

Научная статья
УДК 629.3.017
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-1-114-124>
EDN: SOGIJI



МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТОВ ТРЕНИЯ НЕКОТОРЫХ АВТОМОБИЛЬНЫХ ТОРМОЗНЫХ КОЛОДОК

Н. В. Хольшев*, А. Ю. Конев, С. М. Ведищев, А. В. Прохоров

Тамбовский государственный технический университет
г. Тамбов, Россия

xhb@live.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8468-6593>,
konev.a1998@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3723-1120>,
serg666_65@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3759-9809>,
prohorov.av@mail.tstu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0635-6193>

*ответственный автор

АННОТАЦИЯ

Введение. Безопасность дорожного движения во многом определяется техническим состоянием транспортного средства, а особенно системы управления. К ним относится и тормозная система. Для повышения ее эффективности сейчас широко применяются различные вспомогательные электронные системы. Эти системы осуществляют управление автомобилем через колесные тормозные механизмы. Составляющим элементом колесного тормозного механизма фрикционного типа являются тормозные колодки. От их качества зависит эффективность работы тормозной системы автомобиля вне зависимости от наличия вспомогательных электронных систем. Применение тормозных колодок с большим разбросом значений коэффициентов трения может оказать существенное влияние на эффективность торможения.

Материалы и методы. Для проведения экспериментальных исследований была разработана методика их проведения и обработки экспериментальных данных, а также изготовлена лабораторная установка. В качестве приборной составляющей стенда для преобразования механических перемещений в электронный сигнал использовали аналого-цифровой преобразователь ArduinoUno R3.

Результаты. В соответствии с предложенной методикой были выполнены испытания четырех пар тормозных колодок. В результате обработки экспериментальных данных установлено, что разность значений коэффициентов трения тормозных колодок может вызвать различие в величине тормозных сил на колесах от 8 до 19%.

Обсуждение и заключение. Разность коэффициентов трения тормозных колодок оказывает существенное влияние на величину тормозных сил и устойчивость автомобиля при торможении. Одной из причин этого может являться низкое качество материала колодок или нарушение условий эксплуатации. Предложенная усовершенствованная методика определения коэффициентов трения скольжения позволяет получать более точные значения за счет применения аналого-цифрового преобразователя, уменьшая влияние точности измерительных инструментов и человеческого фактора на результат измерения.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: тормозной механизм, тормозные колодки, коэффициент трения, курсовая устойчивость, тормозная сила, автомобиль

БЛАГОДАРНОСТИ: коллектив авторов выражает благодарность рецензентам, работавшим над данной статьей, за ценные замечания по доработке статьи.

Статья поступила в редакцию 04.10.2022; одобрена после рецензирования 31.10.2022; принята к публикации 20.02.2023.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

Для цитирования: Хольшев Н. В., Конев А. Ю., Ведищев С. М., Прохоров А. В. Методика и результаты экспериментального определения коэффициентов трения некоторых автомобильных тормозных колодок // Вестник СибАДИ. 2023. Т. 20, № 1 (89). С. 114-124. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-1-114-124>

© Хольшев Н. В., Конев А. Ю., Ведищев С. М., Прохоров А. В., 2023



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Origin article
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-1-114-124>
EDN: SOGIJI

METHOD AND RESULTS OF EXPERIMENTAL DETERMINATION OF FRICTION COEFFICIENTS OF SOME AUTOMOBILE BRAKE SHOE

Nikolai V. Holshev*, Andrei Y. Konev, Sergei M. Vedishchev, Aleksei V. Prokhorov

Tambov State Technical University

Tambov, Russia

*xhb@live.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8468-6593>,
konev.a1998@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3723-1120>,
serg666_65@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3759-9809>,
prohorov.av@mail.tstu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0635-6193>*

**corresponding author*

ABSTRACT

Introduction. Road safety is largely determined by the technical condition of the vehicle, and especially control systems. The braking system is one of them. To improve its efficiency, various assistive electronic systems are now widely used. These systems control the vehicle through wheel braking mechanisms. Brake pads are a constituent element of a friction-type wheel brake mechanism. The efficiency of the vehicle braking system depends on its quality, regardless of the presence of auxiliary electronic systems. The use of brake pads with a wide spread of friction coefficients can have a significant impact on braking performance.

Materials and methods. To conduct experimental studies, a methodology for conducting them and processing experimental data was developed, as well as a laboratory setup was made. Arduino Uno R3 analog-to-digital converter was used as an instrumental component of the stand for converting mechanical movements into an electronic signal.

Results. In accordance with the proposed methodology, four pairs of brake pads were tested. As a result of processing the experimental data, it was found that the difference in the values of the friction coefficients of the brake pads can cause a difference in the magnitude of the braking forces on the wheels from 8 to 19%.

Discussion and conclusions. The difference in the coefficients of friction of the brake pads has a significant impact on the magnitude of the braking forces and the stability of the vehicle during braking. One of the reasons for this may be the poor quality of the pad material or a violation of operating conditions. The proposed improved technique for determining the coefficients of sliding friction makes it possible to obtain more accurate values through the use of an analog-to-digital converter, reducing the influence of the accuracy of measuring instruments and the human factor.

KEYWORDS: brake mechanism, brake pads, coefficient of friction, directional stability, braking force, car

ACKNOWLEDGMENTS: the team of the authors is grateful to the reviewers who worked on this article for their insightful comments on the revision of the article.

The article was submitted 04.10.2022; approved after reviewing 31.10.2022; accepted for publication 20.02.2023.

The authors have read and approved the final manuscript.

Financial transparency: the authors have no financial interest in the presented materials or methods. There is no conflict of interest.

For citation. Holshev N. V., Konev A. Yu., Vedishchev S. M., Method and results of experimental determination of friction coefficients of some automobile brake shoe. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2023; 20 (1): 114-124. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-1-114-124>

© Holshev N. V., Konev A. Y., Vedishchev S. M., Prokhorov A. V., 2023



Content is available under the license
Creative Commons Attribution 4.0 License.

ВВЕДЕНИЕ

Автомобиль состоит из множества деталей, механизмов, агрегатов и систем, различно влияющих на безопасность дорожного движения. К системам, критически влияющим на устойчивость автомобиля, относится и тормозная система. Надежная и эффективная ее работа обеспечивает устойчивость автомобиля при всех режимах торможения, исключая выход его из коридора движения и уменьшая вероятность ДТП [1]. Многие научные исследования направлены на повышение устойчивости транспортного средства при торможении [2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15]. Основным направлением повышения эффективности процесса торможения автомобиля без выхода его из коридора движения является применение различных вспомогательных электронных систем [16, 17]. Наиболее распространенной из таких систем является антиблокировочная система ABS (anti-lockbrakingsystem), которая исключает блокировку колес при торможении, не допуская их проскальзывание, причем выполняет это в автоматическом режиме, избавляя водителя от необходимости осуществлять прерывистое торможение [12]. Ее применение позволяет сохранить управляемость автомобиля при торможении, снижая влияние на эффективность торможения опыта водителя [18]. Развитием данной системы стало внедрение дополнительно к ней системы распределения тормозных усилий EBD (Electronic Brakeforce Distribution). Данная система позволяет исключить блокировку колес путем перераспределения тормозных сил между колесами. Совершенствование антиблокировочной системы ведется постоянно, совершенствуется алгоритм работы системы, изменяется ее компонентный состав [12, 19 20, 21, 22, 23]. Это позволяет подстроить ее под новые требования к безопасности и конструкции транспортных средств. На базе антиблокировочной системы разработана система курсовой устойчивости ESP (Electronic Stability Program), обеспечивающая устойчивое движение автомобиля за счет подтормаживания нужного колеса. С появлением электропривода и гибридного привода стали исследоваться и внедряться принципы и технологии рекуперативного торможения, которое не исключает необходимость применения классических фрикционных тормозных механизмов на транспортных средствах, особенно для экстренного торможения [12].

Применение электронных систем облегчает управление автомобилем, повышает его устойчивость и управляемость, но снижает общую надежность транспортного средства в целом и тормозной системы в частности, снижая ее ресурс [24], увеличивает стоимость приобретения, обслуживания и ремонта автомобиля. Кроме того, они вызывают излишнюю уверенность в своих возможностях у водителя, ведущую к более агрессивному стилю вождения и повышению вероятности возникновения дорожно-транспортных происшествий [24].

Каким бы ни был совершенным электронный «помощник», встроенный в тормозную систему автомобиля, он будет малоэффективен при низкой надежности и эффективности работы тормозного механизма. Наибольшее распространение сейчас имеют тормозные механизмы фрикционного типа, создающие тормозной момент за счет прижатия тормозных накладок к поверхности тормозного диска или барабана. Если величины коэффициентов трения в тормозных механизмах разных колес автомобиля будут существенно отличаться, то это приведет к возникновению поворачивающего момента [6] и выходу транспортного средства из коридора движения. В случае если на автомобиле ABS работает в штатном режиме, она исправит данную ситуацию, не допустив блокировку колеса с наиболее высоким тормозным моментом. Величина тормозного момента на колесе для дискового тормозного механизма линейно (для барабанного почти линейно) зависит от значения коэффициента трения между тормозной колодкой и тормозным диском. Величина данного коэффициента трения зависит в основном от свойств и состояния тормозной накладки. Известно, что даже в пределах одного уровня трения колодки могут иметь существенную разницу значений коэффициента трения. Неравномерность значений коэффициентов трения может быть вызвана плохой приработкой колодок, их замасливанием, воздействием воды, нестабильностью значений коэффициентов трения накладок при нагреве, заеданием механических частей тормозных механизмов, низким качеством материала накладок, применением фальсифицированной продукции. Это фактически означает постоянное «вмешательство» в процесс торможения электронных «помощников», что негативно сказывается на ресурсе элементов тормозной системы [24].

Вопросам изучения влияния разности тормозных сил по бортам автомобиля на его устойчивость при торможении посвящен ряд работ^{1,2} [4, 6, 7, 13, 25, 26]. Наиболее полные результаты исследований по данной тематике изложены в монографии А. А. Ревина [13]. Представленные в ней данные указывают на то, что разность коэффициентов трения тормозных накладок разных партий может привести к неравномерности тормозных сил по бортам автомобиля до 44% (на момент издания монографии, 2002 год). Воздействие эксплуатационных факторов на тормозные накладки дополнительно может привести к неравномерности тормозных сил для легковых автомобилей от 44–55% [13]. Более новых данных о разности значений коэффициентов трения современных тормозных колодок, возникающей при производстве и их эксплуатации, при литературном поиске среди открытых источников найдено не было. Между тем требования к качеству и долговечности тормозных накладок с годами возрастают, также изменяются составы, применяемые при их производстве. Поэтому одной из задач проводимых исследований стало экспериментальное определение ориентировочной разности коэффициентов трения применяемых в настоящее время тормозных колодок, причем с минимальными финансовыми затратами на подготовку и проведение экспериментов.

С учетом задачи и условий проведения исследований (применение минимального количества измерительного оборудования, снижение влияния человеческого фактора при проведении измерений, минимальные финансовые затраты при удовлетворительной точности) был произведен анализ существующих методов определения коэффициента трения скольжения. В настоящее время существует несколько таких способов, отличающихся степенью точности и сложностью необходимого оборудования³ [27]. Наиболее доступными и простыми являются три метода.

Первый – «движение тела по горизонтальной поверхности»³. Его суть заключается в экспериментальном определении минимальной силы F , которую необходимо приложить к бруску известной массы m , для равномерного его перемещения по горизонтальной поверхности. Величина коэффициента трения в этом случае может быть найдена по формуле

$$\mu_1 = \frac{F}{mg}, \quad (1)$$

где g – ускорение свободного падения, м/с².

Как видно из формулы (1), при этом методе необходимо производить с достаточной точностью измерение двух физических величин – массы и силы, следовательно, нужно иметь для этих целей соответствующее оборудование высокой точности, кроме того, чем больше применяется измерительного оборудования, каждое из которых имеет некоторую погрешность, тем выше будет итоговая погрешность измерения.

Вторым методом определения коэффициента трения скольжения является метод «наклонной плоскости»³. Его суть заключается в определении минимального угла наклона α некоторой опорной площадки, при котором тело, расположенное на ней, будет под действием силы тяжести соскальзывать с нее. В этом случае коэффициент трения будет равен

$$\mu_2 = \operatorname{tg} \alpha. \quad (2)$$

Из выражения (2) видно, что при таком методе нужно измерить только одну физическую величину, но точность измерения будет во многом зависеть от того, каким образом будет определяться угол наклона опорной площадки. Самым доступным средством измерения угла является транспортир, но точность измерений будет с минимальной ошибкой в $\pm 0,5^\circ$, а фактически еще больше из-за человеческого фактора.

¹ Тарасов Ю.В. Улучшение эксплуатационных свойств легковых автомобилей совершенствованием методики выбора тормозных колодок: дис. ... канд. техн. наук: 05.22.02. Харьков, 2007. 168 с.

² Конев А. Ю., Хольшев Н. В. Влияние фрикционных свойств тормозных колодок на устойчивость автомобиля при торможении // Современная наука: Теория, методология, практика: матер. IV Всероссийской нац. науч.-практ. конф. (Тамбов, 20–апреля 2022 г.) Тамбов, 2022. С. 196–198.

³ Лабораторная работа М-19. Определение коэффициентов силы трения скольжения [Электронный ресурс]. URL: https://file.ineo.tpu.ru/VLabs/PHYSICS_mechanics_01/Lab2/theory.pdf (дата обращения: 25.10.2022).

Третий метод определения величины коэффициента трения называется «метод рейсшины»⁴. При определении коэффициента трения данным способом используют линейку, перемещающуюся вдоль направляющей и расположенную под некоторым углом к ней. Брусок из исследуемого материала непосредственно контактирует с линейкой и перемещается вдоль нее при движении линейки относительно направляющей. Зная начальное и конечное положение центра масс бруска, находят величину коэффициента трения между линейкой и бруском при равномерном перемещении линейки. Его значение равно отношению расстояния, которое пройдет центр масс бруска вдоль линейки (расстояние l_1) к величине перпендикуляра (расстояние l_2), проведенного к линейке через начальное положение центра масс бруска до пересечения с прямой, параллельной линейке, проходящей через новое положение центра масс бруска

$$\mu_3 = \frac{l_1}{l_2}. \quad (3)$$

Данный способ также не требует специализированного оборудования, но требует нахождения центра масс и устойчивого положения исследуемого бруска, что в случае с тормозными колодками затруднительно и приведет к снижению точности определения коэффициента трения скольжения.

С учетом проведенного анализа методов определения коэффициентов трения скольжения и учетом возможностей имеющегося оборудования, финансовых возможностей в качестве базового для проведения исследований был выбран метод «наклонной плоскости» как наиболее просто реализуемый. Для повышения его точности и уменьшения влияния человеческого фактора при считывании данных было решено автоматизировать данный процесс.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В соответствии с выбранным методом определения коэффициента трения скольжения для проведения поисковых экспериментов была изготовлена лабораторная установка, представленная на рисунке. Она состоит из основания 1, к которому через опоры 2 подвижно присоединен вал 3, жестко

соединенный с поворотной платформой 4, с закрепленным на ней при помощи зажимов 5 абразивным материалом (на фото – шлифовальная сетка). Применение данных зажимов позволяет удерживать сетку неподвижно относительно поворотной площадки с усилием более 45Н (данная величина определялась экспериментально), что значительно больше силы от воздействия тормозной колодки. Поворот платформы 4 осуществляется при помощи вала 6 вращением ручки 7. Для определения угла поворота платформы 4 с валом 3 жестко связана ручка потенциометра 8, который через уголок 9 закреплен к основанию 1. Для считывания текущих значений сопротивления к потенциометру через три провода 10 подсоединена плата ArduinoUno R3 11 [28], которая в свою очередь подключается к персональному компьютеру через USB разъем 12 и в которую загружен скетч AnalogReadSerial. Каждому значению сопротивления потенциометра будет соответствовать условное число, изменяющееся от нуля до 1023 [28]. Просмотр этих чисел в реальном времени осуществляется через монитор порта, который открывается через приложение Arduino.

Центральный разъем потенциометра 8 присоединен через желтый провод к аналоговому входу «A0» платы ArduinoUno R3, а белый и синий провода к разъемам GND и «питание 5В» соответственно. Для тарировки значений использовался оптический дальномер «SW-S50» 13 функцией измерения углов с точностью до десятых долей градуса.

Тарировка осуществлялась следующим образом. Включался дальномер 13 (см. рисунок) и устанавливался подошвой на поворотную платформу 4. Затем для удобства вычислений вращением вала 6 через рукоять 7 выставлялся целый угол поворота платформы через показания дальномера. Этому значению соответствовало некоторое значение на мониторе порта. Оно записывалось. Затем осуществлялся подъем платформы на 10°, и снова записывалось значение с монитора порта. Для повышения точности тарировка производилась с пятикратной повторностью. За результат было взято среднее значение. После обработки данных было установлено, что повороту платформы 4 на 1° соответствует изменение показаний на мониторе порта в 4,9 единицы.

⁴ Лабораторная работа М-19. Определение коэффициентов силы трения скольжения [Электронный ресурс]. URL: https://file.ineo.tpu.ru/VILabs/PHYSICS_mechanics_01/Lab2/theory.pdf (дата обращения: 25.10.2022).

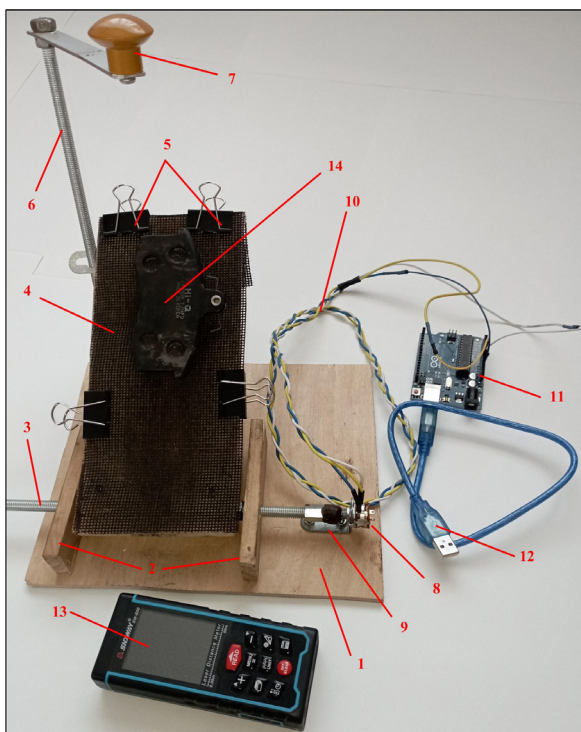


Рисунок – Лабораторная установка для определения коэффициента трения скольжения автомобильных тормозных колодок
Источник: составлено авторами.

Figure – Laboratory setup for determining the slip detection coefficient of automotive brake pads
Source: compiled by the authors

Определение коэффициентов трения скольжения тормозных колодок осуществлялось следующим образом (см. рисунок). Потенциометр подключался через плату ArduinoUno R3 к персональному компьютеру. Загружалось приложение Arduino и открывался монитор порта. Перед началом испытаний колодка «притиралась» к абразивной сетке путем нескольких перемещений по ней с небольшим усилием. Шлифовальная сетка менялась после испытаний каждой колодки. Использовалась сетка с зерном № 180. Затем вращением рукоятки 7 осуществлялось опускание платформы 4, до тех пока лежащая на ней колодка 14 не соскальзывала с нее. После этого, расположив колодку рядом с краем верхних зажимов 5, медленно вращая вал 6 через рукоять 7, осуществлялся подъем платформы до тех пор, пока колодка не соскальзывала с нее. Для данного положения платформы про-

изводилась фиксация значения монитора порта. Опыты повторялись с каждой колодкой по пять раз.

Экспериментальные значения коэффициентов трения для i -й колодки определялись по формуле

$$\mu_i = \operatorname{tg}(\alpha_{\max}^T - \frac{R_i - R_{\max}^T}{k}), \quad (4)$$

где α_{\max}^T – значение максимального тарировочного угла, градусы; R_{\max}^T – значение сопротивления потенциометра, соответствующее α_{\max}^T , условные единицы; R_i – экспериментальное значение сопротивления потенциометра для i -й колодки, условные единицы; k – тарировочный коэффициент, количество условных единиц сопротивления потенциометра, приходящихся на один градус поворота платформы, усл. ед./градус.

$$k = \frac{R_{\max}^T - R_{\min}^T}{\alpha_{\max}^T - \alpha_{\min}^T}, \quad (5)$$

где α_{\min}^T – значение минимального тарировочного угла, градусы; R_{\min}^T – значение сопротивления потенциометра, соответствующее α_{\min}^T , условные единицы.

Расчет фактической разницы коэффициентов трения разных колодок осуществлялся по формулам:

- в абсолютных значениях:

$$\Delta\mu_{ij}^A = \mu_{\max}^i - \mu_{\min}^j, \quad (6)$$

- в относительных единицах, %:

$$\Delta\mu_{ij}^O = 100 \frac{\mu_{\max}^i - \mu_{\min}^j}{0,5(\mu_{\max}^i + \mu_{\min}^j)} \quad (7)$$

где $\Delta\mu_{ij}^A$ – абсолютное отклонение коэффициента трения i -й колодки относительно j -й; $\Delta\mu_{ij}^O$ – абсолютное отклонение коэффициента трения i -й колодки относительно j -й; μ_{\max}^i – экспериментальное значение коэффициента трения i -й колодки, имеющей больший коэффициент трения; μ_{\min}^j – экспериментальное значение коэффициента трения j -й колодки, имеющей меньший коэффициент трения.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Исследования производились на четырех парах колодок. Первые две пары колодок использовались на передних тормозных механизмах автомобиля ВАЗ-21043, причем обе пары достигли предельного износа. Третья пара колодок и четвертая использовались на передних тормозных механизмах ВАЗ-2109 и имеют допустимый износ накладок. Результаты экспериментов приведены в таблице 1.

Из таблицы 1 видно, что результаты повторных опытов в одной серии отличаются больше для колодок, достигших предельного

износа – разброс значений от 8 до 10 условных единиц, что может говорить о нестабильности значений коэффициента трения для изношенных колодок. Для колодок третьей и четвертой пар, имеющих допустимый износ, разброс составил от 4 до 5 условных единиц, что может косвенно говорить о большей стабильности значений коэффициента трения. Также следует отметить, что разность средних значений для каждой пары колодок варьируется в пределах от 10 до 15 условных единиц. Большие значения характерны для четвертой пары колодок. Результаты обработки экспериментальных данных приведены в таблице 2.

Таблица 1
Результаты экспериментов
Источник: составлено авторами.

Table 1
Experimental results
Source: compiled by the authors.

Номер замера	Первая пара колодок		Вторая пара колодок		Третья пара колодок		Четвертая пара колодок	
	1-я колодка	2-я колодка	1-я колодка	2-я колодка	1-я колодка	2-я колодка	1-я колодка	2-я колодка
1	917	936	944	928	942	930	970	957
2	927	931	938	926	938	933	968	955
3	924	933	939	925	942	931	968	955
4	917	927	938	930	937	931	972	957
5	923	932	935	933	937	929	973	953
Средние значения	921,6	931,8	938,8	928,4	939,2	930,8	970,2	955,4

Таблица 2
Результаты обработки экспериментальных данных
Источник: составлено авторами.

Table 2
Results of experimental data processing
Source: compiled by the authors.

Номер замера	Первая пара колодок		Вторая пара колодок		Третья пара колодок		Четвертая пара колодок	
	1-я колодка	2-я колодка	1-я колодка	2-я колодка	1-я колодка	2-я колодка	1-я колодка	2-я колодка
Угол поворота платформы, ° α_i	28,87	26,80	25,37	27,49	25,28	27,00	18,96	21,98
Значение коэффициента трения, μ_i	0,55	0,505	0,47	0,52	0,47	0,51	0,34	0,40
Абсолютная разность коэффициентов трения	0,045		0,05		0,04		0,06	
Относительная разность коэффициентов трения, %	8,53		10,10		8,16		16,21	
Относительная разность тормозных сил, %	7,86		11,24		8,89		19,35	

Из таблицы 2 видно, что абсолютная разность значений коэффициентов трения находится в интервале от 0,04 до 0,06, а относительная – от 8,16 до 16,21%. С учетом линейной зависимости тормозной силы от величины коэффициента трения в дисковом тормозном механизме можно считать, что и ее величина будет изменяться в этих пределах (от 1,08 до 1,16 раза), создавая неравномерность сил на колесах. Для колес с дисковыми тормозными механизмами относительная разность тормозных сил колес оси допускается до 20% и вычисляется по формуле⁵ [5]:

$$\delta = 100 \left| \frac{P_{T \text{ пр.}} - P_{T \text{ лев.}}}{P_{T \text{ max}}} \right|, \quad (8)$$

где $P_{T \text{ пр.}}$, $P_{T \text{ лев.}}$ – тормозные силы на правом и левом колесах проверяемой оси АТС, Н; $P_{T \text{ max}}$ – наибольшая из указанных тормозных сил, Н.

Расчеты, выполненные по формуле (8) и приведенные в таблице 2, показывают, что полученные отклонения укладываются в двадцатипроцентный допуск. Но на все остальные факторы, влияющие на равномерность тормозных сил, в таком случае остается около 10%, а для четвертой пары колодок всего 1%. Это ведет к увеличению числа срабатываний вспомогательных электронных систем, а если они отсутствуют или неисправны, то растет и вероятность возникновения заноса при торможении и создании аварийной ситуации.

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Обработка результатов испытаний показывает, что относительная разность тормозных сил из-за различия коэффициентов трения, по результатам экспериментальных исследований, для испытываемых колодок находится в интервале от 8 до 19%. Это значительно снижает допуск на остальные параметры, негативно влияющие на значения тормозных сил, а значит и на устойчивость автомобиля при торможении. Предложенная усовершенствованная методика определения коэффициентов трения скольжения, предусматривающая применение аналогово-цифрового преобразователя, позволяет с большей точностью производить измерения за счет уменьшения влияния человеческого фактора и точности измерительного оборудования.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Хольшев Н. В., Коновалов Д. Н., Лавренченко А. А. Уточненная методика расчета курсовых углов автомобиля в конце торможения // Интеллект. Инновации. Инвестиции. 2021. № 2. С. 86–95.
2. Балакина Е. В., Сергиенко И. В. Методика выбора размеров колёс на разных осях автомобиля с АБС по критерию улучшения траекторной устойчивости при торможении // Автомобильная промышленность. 2022. № 1. С. 12–15.
3. Литвинов А. С. Управляемость и устойчивость автомобиля: монография. М.: Машиностроение. 1971. 416 с.
4. Ревин А. А., Комаров Д. Ю. Неравномерность действия тормозных механизмов и ее влияние на рабочий процесс тормозной системы автомобиля с АБС // Автомобильная промышленность. 2009. № 12. С. 19–20.
5. Быков В. В. Экспериментальные исследования устойчивости автомобиля категории М1 при неравномерном действии тормозных сил // Вести автомобильно-дорожного института. 2019. № 4 (31). С. 11–20.
6. Подригало М. А., Холодов М. П. Влияние распределения тормозных сил между осями на устойчивость колесных машин при заносе // Ученые записки Крымского инженерно-педагогического университета. 2011. № 29. С. 11–17.
7. Подригало М. А., Волков В. Л., Доброгорский М. В. Оценка устойчивости автомобиля при опережающем блокировании задних колёс в процессе торможения // Автомобиле- и тракторостроение. Вестник НТУ «ХПИ». 2004. № 2. С. 101–109.
8. Подригало М. А., Карпенко В. А. Неравномерность вертикальных реакций на колёсах автомобиля и его устойчивость при торможении // Автомобильная промышленность. 2001. № 2. С. 19–21.
9. Подригало М. А., Туренко А. И. Оценка устойчивости автомобиля при действии возмущений в процессе служебных торможений // Вестник ХНАДУ. 2015. № 69. С. 40–44.
10. Schick B., Bunz D. Fahrzeug-Gierstabilität beim Kurvenbremsen auf hohen Geschwindigkeiten // Automobiltechnische Zeitschrift. 2004. Vol. 106. Iss. 11. P. 988–994.
11. Pacejka H.B., Tyre and Vehicle Dynamics. Burlington: Butterworth-Heinemann. 2006. P. 657.
12. Andrew Day. Braking of Road Vehicles. Butterworth-Heinemann. 2014. P. 488 <https://doi.org/10.1016/C2011-0-07386-6>.
13. Ревин А. А. Теория эксплуатационных свойств автомобилей и автопоездов с АБС в режиме торможения: монография. Волгоград: ВолГТУ, 2002. 372 с.
14. Балакина Е. В., Зотов Н. М., Федин А. П. Особенности компьютерного моделирования в реальном времени процесса торможения авто-

⁵ Организация государственного учета и инструментальный контроль технического состояния автомобилей: методические указания / Е. Ю. Носов, Е. А. Лысенко [и др.]. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2012. 66 с.

мобильного колеса. Мехатроника, автоматизация, управление. 2015;16(3):174-182. <https://doi.org/10.17587/mau.16.174-182>.

15. Федотов А. И. Влияние работы ABS на тормозную эффективность и устойчивость автомобиля // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2013. № 8(79). С. 130–133.

16. Иванов А. М., Кристальный С. Р., Попов Н. В. Системы автоматического экстренного торможения: монография. М.: МАДИ, 2018. 180 с.

17. Реализация интеллектуальных функций в электронно-пневматическом тормозном управлении транспортных средств: монография / А. Н. Туренко, В. И. Клименко, В. А. Богомолов [и др.]. Харьков: ХНАДУ. 2015. 450 с.

18. Khorasani-Zavareh D., Shoar S., Saadat S. Antilock braking system effectiveness in prevention of road traffic crashes in Iran// BMC public health. May 2013. Vol. 13(1): 1-6.: <https://doi.org/10.1186/1471-2458-13-439>

19. Soni A., Jitendra Dr. Anti-Lock Braking System// International Journal of Innovative Research in Engineering & Management. February 2022. Vol.9, Iss. 1: 248-252.: <https://doi.org/10.55524/ijirem.2022.9.1.48>

20. Beles H., Rus A., Dragomir G., Mitran T., Trusca D., Tolea B. Researches Regarding the Continuous Improvement of the ABS (Anti-Lock Braking System) Operation for the Passenger Cars// 26th DAAAM International Symposium on Intelligent Manufacturing and Automation. January 2016.: 196-205.: <https://doi.org/10.2507/26th.daaam.proceedings.027>

21. Жилейкин М. М., Чугунов Д. С. Алгоритм работы антиблокировочной системы для двухосных автомобилей с одной ведущей осью с адаптивным перераспределением тормозных усилий// Известия МГТУ «МАМИ». 2021. Том 15, № 2. С. 93 – 100.: <https://doi.org/10.31992/2074-0530-2021-48-2-93-100>.

22. Горшков Ю. Г., Калугин А. А., Старунова И. Н., Житейко И. С. Антиблокировочная тормозная система колесных машин с пневматическими тормозными устройствами // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2014. № 4 (114). С. 133–138.

23. Ashraf Sh., Sharkawy Abdel-Nasser, Moaaz Ah., Ghazaly N. A. Comparative Study of Different Control Methods for Anti-Lock Braking System (ABS)// SVU-International Journal of Engineering Sciences and Applications. June 2021. Vol.2 (1): 27-34.: <https://doi.org/10.21608/svusrc.2021.65855.1007>

24. Ревин А. А., Полуэктов М. В., Радченко М. Г. ABS и ресурс элементов тормозной системы // Автомобильная промышленность. 2009. № 10. С. 39–40.

25. Подригало М. А., Тарасов Ю. В. Методика рационального выбора фрикционных пар передних и задних тормозов автомобилей по температурным характеристикам // Автомобильный транспорт. 2004. № 15. С.13–17.

26. Ревин А. А., Комаров Д. Ю., Дедов С. С. Влияние на рабочий процесс тормозной системы легкового автомобиля с ABS явления снижения

коэффициента трения пары «тормозная колодка – тормозной диск» // Автотранспортное предприятие. 2008. № 4. С. 49–51.

27. Определение коэффициента трения скольжения методом гармонических колебаний / Н. К. Корнеева, Л. Н. Пичугова, Е. В. Глушкова [и др.] // Энергетические установки и технологии. 2021. Т. 7, № 2. С. 124–129.

28. Хольшев Н. В., Коновалов Д. Н., Прохоров А. В., Минаев П. С. Лабораторный стенд для диагностирования шин автомобилей. *Вестник СибАДИ*. 2021;18(6):734-745. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-6-734-745>

REFERENCES

1. Hol'shev N. V., Konovalov D. N., Lavrenchenko A. A. Utochnennaya metodika rascheta kursovyyh uglov avtomobilya v konce tormozheniya [Refined method for calculating vehicle heading angles at the end of braking]. *Intellekt. Innovacii. Investicii*. 2021; 2: 86 - 95 (In Russ.)

2. Balakina E. V., Sergienko I. V. Metodika vybora razmerov kolyos na raznyh osyakh avtomobilya s ABS po kriteriyu uluchsheniya traektornoj ustojchivosti pri tormozhenii [A method for selecting wheel sizes on different axles of a car with ABS according to the criterion for improving trajectory stability during braking]. *Avtomobil'naya promyshlennost'*. 2022;1: 12-15 (In Russ.)

3. Litvinov A. S. *Upravlyaemost' i ustojchivost' avtomobilya* [Handling and stability of the car]. Moscow: Engineering, 1971: 416 p. (In Russ.)

4. Revin A. A., Komarov D. YU. Neravnomernost' dejstviya tormoznyh mekhanizmov i ee vliyanie na rabochij process tormoznoj sistemy avtomobilya s ABS [Uneven action of brake mechanisms and its influence on the working process of the brake system of a car with ABS]. *Avtomobil'naya promyshlennost'*. 2009; 12: 19-20. (In Russ.)

5. Bykov V. V. Eksperimental'nye issledovaniya ustojchivosti avtomobilya kategorii M1 pri neravnomernom dejstvii tormoznyh sil [Experimental studies of the stability of a car of category M1 with uneven action of braking forces]. *Vesti avtomobil'no-dorozhnogo instituta*. 2019; 4 (31): 11-20. (In Russ.)

6. Podrigalo M. A., Holodov M. P. Vliyanie raspredeleniya tormoznyh sil mezhdru osyami na ustojchivost' kolesnyh mashin pri zanosе [Influence of the distribution of braking forces between the axles on the stability of wheeled vehicles during skidding]. *Uchenye zapiski Krymskogo inzhenerno-pedagogicheskogo universiteta*. 2011; 29: 11–17. (In Russ.)

7. Podrigalo M. A., Volkov V. L., Dobrogorskij M. V. Ocenka ustojchivosti avtomobilya pri operezhayushchem blokirovanii zadnih kolyos v processe tormozheniya [Evaluation of vehicle stability with advanced blocking of the rear wheels during braking]. *Avtomobile i traktorostroenie. Vestnik NTU «HPI»*. 2004; 2: 101–109. (In Russ.)

8. Podrigalo M. A., Karpenko V. A. Neravnomernost' vertikal'nyh reakcij na kolyosah avtomobilya i ego ustojchivost' pri tormozhenii [Uneven vertical reactions on the wheels of the car and its stability during brak-

ing]. *Avtomobil'naya promyshlennost'*. 2001; 2: 19–21 (In Russ.)

9. Podrigalo M. A., Turenko A. I. Ocenka ustojchivosti avtomobilya pri dejstvii vozmushchenij v processe sluzhebnyh tormozhenij [Assessment of vehicle stability under the action of disturbances in the process of service braking]. *Vestnik HNADU*. 2015; 69: 40–44 (In Russ.)

10. Schick B., Bunz D. Fahrzeug-Gierstabilität beim Kurvenbremsen aus hohen Geschwindigkeiten. *Automobiltechnische Zeitschrift*. 2004; Vol. 106. Iss. 11: 988-994.

11. Pacejka H. B., Tyre and Vehicle Dynamics. Burlington: Butterworth-Heinemann. 2006: 657.

12. Andrew Day. Braking of Road Vehicles. Butterworth-Heinemann. 2014: 488. <https://doi.org/10.1016/C2011-0-07386-6>.

13. Revin A. A. *Teoriya ekspluatatsionnykh svoystv avtomobilej i avtopoezdov s ABS v rezhime tormozheniya* [Theory of operational properties of automobiles and road trains with ABS in braking mode]. Volgograd: VolGTU, 2002: 372. (In Russ.)

14. Balakina E. V., Zotov N. M., Fedin A. P. Oso-bennosti komp'yuternogo modelirovaniya v real'nom vremeni processa tormozheniya avtomobil'nogo kole-sa [Features of computer simulation in real time of the braking process of an automobile wheel]. *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie*. 2015; 16 (3) :174-182. <https://doi.org/10.17587/mau.16.174-182> (In Russ.)

15. Fedotov A. I. Vliyaniye raboty ABS na tormoznyuyu effektivnost' i ustojchivost' avtomobilya [Influence of ABS operation on braking efficiency and vehicle stability]. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2013; 8(79): 130-133. (In Russ.)

16. Ivanov A. M., Kristal'nyj S. R., Popov N. V. *Sistemy avtomaticheskogo ekstrennogo tormozheniya* [Systems of automatic emergency braking]. Moscow: MADI, 2018: 180. (In Russ.)

17. Turenko A. N., Klimenko V. I., Bogomolov V. A. *Realizatsiya intellektual'nykh funktsij v elektronno-pnevmaticheskom tormoznom upravlenii transportnykh sredstv* [Implementation of intellectual functions in the electronic-pneumatic brake control of vehicles] Har'kov: HNADU. 2015. 450. (In Russ.)

18. Khorasani-Zavareh D., Shoar S., Saadat S. Antilock braking system effectiveness in prevention of road traffic crashes in Iran. *BMC public health*. May 2013. Vol. 13(1): 1-6.: <https://doi.org/10.1186/1471-2458-13-439>.

19. Soni A., Jitendra Dr. Anti-Lock Braking System// *International Journal of Innovative Research in Engineering & Management*. February 2022. Vol. 9, Iss. 1: 248-252: <https://doi.org/10.55524/ijrem.2022.9.1.48>.

20. Beles H., Rus A., Dragomir G., Mitran T., Trusca D., Tolea B. Researches Regarding the Continuous Improvement of the ABS (Anti-Lock Braking System) Operation for the Passenger Cars. *26th DAAAM International Symposium on Intelligent Manufacturing and Automation*. January 2016.: 196-205.: <https://doi.org/10.2507/26th.daaam.proceedings.027>.

21. Zhilejkin M. M., Chugunov D. S. Algoritm raboty antiblokirovochnoj sistemy dlya dvuhosnykh avtomobilej s odnoj vedushchej os'yu s adaptivnym pereraspre-

deleniem tormoznykh usilij [Algorithm of operation of the anti-lock braking system for two-axle vehicles with one driving axle with adaptive redistribution of braking forces]. *Izvestiya MGTU "MAMI"*. 2021. Vol. 15, № 2: 93 - 100: <https://doi.org/10.31992/2074-0530-2021-48-2-93-100> (In Russ.)

22. Gorshkov YU. G., Kalugin A. A., Starunova I. N., Zhitejko I. S. Antiblokirovochnaya tormoznaya sistema kolesnykh mashin s pnevmaticheskimi tormoznymi ustrojstvami [Anti-lock braking system of wheeled vehicles with pneumatic brakes]. *Vestnik Altajskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2014; 4 (114): 133-138 (In Russ.)

23. Ashraf Sh., Sharkawy Abdel-Nasser, Moaaz Ah., Ghazaly N. A. Comparative Study of Different Control Methods for Anti-Lock Braking System (ABS). *SVU-International Journal of Engineering Sciences and Applications*. June 2021. Vol.2 (1): 27-34.: <https://doi.org/10.21608/svusrc.2021.65855.1007> (in English)

24. Revin A. A., Poluektov M. V., Radchenko M. G. ABS i resursy elementov tormoznoj sistemy [ABS and the resource of the elements of the brake system]. *Avtomobil'naya promyshlennost'*. 2009; 10: 39-40. (In Russ.)

25. Podrigalo M. A., Tarasov YU. V. Metodika racional'nogo vybora friktsionnykh par perednih i zadnih tormozov avtomobilej po temperaturnym harakteristikam [The method of rational choice of friction pairs of front and rear brakes of cars according to temperature characteristics] *Avtomobil'nyj transport*. 2004; 15: 13–17 (In Russ.)

26. Revin A. A., Komarov D. YU., Dedov S. S. Vliyaniye na rabochij process tormoznoj sistemy legkovogo avtomobilya s ABS yavleniya snizheniya koeffitsienta treniya pary "tormoznaya kolodka - tormoznoj disk" [Influence on the working process of the brake system of a passenger car with ABS of the phenomenon of reducing the coefficient of friction of the pair "brake pad - brake disc"] *Avtotransportnoe predpriyatie*. 2008; 4: 49-51. (In Russ.)

27. Korneeva N. K., Pichugova L. N., Glushkova E. V. Opredeleniye koeffitsienta treniya skol'zheniya metodom garmonicheskikh kolebanij. [Determination of the coefficient of sliding friction by the method of harmonic oscillations] *Energeticheskie ustanovki i tekhnologii*. 2021; T. 7. № 2: 124-129. (In Russ.)

28. Holshev N. V., Kononov D. N., Prokhorov A. V., Minaev P. S. Laboratory stand for car tire diagnostics. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2021;18 (6):734-745. (In Russ.) <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-6-734-745>

ВКЛАД СОАВТОРОВ

Хольщев Н. В. Разработка методики экспериментальных исследований и проведение экспериментальных исследований.

Конев А. Ю. Изготовление лабораторной установки и проведение экспериментальных исследований.

Ведищев С. М. Обработка экспериментальных данных.

Прохоров А. В. Обработка экспериментальных данных.

AUTHOR CONTRIBUTION STATEMENT

Nikolai V. Holshev Development of experimental research methods and experimental research.

Andrei Y. Konev Laboratory production and pilot studies.

Sergei M. Vedishchev Processing experimental data.

Alexei V. Prokhorov Processing experimental data.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Хольшев Николай Васильевич – канд. техн. наук, доц., доц. кафедры «Техника и технологии автомобильного транспорта», SPIN-код: 9972-8543.

Конев Андрей Юрьевич – аспирант кафедры «Агроинженерия».

Ведищев Сергей Михайлович – д-р техн. наук, проф., зав. кафедры «Агроинженерия», SPIN-код: 3019-6079.

Прохоров Алексей Владимирович – канд. техн. наук, доц., доц. кафедры «Агроинженерия», SPIN-код: 7624-6841.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Nikolai V. Holshev – Cand. of Sci., Associate Professor of the Engineering and Motor Transport Department Technology, SPIN-код: 9972-8543.

Andrei Y. Konev – Graduate student of the Agroengineering Department.

Sergei M. Vedishchev – Dr. of Sci., Professor, Head department of the Agroengineering Department, SPIN-код: 3019-6079.

Alexei V. Prokhorov – Cand. of Sci., Associate Professor of the Agroengineering Department, SPIN-код: 7624-6841.