдориздат, 1947. 300 с.
2. Об утверждении правил тяговых расчетов для поездной работы : распоряжение ОАО «РЖД» 867р от 12.05.2016 : в ред. 02.02.2018. М. : ОАО «РЖД», 2016. 515 с.
3. Иванов П.Ю., Корсун А.А., Емельянов Д.О. Существующие способы управления тормозным нажатием с повышенной эффективностью // Научные междисциплинарные исследования : сб. ст. XV Междунар. науч.-практ. конф. М. : КДУ ; Добросвет, 2021. С. 28–36.
4. Исследование работы стабилизатора крана машиниста / П.Ю. Иванов, Е. Ю. Дульский, Н.И. Мануилов и др. // Инновационные проекты и технологии машиностроительных производств : материалы II Всерос. науч.-техн. конф. Омск : ОмГУПС, 2017. С. 62–69.
5. Исследование температуры тормозных колодок с разной степенью износа в процессе фрикционного торможения / П.Ю. Иванов, А. М. Худоногов, Е. Ю. Дульский и др. // Вестн. Урал. гос. ун-та путей сообщ. 2020. № 3 (47). С. 27–34. DOI 10.20291/2079-0392-2020-3-27-34.
6. Иванов П.Ю., Хамнаева А.А., Худоногов А.М. Снижение энергопотребления электровоза при управлении пневматическими тормозами грузового поезда // Разработка и эксплуатация электротехнических комплексов и систем энергетики и наземного транспорта : материалы III междунар. науч.-практ. конф. Омск, 06 декабря 2018 года. Омск : ОмГУПС, 2018. С. 143–151.
7. Temperature and thermoelastic instability at tread braking using cast iron friction material / S. Abbasia, Sh. Teimourimaneshb, T. Vernerssonb et al. // Wear. 2013. Vol. 314. P. 171–180.
8. Hamdaoui A., Jaddi El.H. Effects of the brake shoe friction material on the railway wheel damage // MATEC Web of Conferences. 2018. Vol. 149. P. 1–4.
9. Evtushenko O.O., Ivanyk E.H., Horbachova N.V. Analytic methods for thermal calculation of brakes (review) // Materials Science. 2000. Vol. 36. №. 6. P. 857–862.
10. Petersson M. Two-dimensional finite element simulation of the thermal problem at railway block braking // Mechanical Engineering Science. 2015. Vol. 216. P. 259–273.
11. The effect of braking energy on the fatigue crack propagation in railway brake discs / Z. Li, J. Han, Z. Yang // Engineering Failure Analysis. 2014. Vol. 44. P. 272–284.
12. A methodology to predict thermomechanical cracking of railway wheel treads: from experiments to numerical predictions / A. Esmaeili, M.S. Walia, K. Handa // International Journal of Fatigue. 2017. Vol. 105. P. 71–85.
13. Wasilewski P. Frictional heating in railway brakes: a review of numerical models // Archives of Computational Methods in Engineering. 2020. Vol. 58. P. 45–58.
14. Balotin J.G., Neis P.D., Ferreira N.F. Analysis of the influence of temperature on the friction coefficient of friction materials // ABCM Symposium Series in Mechatronics. 2010. Vol. 4. P. 898–906.
15. Talati F., Jalalifar S. Analysis of heat conduction in a disk brake system // Heat Mass Transfer. 2009. Vol. 45. P. 1047–1059.
16. Cantone L., Ottati A., Modelling of friction coefficient for shoes type LL by means of polynomial fitting // The Open Transportation Journal. 2018. Vol. 12. P. 114–127.
17. 3D dynamic model of the railway wagon to obtain the wheel–rail forces under track irregularities / N. Meysam, A.Z. Jabbar, Sh. Morad // Multi-Bodies Dynamics. 2015. Vol. 252. P. 1–13.
18. Wei Y.P., Wu Y.P. Thermal and mechanical characteristics of contact friction pair based on 3-D wheel/rail-foundation contact vertical system // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 657. P. 1–9.
19. Polach O. Influence of locomotive tractive effort on the forces between wheel and rail // Vehicle System Dynamics Supplement. 2001. Vol. 35. P. 7–22.
20. Tudor A., Radulescu C., Petre I. Thermal effect of the brake shoes friction on the wheel/rail contact // Tribology in industry. 2003. Vol. 25. P. 27–32.
21. Дульский Е.Ю. Энергоаудит безразборной технологии ремонта // Мир транспорта. 2012. Т. 10. № 3 (41). С. 168–171.

References

1. Karvatskii B.L. Obshchaya teoriya avtotormozov [The general theory of auto brakes]. Moscow: Transzheldorizdat Publ., 1947. 300 p.
2. Rasporyazhenie ОАО «RZhD» 867r ot 12.05.2016 (red. 02.02.2018) «Ob utverzhdenii pravil tyagovykh raschetov dlya poezdnoi raboty» [Order of JSC «Russian Railways» 867r dated 12.05.2016 (ed. 02.02.2018) «On approval of the rules of traction calculations for train work»]. Moscow: RZhD Publ., 2016. 515 p.
3. Ivanov P.Yu., Korsun A.A., Yemelyanov D.O. Sushchestvuyushchie sposoby upravleniya tormoznym nazhatiem s povyshennoi effektivnost'yu [Existing methods of brake pressure control with increased efficiency]. *Sbornik statei XV Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Nauchnye mezhdistsiplinarnye issledovaniya»* [Proceedings of the XV International Scientific and Practical Conference «Scientific interdisciplinary research»]. Saratov, 2021, pp. 28–36.
4. Ivanov P.Yu., Dul'skii E.Yu., Manuilov N.I., Khudonogov A.M. Issledovanie raboty stabilizatora kрана машиниста [Investigation of the operation of the crane operator stabilizer]. *Materialy II vsrossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii «Inno-*

vatsionnye proekty i tekhnologii mashinostroitel'nykh proizvodstv» [Proceedings of the II All-Russian Scientific and practical Conference «Innovative projects and technologies of machine-building industries»]. Omsk, 2017, pp. 62–69.

5. Ivanov P.Yu., Khudonogov A.M., Dul'skii E.Yu., Korsun A.A., Treskin S.V. Issledovanie temperatury tormoznykh kodok s raznoi stepen'yu iznosa v protsesse friktsionnogo tormozheniya [Investigation of the temperature of brake pads with different degrees of wear during friction braking]. *Vestnik Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta putei soobshcheniya* [Bulletin of the Ural State University of Railways], 2020, no. 3(47), pp. 27–34. DOI 10.20291/2079-0392-2020-3-27-34.

6. Ivanov P.Yu., Khamnaeva A.A., Khudonogov A.M. Snizhenie energopotrebleniya elektrovoza pri upravlenii pnevmaticheskimi tormozami gruzovogo poezda [Reduction of electric locomotive energy consumption when controlling pneumatic brakes of a freight train]. *Materialy III mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Razrabotka i ekspluatatsiya elektrotekhnicheskikh kompleksov i sistem energetiki i nazemnogo transporta»* [Proceedings of the III International scientific and practical conference «Development and operation of electrotechnical complexes and systems of power engineering and ground transport»]. Omsk, 2018, pp. 143–151.

7. Temperature and thermoelastic instability at tread braking using cast iron friction material / S. Abbasia, Sh. Teimourimaneshb, T. Vernersson et al. // *Wear*. 2013. Vol. 314. Pp. 171–180.

8. Hamdaoui A., Jaddi El.H. Effects of the brake shoe friction material on the railway wheel damage // *MATEC Web of Conferences*. 2018. Vol. 149. Pp. 1–4.

9. Evtushenko O.O., Ivanyk E.H., Horbachova N.V. Analytic methods for thermal calculation of brakes (review) // *Materials Science*. 2000. Vol. 36. No. 6. Pp. 857–862.

10. Petersson M. Two-dimensional finite element simulation of the thermal problem at railway block braking // *Mechanical Engineering Science*. 2015. Vol. 216. Pp. 259–273.

11. The effect of braking energy on the fatigue crack propagation in railway brake discs / Z. Li, J. Han, Z. Yang // *Engineering Failure Analysis*. 2014. Vol. 44. Pp. 272–284.

12. A methodology to predict thermomechanical cracking of railway wheel treads: from experiments to numerical predictions / A. Esmaeili, M.S. Walia, K. Handa // *International Journal of Fatigue*. 2017. Vol. 105. Pp. 71–85.

13. Wasilewski P. Frictional heating in railway brakes: a review of numerical models // *Archives of Computational Methods in Engineering*. 2020. Vol. 58. Pp. 45–58.

14. Balotin J.G., Neis P.D., Ferreira N.F. Analysis of the influence of temperature on the friction coefficient of friction materials // *ABCM Symposium Series in Mechatronics*. 2010. Vol. 4. Pp. 898–906.

15. Talati F., Jalalifar S. Analysis of heat conduction in a disk brake system // *Heat Mass Transfer*. 2009. Vol. 45. P. 1047–1059.

16. Cantone L., Ottati A., Modelling of friction coefficient for shoes type LL by means of polynomial fitting // *The Open Transportation Journal*. 2018. Vol. 12. Pp. 114–127.

17. 3D dynamic model of the railway wagon to obtain the wheel–rail forces under track irregularities / N. Meysam, A.Z. Jabbar, Sh. Morad // *Multi-Bodies Dynamics*. 2015. Vol. 252. Pp. 1–13.

18. Wei Y.P., Wu Y.P. Thermal and mechanical characteristics of contact friction pair based on 3-D wheel/rail-foundation contact vertical system // *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2019. Vol. 657. Pp. 1–9.

19. Polach O. Influence of locomotive tractive effort on the forces between wheel and rail // *Vehicle System Dynamics Supplement*. 2001. Vol. 35. Pp. 7–22.

20. Tudor A., Radulescu C., Petre I. Thermal effect of the brake shoes friction on the wheel/rail contact // *Tribology in industry*. 2003. Vol. 25. Pp. 27–32.

21. Dul'skii E. Yu. Energoaudit bezrazbornoi tekhnologii remonta [Energy audit of non-selective repair technology]. *Mir transporta* [World of transport], 2012, vol. 10, no. 3(41), pp. 168–171.

Информация об авторах

Корсун Антон Александрович, аспирант кафедры электроподвижного состава, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: korsunanton1998@gmail.com.

Иванов Павел Юрьевич, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры электроподвижного состава, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: savl.ivanov@mail.ru.

Осипов Дмитрий Валерьевич, кафедра электроподвижного состава, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: osipovdnor@mail.ru.

Тихонов Дмитрий Андреевич, кафедра электроподвижного состава, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: sonexperia.hd@gmail.com.

Information about the authors

Anton A. Korsun, Ph.D. Student of the Department of Electric Rolling Stock, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: korsunanton1998@gmail.com.

Pavel Yu. Ivanov, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Electric Rolling Stock, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: savl.ivanov@mail.ru.

Dmitrii V. Osipov, Department of the Electric Rolling Stock, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: osipovdnor@mail.ru.

Dmitrii A. Tikhonov, Department of the Electric Rolling Stock, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: sonexperia.hd@gmail.com.