

Научная статья  
УДК 629.11

## Оценка влияния базовых компонентов фрикционного слоя тормозных колодок на коэффициент трения, износ и тепловые характеристики в зоне контакта

Самар Ибрахим<sup>1</sup>, Алексей Александрович Пегачков<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), Москва, Россия

<sup>1</sup>Samaribrahim548@gmail.com

<sup>2</sup>pegachkov@yandex.ru

**Аннотация** Постоянное повышение уровня требований к безопасности дорожного движения, а также увеличение тепловых и механических нагрузок на элементы тормозных систем определяют необходимость углублённого изучения и моделирования процессов трения и изнашивания тормозных колодок. Согласно данным многочисленных исследований в данной области, именно состав фрикционного слоя оказывает решающее влияние на коэффициент трения, стабильность рабочих характеристик и интенсивность изнашивания, особенно в условиях повышенных температур и переменных нагрузок, поэтому данная тема и выбрана для дальнейших исследований. Целью исследований является анализ влияния различных компонентов фрикционного слоя тормозных колодок на их трибологические и тепловые характеристики, а также формирование научных основ для оптимизации состава и композиции материалов с точки зрения эффективности торможения, долговечности термостойкости и теплостойкости. Работа направлена на определение закономерностей изменения коэффициента трения, износа и тепловых процессов в зоне контакта при использовании различных типов фрикционных материалов.

**Ключевые слова:** тормозная система, фрикционный слой, материалы тормозных колодок, коэффициент трения, износ, термостойкость, теплостойкость, эффективность торможения.

**Для цитирования:** Ибрахим С., Пегачков А.А. Оценка влияния базовых компонентов фрикционного слоя тормозных колодок на коэффициент трения, износ и тепловые характеристики в зоне контакта // Автомобиль. Дорога. Инфраструктура. 2026. № 1 (47).

Original article

## Evaluation of the influence of the main components of the friction layer of brake pads on the coefficient of friction, wear and thermal characteristics in the friction zone

Samar Ibrahim<sup>1</sup>, Aleksey A. Pegachkov<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI), Moscow, Russia

<sup>1</sup>Samaribrahim548@gmail.com

<sup>2</sup>pegachkov@yandex.ru

**Abstract.** Increasing road safety requirements, along with the growing thermal and mechanical loads on braking system components, highlight the need for an in-depth study of the friction and wear processes of brake pads. The composition of the friction layer plays a decisive role in determining the friction coefficient, the stability of operational characteristics, and the wear intensity, particularly under elevated temperatures and variable loading conditions. The aim of this study is to analyze the influence of various components of the brake pad friction layer on their tribological and thermal properties, as well as to establish scientific foundations for optimizing material composition in terms of braking efficiency, durability, and thermal resistance. The work focuses on identifying the regularities governing changes in the friction coefficient, wear, and thermal processes in the contact zone when using different types of friction materials.

**Keywords:** braking system, friction layer, brake pad materials, friction coefficient, wear, thermal processes, braking efficiency.

**For citation:** Ibrahim S., Pegachkov A.A. Evaluation of the influence of the main components of the friction layer of brake pads on the coefficient of friction, wear and thermal characteristics in the friction zone. *Avtomobil'. Doroga. Infrastruktura*. 2026. № 1 (47).

### Введение

Тормозные системы современных транспортных средств работают в условиях постоянно возрастающих нагрузок, что связано с увеличением мощности двигателей, ростом скоростных режимов и развитием городских транспортных сетей. При таких условиях, фрикционный узел «диск–колодка» испытывает значительные тепловые и механические воздействия, а его работоспособность напрямую определяется качеством и структурой фрикционного слоя тормозных колодок. Именно этот слой является ключевым элементом, обеспечивающим эффективное преобразование кинетической энергии в тепловую, стабильность коэффициента трения и устойчивость торможения при различных режимах эксплуатации [1].

Фрикционный слой представляет собой сложную многокомпонентную композицию, формирующую трибологическое поведение тормозных механизмов. Комбинация металлических частиц, керамических наполнителей, углеродных волокон, полимерных связующих и модифицирующих добавок определяет такие критически важные параметры, как износостойкость, тепловая стабильность, величина и устойчивость коэффициента трения.

Возрастающие требования как к безопасности, так и к ресурсу работы компонентов тормозных систем подтверждают актуальность изучения и подбора оптимального состава фрикционного слоя тормозных колодок, который влияет на его физико-механические свойства и устойчивость к разрушению при динамических нагрузках [2].

К современным фрикционным материалам предъявляется ряд требований, направленных на обеспечение надежности работы тормозных механизмов. К числу таких требований относятся:

- стабильность коэффициента трения в условиях циклического нагрева;
- минимальная интенсивность изнашивания при высокой эффективности торможения;
- способность материала выдерживать экстремальные температурные нагрузки без ухудшения характеристик;
- достаточная теплопроводность для предотвращения локального перегрева;
- механическая прочность и устойчивость к вибрационным воздействиям, возникающим при эксплуатации автомобиля [3, 4].

Для реализации этих требований в составе фрикционного слоя используются разнообразные органические и неорганические материалы, каждый из которых обладает собственными преимуществами и ограничениями. Металлические порошки обеспечивают прочность и теплопроводность, углеродные наполнители повышают стабильность трения, керамические частицы способствуют уменьшению износа, а полимерные компоненты формируют структуру материала и определяют его термостойкость. Однако оптимальное сочетание этих элементов по-прежнему остаётся предметом научных дискуссий, поскольку влияние каждого компонента на комплексные характеристики трения и тепловые процессы неоднозначно.

Несмотря на значительный объём исследований в области трибологии тормозных систем, существует недостаток комплексных работ, направленных на изучение взаимосвязи между составом фрикционного слоя и интегральными характеристиками трения, износа и теплонапряженности. Эта проблема особенно актуальна при создании современных тормозных колодок, которые должны обеспечивать высокую эффективность торможения в условиях переменных нагрузок и высоких температур [5].

В связи с этим актуальность настоящего исследования обусловлена необходимостью установления закономерностей влияния состава фрикционного слоя на его трибологические и тепловые параметры. Цель работы заключается в анализе роли отдельных групп компонентов и их комбинаций в формировании коэффициента трения, интенсивности изнашивания и теплового поведения материала при моделировании реальных режимов эксплуатации тормозных механизмов. Результаты исследования позволяют сформировать научные подходы к повышению эффективности и долговечности тормозных систем.

### **Методика проведения эксперимента**

В рамках экспериментального исследования на базе лаборатории кафедры производства и ремонта автомобилей и дорожно-строительных машин МАДИ были проведены лабораторные испытания фрикционных свойств различных составов фрикционного слоя тормозных колодок.

Испытания выполнялись на лабораторной машине трения М-22П, позволяющей моделировать условия работы фрикционного узла «колодка–диск» и регистрировать основные трибологические параметры в процессе трения (рис. 1). В качестве объектов исследования была использована группа образцов с различными составами антифрикционного слоя: безасбестовые органические, полуметаллические, керамические и углеродные [6].



Рис. 1. Лабораторная машина трения М-22П.

Химический состав исследуемых образцов представлен далее в таблице 1

Таблица 1

## Химический состав исследуемых тормозных колодок

Тип тормозных колодок	Базовый компонент	Содержание основного компонента, %
NAO(безасбестовые органические) колодки	Органические волокна (кевлар, стекловолокно)	20-30
	Наполнители (частицы резины, пробка)	10-20
	Модификаторы трения (графит, молибден)	10-15
	Металлические частицы (медь)	10-20
Металлические колодки	Металлические компоненты (стальная вата, железный порошок)	30-70
	Графит и смазочные материалы	10-20
	Абразивы (металлические оксиды)	5-10
Керамические колодки	Керамические волокна	20-30
	Наполнители (сульфат бария, карбонат кальция)	10-20
	Связующие (фенольные смолы)	10-15
	Модификаторы трения (графит, оксиды металлов)	10-20
	Цветные металлы (медь, цинк)	5-10
	Абразивы (оксид алюминия, кремний)	5-10
	Различные добавки (частицы резины)	2-5

Углеродные материалы	Углеродные волокна	20-40
	Графитовый углерод	10-20
	Углеродно-керамическая матрица	30-50
	Термореактивные смолы	5-15
	Металлическая арматура	5-15
	оксиды алюминия и кремния	5-10

В ходе испытаний для каждого образца фиксировались следующие значения: коэффициент трения, температура в зоне контакта  $b$  величина линейного износа при заданных режимах нагружения и скорости скольжения. При этом, проводилось постепенное изменение нагрузки. Полученные экспериментальные данные позволили выполнить сравнительную оценку трибологических и тепловых характеристик исследуемых материалов. Результаты проведённых испытаний представлены в табл. 2, где приведены основные показатели, характеризующие поведение различных типов фрикционных составов [7].

Дополнительно, по завершении испытаний для каждого образца определялась величина линейного износа. Результаты измерений износа представлены в табл. 3. Использование данного параметра при моделировании, позволило выполнить более полную оценку эксплуатационных свойств изучаемых фрикционных материалов.

После получения экспериментальных данных, представленных в табл. 1, была выполнена их детальная статистическая обработка с использованием программного пакета Statistica, предназначенного для анализа экспериментальных и многопараметрических данных. Обработка результатов была направлена на выявление количественных закономерностей между составом фрикционного слоя тормозных колодок и их трибологическими и тепловыми характеристиками. В ходе анализа формировались массивы данных, включающие значения коэффициента трения, повышения температуры в зоне контакта, величины линейного износа и параметров режима испытаний для всех исследуемых образцов [8].

Результаты испытаний тормозных колодок

№ Образца	Время, с.	Повышение температуры, °С.	Частота вращения, об/мин.	Нагрузка, Н.			Пробег, м.	Коэффициент трения		
				Максимальная	Минимальная	Средняя		Макс. значение	Мин. значение	Средний
1_1	1889	38	285.82	518.55	264.47	331.58	1415.04	0.21	0.15	0.193
1_3	412	6	284.46	435.46	307	363.43	307.25	0.2	0.17	0.187
2_1	915	15	288.92	454.26	198.89	296.38	692.37	0.29	0.17	0.215
2_2	640	13	287.91	466.4	1.93	264.87	686.4	0.28	0.18	0.222
2_3	926	6	286.99	400.51	201.73	247.93	696.46	0.28	0.19	0.228
3_1	1269	9	286.7	364.07	210.2	259.61	952.99	0.23	0.17	0.197
3_2	911	13	286.37	438.17	226.64	296.13	683.58	0.22	0.15	0.2
3_3	1004	11	286.2	381.48	234.83	269.16	752.58	0.24	0.18	0.209
4_1	1032	28	285.22	375.67	321.71	342.17	771.5	0.23	0.18	0.208
4_2	789	21	285.2	416.29	309.87	354.23	589.38	0.27	0.18	0.229
4_3	1019	21	285.26	420.28	363.48	382.02	761.45	0.23	0.11	0.183

Таблица 3

Потеря длины образцов после испытаний

	Номер образца	Длина до эксперимента, мм	Длина после эксперимента, мм	Износ, мм
1	1-1	17.25	11.15	6.1
	1-3	17.58	17.39	0.19
2	1-2	16.95	16.7	0.25
	2-2	16.7	13.5	3.2
	3-2	16.85	16.7	0.15
3	1-3	15.4	15.2	0.2
	2-3	15.4	13.63	1.77
	3-3	15.48	15.38	0.1
4	1-4	12.39	12.15	0.24
	2-4	12.50	12.37	0.13
	3-4	12.33	12.24	0.09

Анализ экспериментальных данных показал, что изменение состава фрикционного слоя оказывает определяющее влияние на основные эксплуатационные характеристики тормозных колодок. При одинаковых режимах нагружения и скорости скольжения наблюдаются существенные различия в величине коэффициента трения и интенсивности изнашивания для образцов различных типов, что указывает на различия в механизмах формирования фрикционного контакта и теплоотвода, обусловленные структурой и фазовым составом материалов. Данное явление наглядно представлено на рис. 2. [9]

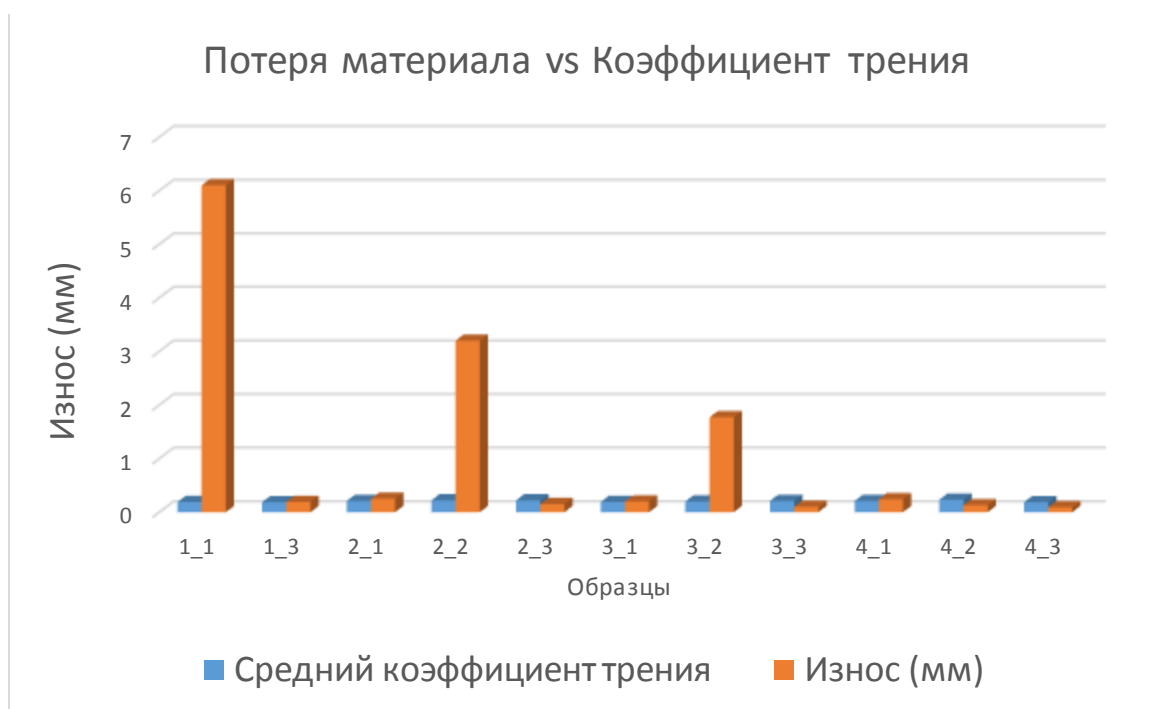


Рис. 2. Зависимость коэффициента трения от степени износа тормозных колодок у различных образцов

Особенно выраженные различия отмечены между органическими и композиционными материалами с керамическими и углеродными наполнителями. В то время как органические образцы демонстрируют повышенную чувствительность к температурным нагрузкам, керамические и углеродные фрикционные материалы характеризуются более стабильным коэффициентом трения и меньшими значениями износа. Данные особенности согласуются с результатами регрессионного анализа и подтверждают доминирующую роль состава фрикционного слоя в формировании трибологических характеристик.

Для количественной оценки влияния состава фрикционного слоя применялся регрессионный анализ, позволяющий перейти от сравнительного анализа экспериментальных данных к построению аналитических зависимостей. В качестве зависимых переменных рассматривались износ образцов и коэффициент трения, а факторами служили параметры, характеризующие тип и состав фрикционного материала. Полученные в результате статистической обработки данные послужили основой для

построения регрессионных уравнений, описывающих влияние состава фрикционного слоя на износ и коэффициент трения, и обеспечили возможность количественной оценки доминирующих факторов, определяющих эффективность торможения и стабильность работы тормозных колодок.

Можно представить регрессионные модели, описывающие влияние состава фрикционного слоя на износ и коэффициент трения, в обобщённом виде. Для описания износа фрикционного слоя используется модель [10]:

$$y_1 = b_0 + b_1x_1 + b_3x_3,$$

а коэффициент трения описывается регрессионным уравнением:

$$y_2 = c_0 + c_1x_1 + c_3x_3 + c_{12}x_1x_2$$

где  $y_1$  – износ образцов;

$y_2$  — коэффициент трения;

$x_1, x_2, x_3$  – факторы, характеризующие состав фрикционного слоя;

$b_k$  и  $c_k$  – коэффициенты регрессии, определяемые по экспериментальным данным.

Наличие члена взаимодействия  $x_1x_2$  отражает совместное влияние компонентов фрикционного материала на величину коэффициента трения.

### **Анализ экспериментальных данных и создание математической модели**

Изучение экспериментальных данных показало, что взаимосвязь между коэффициентом трения и износом тормозных колодок в решающей степени определяется свойствами и структурой фрикционного слоя. Фрикционный слой в данном случае можно рассматривать как активную функциональную среду, в которой одновременно протекают механические, тепловые и структурные процессы. Его состав и микроструктура определяют несколько параметров, таких, как характер контактного взаимодействия с тормозным диском, условия формирования фрикционной плёнки, а также механизмы зарождения и развития износа при циклическом нагружении [11, 14].

Результаты корреляционного анализа свидетельствуют о наличии слабой отрицательной корреляции между коэффициентом трения и износом фрикционного слоя. Это означает, что увеличение коэффициента трения не приводит к пропорциональному росту изнашивания материала. Напротив, в ряде исследуемых составов повышение значения  $\mu$  сопровождается снижением интенсивности износа [11, 14, 15]. Подобное поведение может быть связано с формированием более стабильного фрикционного контакта, при котором фрикционный слой обеспечивает равномерное распределение нагрузок и способствует образованию вторичных защитных структур на поверхности, уменьшающих интенсивность механического разрушения [12].

Существенную роль в формировании данной зависимости играет тип и состав фрикционного слоя. Композиционные материалы с керамическими и углеродными наполнителями характеризуются более высокой термостабильностью и способностью сохранять устойчивые фрикционные свойства при повышенных температурах. Это приводит к снижению локальных перегревов и уменьшению термических напряжений в зоне контакта, что, в свою очередь, положительно сказывается на износостойкости. В отличие от них органические фрикционные материалы проявляют более выраженную чувствительность к температурным нагрузкам, что сопровождается нестабильностью коэффициента трения и ускоренным изнашиванием.

Для количественного описания выявленных закономерностей были построены регрессионные модели, связывающие параметры состава фрикционного слоя с износом и коэффициентом трения. Статистическая обработка экспериментальных данных показала, что коэффициенты регрессии являются значимыми при уровне значимости 0.01, что подтверждает корректность выбранной модели.

Полученные зависимости отражают вклад отдельных компонентов и их взаимодействий в формирование трибологических характеристик. Наличие

переменной взаимодействия в уравнении для коэффициента трения указывает на то, что фрикционный слой функционирует как сложная композиционная система, в которой эффект отдельных компонентов проявляется наиболее полно именно в их сочетании.

$$y_1 = 917,12 + 21,3x_1 + 6,953x_3$$

$$y_2 = 812,11 + 70,43x_1 + 67,4x_3 + 46,883x_1x_2$$

где  $y_1$  – износ образцов;  $y_2$  – коэффициент трения

Статистическая значимость коэффициентов регрессии оценивалась при уровне значимости  $\alpha = 0,01$  по условию  $b_k > |\Delta b_k|$ , где  $|\Delta b_k| = 21,29$ . Принятый уровень значимости соответствует методике обработки экспериментальных данных, использованной в базовой исследовательской работе, и обеспечивает высокую достоверность полученных регрессионных зависимостей.

Таким образом, полученные результаты подтверждают, что фрикционный слой является ключевым элементом, определяющим как величину коэффициента трения, так и характер изнашивания тормозных колодок. Совокупность экспериментальных данных и регрессионного анализа позволяет не только объяснить наблюдаемую слабую отрицательную корреляцию между  $\mu$  и износом, но и использовать полученные зависимости в качестве инструмента для дальнейшей оптимизации состава фрикционных материалов с целью повышения эффективности торможения и долговечности тормозных систем.

### Выводы

1. Проведённые лабораторные испытания на машине трения М-22П подтвердили, что тип и состав фрикционного слоя оказывают определяющее влияние на формирование коэффициента трения и тепловыделение в зоне контакта и интенсивность изнашивания тормозных колодок.

2. На основании статистической обработки экспериментальных данных в программном комплексе Statistica установлено, что состав фрикционного слоя является доминирующим фактором, определяющим износ тормозных

колодок. Доля влияния состава находится в пределах 74–81%, в то время как вклад температуры в зоне контакта составляет 19–26%.

3. Экспериментальные результаты показали, что керамические и углеродные фрикционные материалы обладают более устойчивым тепловым поведением и обеспечивают более стабильные трибологические характеристики по сравнению с органическими составами, которые проявляют повышенную чувствительность к температурным нагрузкам.

4. Установлено, что между коэффициентом трения и износом фрикционного слоя существует слабая отрицательная корреляция, то есть повышение коэффициента трения в исследуемых составах не приводит к росту износа, а в ряде случаев может сопровождаться его снижением.

5. Для количественного описания влияния состава фрикционного слоя на износ и коэффициент трения были построены регрессионные модели, позволяющие оценить вклад отдельных факторов и их взаимодействий. Значимость коэффициентов регрессии подтверждена при уровне значимости  $\alpha = 0,01$ , что обеспечивает высокую достоверность полученных зависимостей.

6. Полученные результаты позволяют рекомендовать на первом этапе оптимизации фрикционного слоя использование трёх базовых компонентов: металлической ваты, керамических частиц и медного порошка, как наиболее перспективных с точки зрения влияния на эффективность торможения и износостойкость.

7. В дальнейшем целесообразно продолжить исследования по оптимизации состава фрикционных материалов по следующим критериям: теплоотведение, термостойкость компонентов и термостойкость клеевого состава, что является необходимым условием повышения стабильности характеристик при интенсивных режимах торможения.

Перспективным направлением является разработка и оптимизация комплексного эксплуатационного показателя  $U$  – износ (мм) на 1 км пробега, а также оценка себестоимости данного показателя для различных фрикционных составов, что позволит связать технические характеристики с экономической эффективностью материалов.

## Список источников

1. 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. – EDN RPAUTW.
2. Хренов, О. В. Металлокерамические фрикционные материалы / О. В. Хренов, А. А. Дмитриевич, А. В. Лешок. – Минск, 2011. – 42 с.
3. ГОСТ 32516-2013 «Изделия фрикционные тормозные. Общие технические требования».
4. ГОСТ 32985-2014. Материалы фрикционные. Методы лабораторных испытаний.
5. Kumar, V. V. Friction material composite: Types of brake friction material formulations and effects of various ingredients on brake performance-a review / V. V. Kumar, S. S. Kumaran // Materials Research Express. – 2019. – Vol. 6, No. 8. – P. 082005. – DOI 10.1088/2053-1591/ab2404. – EDN RGZZHD.
6. Ибрахим, С. Исследование влияния состава фрикционного слоя тормозных колодок на интенсивность изнашивания и тепловые показатели в зоне трения / С. Ибрахим, А. А. Пегачков // Автомобиль. Дорога. Инфраструктура. – 2025. – № 1(43). – EDN VDVZKU.
7. Вероятностная модель прогнозирования износа тормозных колодок / И. А. Успенский, Н. В. Лимаренко, Е. А. Ракул [и др.] // Вестник Рязанского государственного агротехнологического университета им. П.А. Костычева. – 2021. – Т. 13, № 3. – С. 112-119. – DOI 10.36508/RSATU.2021.91.36.016. – EDN QDXZZE.
8. Ревин, А. А. Влияние на рабочий процесс тормозной системы легкового автомобиля с АБС явления снижения коэффициента трения пары "тормозная колодка - тормозной диск" / А. А. Ревин, Д. Ю. Комаров, С. С. Дедов // Автотранспортное предприятие. – 2008. – № 4. – С. 49-51. – EDN KKHXYZ.
9. Карпинец, А. П. Перспективы применения наноматериалов и нанотехнологий на автомобильном транспорте и в его инфраструктуре / А. П. Карпинец // Вести Автомобильно-дорожного института. – 2017. – № 2(21). – С. 11-24. – EDN WMBWXS.
10. Влияние напряженного состояния зоны фрикционного контакта на формирование структуры поверхностного слоя и трибологических свойств сталей и сплавов / Л. Г. Коршунов, В. А. Шабашов, Н. Л. Черненко, В. П. Пилюгин // Физика металлов и металловедение. – 2008. – Т. 105, № 1. – С. 70-85. – EDN ICEBBX.
11. Пегачков, А. А. Комментарии к приложению № 8 Технического регламента Таможенного союза ТР ТС 018 / 2011 "О безопасности колесных транспортных средств", связанные с требованиями к тормозным системам / А. А. Пегачков // Все материалы. Энциклопедический справочник. – 2017. – № 3. – С. 74-78. – EDN YFOFDX.

12. Емельянов, Д. О. Инновационная методика определения коэффициента трения в системе "Колодка - Колесо" / Д. О. Емельянов, П. Ю. Иванов, Е. Ю. Дульский // Известия Транссиба. – 2022. – № 3(51). – С. 99-112. – EDN UACWWG.
13. Ибрахим, С. Исследование влияния износа тормозных колодок и дисков на эффективность тормозной системы автомобилей / С. Ибрахим, А. А. Пегачков // Автомобиль. Дорога. Инфраструктура. – 2024. – № 2(40). – EDN APQUZT.
14. Насыров, Р. Р. Применение композитных составов для повышения эффективности работы тормозной системы / Р. Р. Насыров // Проблемы функционирования систем транспорта : Материалы Всероссийской (национальной) научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Тюмень, 07–08 декабря 2023 года. – Тюмень: Тюменский индустриальный университет, 2024. – С. 207-212. – EDN AADOBR.
15. Тагильцева, А. К. Рекомендации по применению композиционных составов повышенной фрикционности в тормозных колодках и дисках сцепления современных транспортных средств с целью повышения эффективности работы / А. К. Тагильцева // NovaInfo.Ru. – 2016. – Т. 3, № 46. – С. 1-22. – EDN VXORHR.

### References

1. Korsun A.A., Ivanov P.Yu., Osipov D.V., Tikhonov D.A. *Sovremennyye tekhnologii. Sistemnyy analiz. Modelirovaniye*, 2022, no. 2(74), pp. 91-100, doi 10.26731/1813-9108.2022.2(74).91-100.
2. Khrenov O.V., Leshok A.V., Dmitrovich A.A. *Metallokeramicheskiye friktsionnyye materialy* (Metal-Ceramic Friction Materials), Minsk, 2011, 42 p.
3. *Izdeliya friktsionnyye tormoznyye. Obshchiye tekhnicheskiye trebovaniya*, GOST 32516-2013 (Friction Brake Products. General Technical Requirements, State Standart 32516-2013).
4. *Materialy friktsionnyye. Metody laboratornykh ispytaniy*, GOST 32985-2014 (Friction materials. Laboratory test methods, State Standart 32985-2014).
5. Kumar V.V., Kumaran S.S. *Materials Research Express*, 2019, vol. 6, no. 8, p. 082005, doi 10.1088/2053-1591/ab2404.
6. Ibrakhim S., Pegachkov A.A. *Avtomobil'. Doroga. Infrastruktura*, 2025, no. 1(43).
7. Uspensky I.A., Limarenko N.V., Rakul E.A., Yukhin I.A., Vorobyev D.A. *Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo agrotekhnologicheskogo universiteta im. P.A. Kostycheva*, 2021, vol. 13, no. 3, pp. 112-119, doi 10.36508/RSATU.2021.91.36.016.
8. Revin A.A., Komarov D.Yu., Dedov S.S. *Avtotransportnoye predpriyatiye*, 2008, no. 4, pp. 49-51.
9. Karpinets A.P. *Vesti Avtomobil'no-dorozhnogo institute*, 2017, no. 2(21), pp. 11-24.

10. Korshunov L.G., Shabashov V.A., Chernenko N.L., Pilyugin V.P. *Fizika metallov i metallovedeniye*, 2008, vol. 105, no. 1, pp. 70-85.
11. Pegachkov A.A. *Vse materialy. Entsiklopedicheskiy spravochnik*, 2017, no. 3, pp. 74-78.
12. Yemel'yanov D.O., Ivanov P.Yu., Dul'skiy Ye.Yu. *Izvestiya Transsiba*, 2022, no. 3(51), pp. 99-112.
13. Ibrakhim S., Pegachkov A.A. *Avtomobil'. Doroga. Infrastruktura*, 2024, no. 2(40).
14. Nasyrov R.R. Problemy funktsionirovaniya sistem transporta, *Materialy konferentsii, Tyumen', Tyumenskiy industrial'nyy universitet*, 2024, pp. 207-212.
15. Tagiltseva A.K. *NovaInfo.Ru*, 2016, vol. 3, no. 46, pp. 1-22.

Рецензент: Н.И. Баурова, д-р техн. наук, проф., МАДИ

### *Информация об авторах*

**Ибрахим Самар**, магистрант, МАДИ.

**Пегачков Алексей Александрович**, канд. техн. наук, доц., МАДИ.

### *Information about the authors*

**Ibrahim Samar**, undergraduate, MADI.

**Pegachkov Aleksey A.**, Candidate of Sciences (Technical), associate professor, MADI.

*Статья поступила в редакцию 04.02.2026; одобрена после рецензирования 17.02.2026; принята к публикации 31.03.2026.*

*The article was submitted 04.02.2026; approved after reviewing 17.02.2026; accepted for publication 31.03.2026.*