

На правах рукописи



КОКАРЕВ ОЛЕГ ПЕТРОВИЧ

**ОБЕСПЕЧЕНИЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ТОРМОЗНОЙ  
СИСТЕМЫ С ГИДРАВЛИЧЕСКИМ ПРИВОДОМ В  
ЭКСПЛУАТАЦИИ (НА ПРИМЕРЕ АВТОМОБИЛЯ KIA C'ЕED)**

Специальность 2.9.5. Эксплуатация автомобильного транспорта

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Орёл – 2024

Работа выполнена на кафедре «Автомобильный транспорт, безопасность и управление качеством» в ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых» (ФГБОУ ВО ВлГУ).

Научный  
руководитель:

**Кириллов Александр Геннадьевич**  
кандидат технических наук, доцент

Официальные  
оппоненты:

**Молев Юрий Игоревич**  
доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет имени Р.Е. Алексеева», профессор кафедры «Строительные и дорожные машины»

**Загородний Николай Александрович**  
кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет имени В.Г. Шухова», заведующий кафедрой эксплуатации и организации движения автотранспорта

Ведущая  
организация:

федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский политехнический университет»

Защита состоится «19» декабря 2024г. в 14ч. 00мин. на заседании объединенного диссертационного совета 99.2.032.03 на базе ФГБОУ ВО «Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева» по адресу: 302030, г. Орёл, ул. Московская, д. 77, ауд. 426.

С диссертацией можно ознакомиться на официальном сайте ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева» (<http://oreluniver.ru>) и в фундаментальной библиотеке по адресу: 302028, г. Орёл, пл. Каменская, д.1.

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2024 года. Объявление о защите диссертации и автореферат диссертации размещены в сети Интернет на официальном сайте ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева» (<http://oreluniver.ru>) и на официальном сайте Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (<https://minobrnauki.gov.ru>).

*Отзывы на автореферат, заверенные печатью организации, в двух экземплярах направлять в диссертационный совет 99.2.032.03 по адресу: 302030, г. Орёл, ул. Московская, д. 77, тел.: +79606476660, e-mail: srmostu@mail.ru.*

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
канд. техн. наук, доцент



Васильева В.В

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность исследования.** На сегодняшний день процесс модернизации автомобилей происходит непрерывно. Автомобиль становится комфортнее, динамичнее, экономичнее, мощнее. Объем парка транспортных средств и плотность транспортного потока на дорогах постоянно увеличиваются, что сказывается на безопасности дорожного движения. Аварийность на дорогах России ежегодно снижается, но количество погибших в дорожно-транспортных происшествиях (ДТП) по-прежнему велико. В среднем ежегодно в ДТП погибает до 650 человек из-за потери работоспособности тормозной системы (ТорС) легковых автомобилей, в связи с чем вопрос обеспечения работоспособности ТорС имеет актуальный характер.

Сложившаяся за последние два года экономическая ситуация в РФ, негативно отражается на стоимости запасных частей. Как показал анализ конъюнктуры рынка, наибольший прирост стоимости (+50%) для запасных частей автомобилей марки *Kia* приходится на тормозные колодки (ТК) и тормозные диски (ТД). Значительное увеличение финансового обеспечения технической эксплуатации автомобилей, косвенно провоцирует частных автовладельцев экономить на техническом обслуживании, снижая эффективность технической эксплуатации автомобилей в целом и уровень безопасности дорожного движения.

**Степень разработанности темы.** Повышению надежности и работоспособности тормозных систем (ТорС) и повышению эффективности эксплуатации автомобилей были посвящены работы: А. И. Швеева, Г.В. Осипова, А.А. Ревина, В.Г. Дыгало, Р. В. Нуждина, Д. А. Соцкова, И.А. Успенского, И.А. Юхина, Г.Д. Кокорева, В. И. Клименко, Д. Н. Леонтьева, А.В. Бойко, А.Н. Доморозова, А. А. Смолина, А.Н. Степанова, Д. А. Болдырева, В.А. Юдина, С.М. Мороза, В.И. Васильева, М. Ю Баженова, И.С. Аракеляна, А.В. Шарыпова, Д.А. Лазарева, Д.А. Воробьева, И.Ю. Молева, Н.А. Загороднего, *A. Grkić, S. Muždeka, C. Dvbboka* и многих других ученых в России и за рубежом. Работы ученых направлены на совершенствование методов оценки диагностирования тормозных свойств тормозной системы в основном на стенде с беговыми барабанами или пневматических систем грузовых автомобилей и автобусов.

Однако, в трудах не исследовались вопросы, посвященные оценке эксплуатационной надежности конструктивных элементов ТорС,

прогнозированию их остаточного ресурса, в частности тормозных колодок (ТК) и тормозных дисков (ТД). Результаты проведённых ранее исследований существенно улучшили методы диагностирования TopC на стендах с беговыми барабанами и обозначили дальнейшие основные направления исследований в области эксплуатационной надёжности TopC.

**Целью исследования** является повышение уровня технического обеспечения работоспособности системы активной безопасности автомобиля по элементам колесного тормозного механизма.

**Задачи исследования:**

1. Выполнить анализ безопасности дорожного движения с учетом фактора технического состояния легковых автомобилей.
2. Исследовать интенсивность работы TopC в реальных условиях эксплуатации автомобиля.
3. Определить диагностический параметр работоспособности TopC и его значения.
4. Разработать информационно-аппаратную систему сбора данных параметров торможения в реальных условиях.
5. Разработать математическую модель энергетического анализа процесса торможения.
6. Провести оценку эффективности предлагаемой методики прогнозирования остаточного ресурса элементов TopC.

**Объектом исследования** – является процесс износа тормозных колодок и тормозных дисков автомобиля малого класса.

**Предметом исследования** – являются параметры при торможении в тормозных механизмах.

**Научная новизна** работы заключается в:

1. Установлении зависимости интенсивности работы TopC от предлагаемых в дополнительной классификации условий движения.
2. Получении новых экспериментальных данных о работе трения в ТМ и установлении распределения циклового значения работы трения при торможении по экспоненциальному закону.
3. Разработке математической модели прогнозирования остаточного ресурса элементов TopC и выявлении закономерностей повышения уровня реализации их ресурса.

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Интенсивность работы TopC с учетом соотношения режимов эксплуатации легковых автомобилей на линии: «Город», «Трасса».

2. Технические решения для сбора статистической информации по параметрам торможения в установленных режимах эксплуатации легковых автомобилей.

3. Результаты экспериментальных исследований влияния удельной работы трения в тормозном механизме на ресурс тормозных колодок и тормозных дисков.

4. Применение энергетической модели при оценке остаточного ресурса элементов ТМ с предлагаемой методикой его оптимального использования.

**Теоретическая значимость** заключается в получении научно-обоснованной математической модели прогнозирования остаточного ресурса тормозных колодок и тормозных дисков транспортных средств категории М1 в зависимости от режимов эксплуатации.

**Практическая значимость** работы заключается в использовании разработанной методики прогнозирования остаточного ресурса и программ ЭВМ для обеспечения работоспособности TopC в системе технического обслуживания легковых автомобилей за счет более полного использования ресурса элементов TopC.

**Методология и методы исследования.** Проведенные научные исследования опирались на положения теории надежности машин, теорию изнашивания материалов, методы электрического измерения неэлектрических величин, математический анализ, статистическую обработку данных с помощью программного продукта *Statistika*, на основы программирования на языке *Python 3.10*, *C##* и математическое моделирование.

**Соответствие диссертационной работы паспорту специальности.**

Выполненные исследования отвечают формуле паспорта научной специальности 2.9.5. Эксплуатация автомобильного транспорта по пунктам: п.11 «Эксплуатационная надежность автомобилей, агрегатов и систем», п.12 «Закономерности изменения технического состояния автомобилей, их агрегатов и систем, технологического оборудования предприятий, совершенствование на их основе систем технического обслуживания и ремонта, определение технических нормативов», п. 13 «Жизненный цикл автотранспортных средств, рациональные сроки службы автомобилей и их элементов, технологии их утилизации, инфраструктура по утилизации АТС и отходов их эксплуатации (изношенных шин, отработанных аккумуляторов, нефтепродуктов, спецжидкостей).

**Реализация результатов работы.** Результаты диссертационного исследования применяются в учебном процессе кафедры «Автомобильный транспорт, безопасность и управления качеством» института машиностроения и автомобильного транспорта Владимирского государственного университета при изучении дисциплин «Техническая эксплуатация автомобилей», «Основы работоспособности технических систем», «Основы теории надежности», «Инструментальный контроль технического состояния автомобилей» и в ООО «АВТО-МОТОРС» (официальный дилер по реализации, сервисному и гарантийному обслуживанию автомобилей марки КИА в г. Владимир).

**Степень достоверности научных положений и результатов** обеспечиваются корректным использованием апробированных методов теории надежности машин, наличием большого объема данных, полученных в реальных условиях с помощью сертифицированных средств измерений, позволяющие получить обоснованные, достоверные и соответствующие теме диссертации и общим выводам результаты.

**Личный вклад соискателя** заключается в определении направления и проведении экспериментальных исследований, подбора комплектующих и электронных модулей для системы сбора данных, написание программного кода, обработка результатов эксперимента, анализ параметров при торможении, рукописи научных материалов.

**Апробация результатов исследований.** Основные результаты диссертационного исследования излагались и обсуждались на научно-практических международных конференциях: II Международной научной конференции молодых ученых «Инженерное и экономическое обеспечение деятельности транспорта и машиностроения», г. Гродно, р. Беларусь, 25 мая 2018 г., XX международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы эксплуатации автотранспортных средств», г. Владимир. 22-23 ноября 2018 г., LXXVIII студенческой международной научно-практической конференции. №6(77), г. Новосибирск, июнь 2019 г., XXIII международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы эксплуатации автотранспортных средств», г. Владимир. 18-19 ноября 2021 г., международной научно-практической конференции молодых ученых «Научные исследования современных проблем развития России: междисциплинарные исследования как драйвер трансформации науки», г. Санкт-Петербург, 17 февраля 2022 г., IX-ой международной научно-практической конференции «Информационные технологии и инновации на

транспорте», г. Орел, 18 мая 2023 г., XXV международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы эксплуатации автотранспортных средств», г. Владимир. 23 ноября 2023 г.

Выполнена научно-исследовательская работа: Приказ Ректора ВлГУ №35/2 от 17.02.2023 «О выполнении ХД НИР № 5440/23 временным научным коллективом». Тема: «Проектировочный расчет специального аварийно-спасательного снегоболотохода».

**Публикации.** Всего по теме исследования автором опубликовано 11 статей, 3 из которых опубликованы в журналах, рецензируемых ВАК. Получено 3 свидетельства о государственной регистрации права интеллектуальной собственности (программы ЭВМ). Получен патент на полезную модель «Тормозной стенд для отладки системы сбора данных при торможении».

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, общих выводов, списка литературы, приложений. Работа включает 31 таблицу, 75 рисунка. Список литературы состоит из 122 источников. Диссертационная работа представлена в виде рукописи, выполненной на 181 странице машинописного текста.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы, сформулированы цель, научная новизна, задачи и методы исследования, приведены основные положения, выносимые на защиту, а также сведения об апробации.

**В первой главе** проведён анализ дорожно-транспортных происшествий (ДТП), связанных с отказами ТормС. Проанализировано влияние физических процессов на техническое состояние элементов тормозной системы. Проанализированы основные неисправности и причины отказов ТормС.

**Во второй главе** рассмотрены методы диагностирования тормозной системы автомобиля с применением стационарных тормозных стендов, которые оценивают эффективность работы тормозной системы, но не предоставляют информации о техническом состоянии элементов ТормС. Встроенные средства диагностирования ориентированы только на тормозные колодки и информируют о моменте, когда уже необходимы технические воздействия, что создает определенные трудности для автовладельцев.

При обзоре существующих тормозных механизмов (ТМ) установлено, что в автомобилях корейских автопроизводителей *Hyundai/Kia* применяются тормозные механизмы с однопоршневыми суппортами. Объем автомобилей корейских автопроизводителей, в структуре парка легковых автомобилей РФ, с тормозными дисками на задней оси увеличился с 2017 года до 82%. Передние и задние тормозные диски выполнены из чугуна, имеющий установленное значение теплопроводности. Тормозные колодки производятся из различных материалов и маркируются в соответствии со стандартами *ECE R-90* и *SAE J661*, обозначающим соответствие требованиям качества и допускаются в эксплуатацию. В маркировке присутствуют буквенные обозначения (*GF, CC* и прочие), отражающие значение их коэффициента трения  $\mu$ , в зависимости от материалов изготовления ( $C = 0,15; D = 0,15 - 0,25; E = 0,25 - 0,35; F = 0,35 - 0,45; G = 0,45 - 0,55; H = 0,55 - 0,8$ ), которые оказывает влияние на их ресурс.

При движении автомобиль обладает кинетической энергией, которая гасится тормозной системой методом теплонагруженного преобразования в ТМ. Метод теплонагруженного преобразования основан на взаимодействии тормозных колодок с тормозным диском. При их контакте тратится значительная часть энергии на отделение микрочастиц материала с поверхности, за счет чего толщина ТК и ТД уменьшается. Тормозные диски совершают вращательное движение с угловой скоростью равной угловой скорости колеса  $\omega$ , пропорциональной поступательной скорости движения автомобиля  $v_a$ . При силовом взаимодействии элементов ТМ в процессе трения происходит диссипация энергии поступательного движения автомобиля в тепловую энергию через выполненную работу трения  $dA_{\text{тр}}$ :

$$dA_{\text{тр}i} = pB_i dS, \quad (1)$$

где  $p$  – давление в приводе тормозного механизма, МПа;  $B_i$  – комплексный параметр тормозного механизма,  $\text{см}^2$ ;  $dS$  – путь автомобиля за время трения пары колодка-диск, м.

Комплексный параметр тормозного механизма  $i$ -ой оси оценивается значениями конструктивных параметров элементов ТМ.

$$B_i = F_{\text{ци}} \frac{r_{\text{тр}i}}{r_d} K_3 \eta, \quad (2)$$

где  $F_{\text{ци}}$  – площадь цилиндра тормозного суппорта  $i$ -ой оси,  $\text{см}^2$ ;  $r_{\text{тр}i}$  – средний радиус трения тормозных дисков и колодок  $i$ -ой оси, см;  $r_d$  – динамический радиус колеса, см;  $K_3$  – коэффициент эффективности

дисковых тормозных механизмов, принимается равным коэффициенту трения  $\mu$ ;  $\eta$  – коэффициент полезного действия тормозного механизма.

Путь автомобиля  $dS$  в процессе торможения формируется в условиях изменения скорости  $v(t)$  за время торможения  $t$ . Изменение  $v(t)$  оценивается замедлением  $j(t)$  автомобиля  $j(t) = v'(t)$ . Во временном интервале процесса торможения, замедление  $j(t)$  величина переменная до момента стабилизации его значения на уровне  $j_{уст}$  (рис. 1).

Изменение скорости при замедлении  $j(t)$  можно выразить следующим выражением:

$$v(t) = v_0 \pm j(t)t, \quad (3)$$

где  $v_0$  – начальная скорость при торможении, км/ч;  $j(t)$  – замедление при торможении в момент времени  $t$ . Тогда путь автомобиля  $S$  за время торможения  $t$  будет зависеть от изменения скорости  $v$  в каждый момент времени  $t$ :

$$\Delta S = \int_0^t v(t)dt = \int_0^t (v_0 \pm j(t)t)dt. \quad (4)$$

С учетом вышеизложенного, работу трения можно представить в пределах времени трения  $t_{тр}$ , когда тормозные колодки взаимодействуют с тормозным диском:

$$\Delta A_{тpи} = pB_i \int_0^t (v_0 \pm j(t)t)dt = pB_i \left( v_0 t_{тр} \pm j_{уст} \frac{t_{тр}^2}{2} \right) \quad (5)$$

Приращение температуры тормозного механизма при торможении (без учета теплоотдачи в окружающую среду):

$$\Delta T_i = \frac{A_{тpи}}{2c_i m_i}, \quad (6)$$

где  $c_i$  – теплоемкость материала тормозного диска, кДж/К;  $m_i$  – масса тормозного диска, кг.

Уровень энергонагруженности ТМ существенно влияет на изменение значения конструктивного параметра (толщины) ТД и ТК. От значения конструктивного параметра ТД и ТК зависит эксплуатационный и остаточный ресурс ТМ в целом.

**В третьей главе** рассмотрены условия эксплуатации автомобилей и категории дорог в центральном федеративном округе (ЦФО), на которых проводились экспериментальные исследования. Непосредственно во Владимирской области расположены

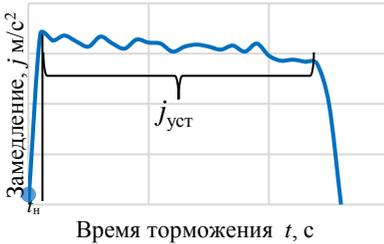


Рисунок 1 – Зависимость

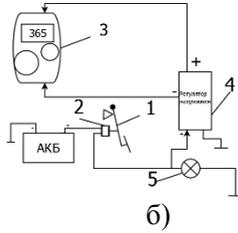
замедления от времени торможения

автомобильные дороги общего пользования регионального и межмуниципального значения, общая протяженность которых превышает 5000 км (от категории I до V категории).

Для оценки интенсивности эксплуатации автомобиля и работы ТопС было применено специальное техническое решение – счетчик рабочих циклов (рц), интегрированный в электрическую цепь тормозной системы автомобиля *Kia ceed* с механической коробкой переключения передач (рис. 2).



а)



б)

Рисунок 2 – Внешний вид а) и схема подключения счетчика б):

- 1 – педаль тормоза, 2 – концевик педали тормоза, 3 – счетчик,  
4 – регулятор напряжения, 5 – лампа стоп-сигнала

Удельное значение рабочих циклов ТопС на 1 км пробега определяется по выражению:

$$q = N/L, \quad (7)$$

где  $N$  – количество рабочих циклов ТопС;  $L$  – наработка, км.

Оценка удельного значения рабочих циклов ТопС осуществлялась при эксплуатации в реальных условиях на дорогах ЦФО.

Результаты расчета удельного показателя рц ТопС позволили оценить ее интенсивность  $q_{Ni}$  в зависимости от категорий дорог (табл. 1).

Таблица 1– Интенсивность работы ТопС

Категория дорог	Идентификационный номер дорог	Удельное значение $q_{Ni}^{cp}$
I	М-7 «Волга», 17 Р – 1, К-155, К-346,	0,1
II	17 Р – 1, К-090, К-111,	0,1
III	17 А – 2, 17 К – 2, 17 К – 3, Н-036, Н-106	0,4
IV	17 К – 12, 17 К – 17, К-081,	1,6
V	17 Н – 370, 17 Н – 427, Н-168	6,8

Существенное отличие удельных значений интенсивности работы ТопС заметно только между I и V категориями дорог. В связи с невозможностью объективной оценки интенсивности работы ТопС на разных категориях дорог в реальных условиях, предложена классификация режимов эксплуатации: «Город» и «Трасса». К режиму «Город» предлагается относить эксплуатацию в административных

границах населенного пункта. К режиму «Трасса» - эксплуатацию по всем региональным, федеральным трассам, скоростным дорогам и пр. за пределами административных границ населенных пунктов.

За период наблюдения на интервале пробега  $L$  более 25000 км в смешанных режимах было совершено около 120000 рц ТопС (табл. 2).

Таблица 2 – Значения параметров работы ТопС

Режим	Наработка		Количество срабатываний ТопС		Удельное значение интенсивности работы ТопС
	$L_i$ , км	%	$N_i$ , рц	%	$q_{Ni}$ , рц/км
Город	14356	56,78	114954	96,29	8,01
Трасса	10927	43,22	4426	3,71	0,41
Итого	25283	100	119380	100	-

При эксплуатации с разным соотношением режимов «Город» и «Трасса» был введен специальный коэффициент – коэффициент Кокарева  $K_K$ , который определяется количеством рабочих циклов ТопС и наработкой автомобиля в соответствии с предложенным выражением (8). Обработывая, полученные в реальных условиях эксплуатации значения общего количества рабочих циклов ТопС  $N=119380$  и наработку  $L=25283$  км, получим:

$$K_K = \frac{N}{L} = \frac{119380}{25283} = 4,72. \quad (8)$$

Введенный коэффициент Кокарева  $K_K$  показывает интенсивность работы ТопС с разным соотношением режимов эксплуатации автомобиля и может назначаться в качестве диагностического параметра интенсивности работы ТопС. Оценка значений диагностического параметра при заданных соотношениях режимов эксплуатации осуществлялась по специальной системе уравнений (9), которое легло в основу программы ЭВМ для определения значений  $K_K$ . Программа «Определение коэффициента Кокарева» защищена свидетельством о государственной регистрации программы ЭВМ.

$$\left\{ \begin{array}{l} L_1^i = \frac{L}{100} i, \text{ где } i = 1 \dots 100; \\ L_2^i = L - L_1^i; \\ N_1^i = L_1^i q_{N1}^{cp}, \text{ при } q_{N1}^{cp} = 8,01; \\ N_2^i = L_2^i q_{N2}^{cp}, \text{ при } q_{N2}^{cp} = 0,41; \\ N^i = N_1^i + N_2^i; \\ K_K^i = \frac{N^i}{L}, \end{array} \right. \quad (9)$$

где  $L$  – принятая наработка, км;  $i$  – принятый процент пробега в режиме «Город», %.

Полученные значения диагностического параметра  $K_K$  регистрировались на интервале наработки более 25000 км (табл. 3).

Таблица 3 – Значения диагностического параметра

Соотношение режимов, % / %	Пробег в режиме «Город» $L_1$ , км	Пробег в режиме «Трасса» $L_2$ , км	Кол-во рц ТопС в режиме «Город» $N_1$ ,	Кол-во рц ТопС в режиме «Трасса» $N_2$ ,	Диагностический параметр, $K_K$ , рц/км
10 / 90	2528	22755	20252	9329	1,17
20 / 80	5057	20226	40503	8293	1,93
30 / 70	7585	17698	60755	7256	2,69
40 / 60	10113	15170	81007	6220	3,45
50 / 50	12642	12642	101258	5183	4,21
60 / 40	15170	10113	121510	4146	4,97
70 / 30	17698	7585	141762	3110	5,73
80 / 20	20226	5057	162013	2073	6,49
90 / 10	22755	2528	182265	1037	7,25

Режимы эксплуатации автомобиля и интенсивность его работы оказывают прямое влияние на техническое состояние и остаточный ресурс элементов ТопС. Установлено, что для таких элементов ТопС как ТД и ТК, информации о количестве рабочих циклов  $N$  недостаточно. Работоспособное состояние ТД и ТК зависит от их структурного параметра – остаточной толщиной рабочего тела. Поэтому предлагается для оценки работоспособного состояния ТД и ТК учитывать следующие параметры:

- скорость автомобиля в процессе торможения,  $v$ ;
- сила, действующая на тормозную колодку, зависящая от давления тормозной жидкости в гидравлическом приводе тормозной системы,  $p$ ;

- время, в течение которого осуществлялось трение пары колодка-диск,  $t_{тр}$ .

Для получения значений указанных параметров разработана информационно-аппаратная система сбора данных (ССД) при торможении из электронных модулей и аналого-цифровых преобразователей электронного сигнала неэлектрических величин (рис. 3). ССД предназначена для фиксации значений параметров в реальных условиях по специальному алгоритму (рис. 3). С целью снижения трудоемкости дорожных испытаний был разработан лабораторный тормозной стенд (рис. 4), на котором выполнялась тарировка датчиков и отладка работы ССД.



Рисунок 3 – Информационно-аппаратная система сбора данных



Рисунок 4 – Отладочный тормозной стенд

Настроенная информационно-аппаратная ССД интегрировалась на автомобиль *Kia c'eed* с целью получения значений параметров при торможении в реальных условиях эксплуатации. Перед началом исследования процесса торможения было выполнено техническое обслуживание тормозной системы, в соответствии с требованиями нормативно-технической документацией и контроль конструктивных параметров элементов ТопС с использованием контрольно-измерительных приборов в соответствии с ГОСТ Р 8.674-2009.

В ходе проведения экспериментального исследования все значения параметров при торможении записывались на *SD* карту. Значения фиксировались в цифровом коде электронного сигнала, которые в последствии программным методом преобразовались в цифровой формат в соответствии с принятой системой измерения ( $p$ -МПа,  $v$ -м/с,  $t$ -с).

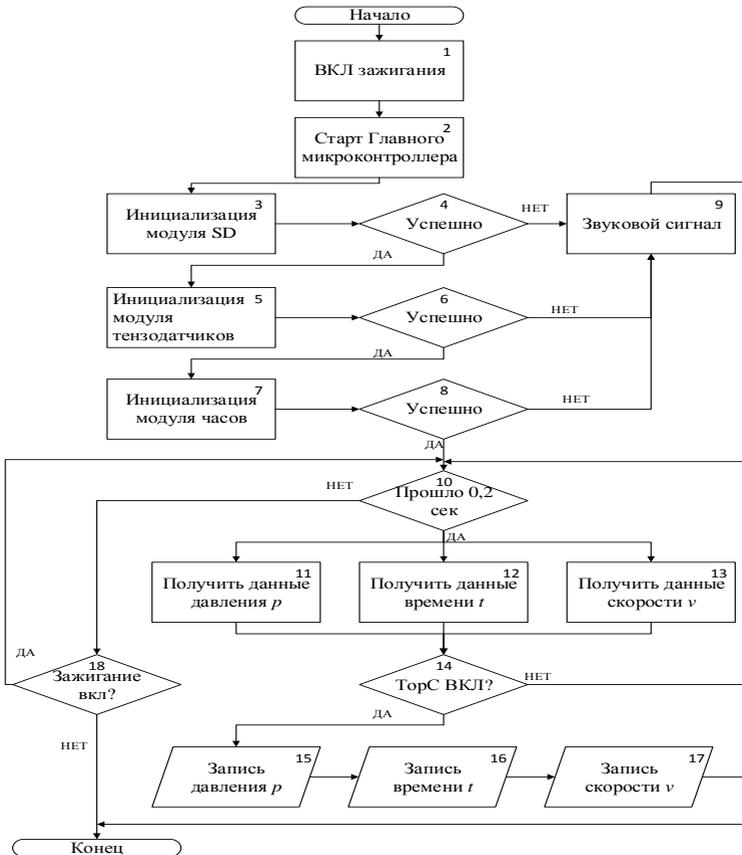


Рисунок 3 – Схема работы ССД

Всего за период наблюдения наработки в 15700 км с применением информационно-аппаратной системой сбора данных было зафиксировано более 5 млн записей значений каждого параметра.

**В четвертой главе** определены зависимости параметров при торможении. Сохраненные значения параметров при торможении в реальных условиях с *SD* карты копировались в каталог базы данных на персональном компьютере в формате *CSV*. Для обработки значений электрических сигналов и детализации каждого параметра торможения была использована среда программирования на языке *Python*. Обработанные значения параметров при торможении в реальных условиях были проанализированы с помощью пакета программного продукта *Statistica 13.0*.

Зависимость времени трения описывается полиномом второго порядка, который имеет вид:

$$f(t_{\text{тр}}) = 1,0302 + 0,0398S - 0,2248p - 0,000045S^2 + \\ + 0,0018Sp + + 0,0593p^2, \quad (10)$$

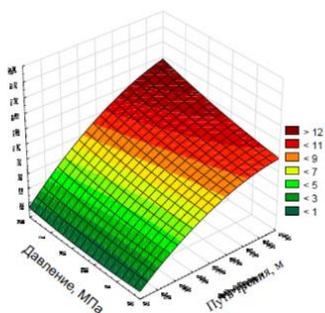


Рисунок 6 – Зависимость времени трения

параметров в процессе торможения со временем трения до 3,6 с располагаются в зеленой зоне, не достигая критической красной зоны.

Путь, за который произошло изменение скорости при торможении описывается полиномом второго порядка, который имеет вид:

$$f(S) = -19,5283 + 33,5268p + 7,1958t_{\text{тр}} - 0,9883p^2 - \\ - 2,1463pt_{\text{тр}} - 1,8457t_{\text{тр}}^2. \quad (11)$$

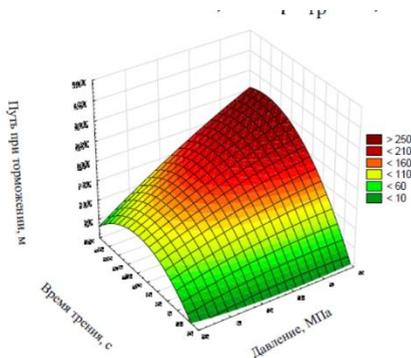


Рисунок 7 – Зависимость пути торможения

где  $S$  – путь автомобиля за время трения пары колодка-диск, м;  $p$  – давление тормозной жидкости, МПа.

Графическая интерпретация выражения 10 представлена на рисунке 6. Анализ полученных в реальных условиях значений времени трения пары колодка-диск при торможении показывает, что 75% рабочих циклов TopC происходит на интервале от 0,1 с до 3,6 с. В соответствии 3-х мерным графиком (рисунок 6) значения

Графическая интерпретация выражения 11 представлена на рисунке 7.

Изнашивание элементов ТМ определяется за путь автомобиля, при котором осуществляется взаимодействие элементов ТМ. Путь оценивается изменением скорости движения автомобиля при торможении. Анализ изменения скорости автомобиля при торможении позволяет сделать вывод, что 75 % рабочих циклов

ТорС осуществляется за путь равный 24 м, что соответствует только зеленому цвету шкалы.

Распределение давления тормозной жидкости при торможении описывается полиномом второго порядка, который имеет вид:

$$f(p) = 1,6782 + 0,0719t_{\text{тр}} - 0,007S - 0,0028t_{\text{тр}}^2 - \quad (12)$$

$$-0,00003t_{\text{тр}}S + 0,000014S^2.$$

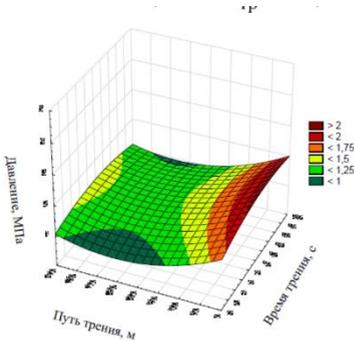


Рисунок 8 – Зависимость давления тормозной жидкости

Графическая интерпретация выражения 12 представлена на рисунке 8.

Исследованные параметры при торможении оказывают влияние на работоспособность тормозных колодок и тормозных дисков путем изменения их структурного параметра – толщины.

Процесс торможения в эксплуатации не всегда происходит до полной остановки автомобиля, т.е. конечная скорость торможения не равна нулю. В ходе проведения исследования было установлено, что в процессе торможения начальная  $v_0$  и конечная  $v_k$  скорости могут быть одинаковы (например, торможение с уклона)  $v_0 = v_k$ . Оценка величины совершаемой работы трения в тормозном механизме при торможении происходит за тормозной путь, который определяется изменением скорости за каждый интервал времени трения  $t_{\text{тр}}$ . Для корректной оценки совершаемой работы трения необходимо применить систему уравнений, которая будет выглядеть следующим образом:

$$\begin{cases} A_i = pB_i \left( v_0 t_{\text{тр}} \pm j_{\text{уст}} \frac{t_{\text{тр}}^2}{2} \right), & \text{при } v_0 \neq v_k \\ A_i = pB_i v_0 t_{\text{тр}}, & \text{при } v_0 = v_k \end{cases} \quad (13)$$

В виду того, что конструктивные параметры передней и задней оси различаются, то целесообразно принимать во внимание удельные значения энергетических характеристик, относящихся к площади рабочей поверхности элемента тормозного механизма по следующим выражениям:

$$\left\{ \begin{array}{l} q_{Ai} = \frac{pB_i \left( v_0 t_{\text{тp}} \pm j_{\text{уст}} \frac{t_{\text{тp}}^2}{2} \right)}{F_{\text{иH}}}, \text{ при } v_0 \neq v_{\text{к}} \\ q_{Ai} = \frac{pB_i v_0 t_{\text{тp}}}{F_{\text{иH}}}, \text{ при } v_0 = v_{\text{к}}, \end{array} \right. \quad (14)$$

Средние значения энергетических характеристик за один рабочий цикл ТорС по выражениям 13 и 14 представлены в таблице 4.

Таблица 4 – Значения энергетических характеристик

Характеристика торможения	Ось автомобиля	
	Передняя	Задняя
Работа трения $A_i$ , кДж	3,33	0,86
Удельная работа трения $q_{Ai}$ , кДж/см <sup>2</sup>	0,01063	0,00446
Мощность трения $W_i$ , Вт	1,14	0,29
Удельная мощность трения $q_{Wi}$ , Вт/см <sup>2</sup>	3,65	1,55
Приращение температуры нагрева, °С	157	71

Рабочий цикл тормозной системы характеризуется значением удельной работы, совершаемой в тормозном механизме. От значения выполняемой работы зависит величина износа тормозных колодок и тормозных дисков.

Удельный износ элементов ТорС определяется по выражению:

$$q_{Ui} = \frac{U_{\text{max}i}}{N}, \quad (15)$$

где  $q_{Ui}$  – удельный износ элемента ТМ за рабочий цикл  $i$ -ой оси автомобиля,  $U_{\text{max}}$  – максимальное значение линейного износа элемента ТорС  $i$ -ой оси автомобиля;  $N$  – количество рабочих циклов ТорС.

Энергетическая интенсивность изнашивания  $J_{qA1}$ , показывающая необходимое значение удельной работы трения для совершения износа 1 мм:

$$J_{qAi} = \frac{q_{Ai}}{q_{Ui}} = \left\{ \begin{array}{l} \frac{pB_i \left( v_0 t_{\text{тp}} \pm j_{\text{уст}} \frac{t_{\text{тp}}^2}{2} \right) N}{F_{\text{иH}} U_{\text{max}i}}, \text{ при } v_0 \neq v_{\text{к}} \\ \frac{pB_i v_0 t_{\text{тp}} N}{F_{\text{иH}} U_{\text{max}i}}, \text{ при } v_0 = v_{\text{к}} \end{array} \right. \quad (16)$$

Интенсивность работы тормозной системы зависит от соотношения режимов эксплуатации автомобиля, оцениваемое  $K_K$ . Эксплуатация автомобиля осуществляется с определенным интервалом наработки технического обслуживания (межсервисный интервал - МСИ). МСИ регламентирован заводом-изготовителем и для автомобилей марки *Kia* категории М1, которые эксплуатируются в умеренном климатическом районе, составляет 15000 км. За период 15000 на износ ТД и ТК сказывается влияние эксплуатации в смешанных режимах и совершаемая работа в тормозных механизмах. Для оценки совершаемой удельной работы в межсервисный интервал, воспользуемся выражением:

$$q_{Ai}^{МСИ} = \frac{pB_i \left( v_0 t_{тр} \pm j_{уст} \frac{t_{тр}^2}{2} \right)}{\sum F_{ин}} \cdot L_{ТО} \cdot K_K \quad (17)$$

где  $L_{ТО}$  – межсервисный интервал технического обслуживания.

Остаточная толщина рабочих тел элементов ТорС оценивается измерительными приборами и учитывается при энергетическом анализе. Энергетический анализ позволяет оценить остаточную удельную работу:

$$q_{Ai}^{ост} = \frac{pB_i \left( v_0 t_{тр} \pm j_{уст} \frac{t_{тр}^2}{2} \right) N}{\sum F_{ин} U_{maxi}} \cdot (Y_{\phi i} - Y_{пред i}), \quad (18)$$

где  $Y_{\phi i}, Y_{пред i}$  – фактическое и предельное значения толщины рабочего тела элемента ТорС  $i$ -ой оси автомобиля.

С учетом фактических толщин ТД и ТК и параметров при торможении энергетические величины будут иметь при  $K_{\kappa}=4,72$ , определенные значения, отраженные в таблице 5.

Таблица 5 – Значение энергетических показателей ТорС

Характеристика	Тормозные колодки		Тормозные диски	
	Пер. ось	Зад. ось	Пер. ось	Зад. ось
Энергетическая интенсивность изнашивания $J_{qA1}$ , (кДж/см <sup>2</sup> /мм)	130,3	143,1	2726,6	1232,9
Остаточная удельная работа трения $q_{Ai}^{ост}$ , кДж/см <sup>2</sup>	604,5	560,9	5862,2	1676,7

Основываясь на теории надежности получим условие прогнозирования остаточного ресурса толщины элементов ТорС по значению удельных работ:

$$\left. \begin{aligned}
 q_{Ai}^{МСИ} &= \begin{cases} \frac{pB_i \left( v_0 t_{тр} \pm j_{уст} \frac{t_{тр}^2}{2} \right) L_{ТО} K_K}{\sum F_{in}}, & \text{при } v_0 \neq v_K \\
 \frac{pB_i v_0 t_{тр} L_{ТО} K_K}{\sum F_{in}}, & \text{при } v_0 = v_K \end{cases} \\
 q_{Ai}^{ост} &= \begin{cases} \frac{pB_i \left( v_0 t_{тр} \pm j_{уст} \frac{t_{тр}^2}{2} \right) N}{\sum F_{in} U_{maxi}}, & \text{при } v_0 \neq v_K \\
 \frac{pB_i v_0 t_{тр} N}{\sum F_{in} U_{maxi}}, & \text{при } v_0 = v_K \end{cases} \\
 &\text{при } q_{Ai}^{ост} > q_{Ai}^{МСИ}.
 \end{aligned} \right\} (19)$$

В процессе диссертационного исследования выдвинуто предложение о дополнительной классификации условий движения (ДКУД) автомобилей: I) Поездки выходного дня за город; II) Работа – дом – загород; III) Работа – дом; IV) Такси, курьерские службы и пр. Результаты энергетического анализа элементов ТМ автомобиля *Kia c'eed* с учетом дополнительной классификации условий и режимов движения представлены на рисунке ниже.

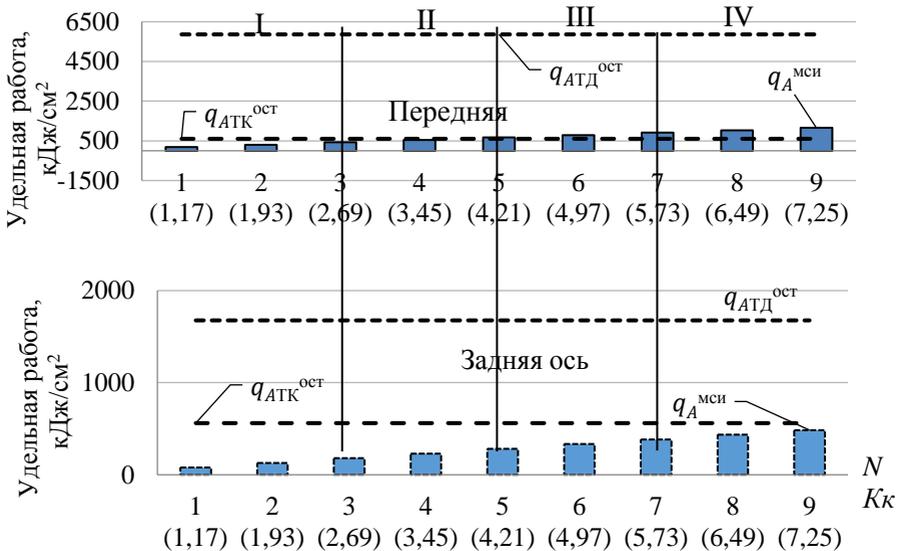


Рисунок 7 – Сравнительный анализ остаточной и межсервисной удельной работы трения ТМ

Сравнение значений  $q_{Ai}^{ост}$  и  $q_{Ai}^{мси}$  (табл. 5 и рис. 7) дают основания утверждать, что остаточного ресурса передних тормозных колодок будет достаточно для эксплуатации в условиях движения второй группы ДКУД (Работа – дом - загород). Толщины передних, задних ТД и задних колодок будет достаточно для эксплуатации автомобиля во всех условиях и режимах движения.

Методика прогнозирования остаточного ресурса (рис. 8) ТК и ТД способствует обеспечению работоспособности не только рассматриваемых элементов, но и всей тормозной системы, от технического состояния которой в первую очередь зависит безопасность дорожного движения.

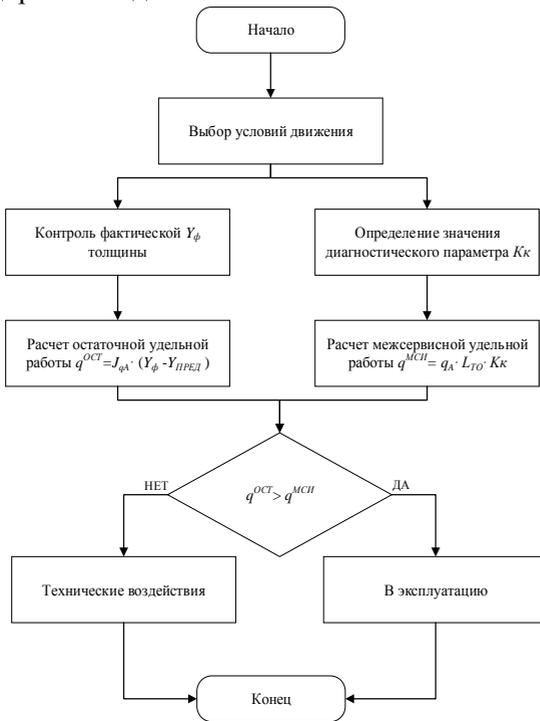


Рисунок 8 – Схема методики прогнозирования остаточного ресурса элементов ТормС

колодок:  $Y_{рабi} = Y_{номi} - Y_{пред}$ . По значениям удельных работ определим номинальное количество технических обслуживаний  $N_{НОМ}^{ТО} = q_{Ai}^{ост} / q_{Ai}^{мси}$ . Тогда экономическую эффективность  $\mathcal{E}_i$  найдем по формуле:

$$\mathcal{E}_i = (C_k Y_{раб} L^{ТО}) / (Y_{НОМ} N_{НОМ}^{ТО} L^Г) \quad (19)$$

На конец 2023 года минимальная стоимость  $C_{к1}$  комплекта передних тормозных колодок для *Kia ceed* марки *TRW GDB 3450* с учетом конъюнктуры рынка составляет 3611 руб., а задних  $C_{к2} = 3015$  руб. Номинальное значение  $Y_{ном1}$  толщины новых тормозных колодок *TRW GDB 3450* составляет 17,5 мм,  $Y_{ном2} = 16,5$  мм предельное значение  $Y_{пред}$  составляет 7,0 мм.

Для оценки финансового результата применения методики прогнозирования остаточного ресурса, определим рабочую толщину  $Y_{рабi}$  тормозных

где  $L^Г$  – годовой пробег, км.

Анализ результатов расчета экономической эффективности применения методики прогнозирования остаточного ресурса элементов ТопС показывает, что экономия на автомобиль при годовом пробеге  $L^Г = 15000$  км на передних и задних тормозных колодках марки *TRW GDB 3450* на автомобиль составит в среднем: - для эксплуатации в I группе ДКУД – 556,18 руб.; - во II группе – 327,26 руб.; - в III группе – 424,68 руб.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненные исследования, реализованные в оперативной оценке технического состояния и прогнозирования остаточного ресурса ТД и ТК способствуют повышению работоспособности ТопС и эффективности технической эксплуатации автомобилей. Диссертационное исследование основано на анализе энергонагруженности тормозного механизма при эксплуатации автомобиля в реальных условиях. Основные научно-практические результаты заключаются в следующем:

1. Выполнен анализ безопасности дорожного движения, по результатам которого установлено, что в год в ДТП погибает до 637 человек из-за потери работоспособности ТопС. Увеличение стоимости запасных частей негативно влияет на финансово-экономические показатели в сфере технической эксплуатации автомобилей. Техническое состояние элементов ТМ имеет решающее значение в оценке эффективности работы всей ТопС. Существующая нормативно-техническая документация не регламентирует методы оценки остаточного ресурса элементов ТопС.

2. Исследована интенсивность работы ТопС на дорогах ЦФО с I по V категории, которая характеризуется количеством рабочих циклов за км пробега. Существенное различие в количестве рабочих циклов ТопС на разных категориях дорог наблюдается только между I и V категориями и составляет 0,1 и 6,8 р.ц./км соответственно. Предложена классификация режимов эксплуатации автомобиля: «Город», «Трасса». Установлено, что работоспособность тормозных дисков и колодок зависит от интенсивности работы ТопС при различных соотношениях предложенных режимов эксплуатации. Предлагается производить оценку соотношения предложенных режимов эксплуатации с помощью специального коэффициента Кокарева.

3. Введенный коэффициент Кокарева  $K_K$  назначен в качестве диагностического параметра и позволяет оценивать интенсивность

работы TopC в смешанных режимах эксплуатации автомобиля, оказывающих влияние на ресурс элементов TopC. Обоснованные значения  $K_K$  изменяются от 1,17 для эксплуатации автомобиля 10% в режиме «Город» и 90% в режиме «Трасса» и до 7,25 для эксплуатации 90% в режиме «Город» и 10% в режиме «Трасса».

4. Разработана информационно-аппаратная система сбора данных при торможении, позволяющая фиксировать значения параметров при торможении с частотой 5 Гц или 72000 значений за один час эксплуатации. Достоверность результатов исследования обеспечивается массивом данных более 5 млн. значений каждого параметра и электронных компонентов ССД на отладочном тормозном стенде, защищенным патентом на полезную модель. Полученный массив данных обрабатывался специально разработанной программой, написанной на языке *Python*;

5. Разработана математическая модель энергетического анализа процесса торможения для оценки остаточного ресурса ТК и ТД. Остаточная удельная работа  $q_{Ai}^{OCT}$  трения зависит от остаточной толщины элементов ТМ. Межсервисная удельная работа  $q_{Ai}^{MCI}$  трения оценивается значением диагностического параметра и межсервисным интервалом технического обслуживания автомобиля. Определено, что при остаточной толщине передних ТК *Kia c'eed* 11,64 мм значение остаточной удельной работы ТМ передней оси будет  $q_{A1}^{OCT}=684,5$  кДж/см<sup>2</sup>. Значение  $q_{A1}^{OCT}$  превосходит значение  $q_{A1}^{MCI}$  только в I и II группе дополнительной классификации условий движения. Для эксплуатации в III и IV группе ДКУД требуется замена передних ТК.

6. Выполнена оценка эффективности методики прогнозирования ресурса элементов ТМ. Экономия финансовых ресурсов в год составляет от 327,26 до 556,18 руб. на один автомобиль при среднегодовом пробеге 15000 км за счет более полной реализации ресурса элементов TopC.

### **Перспективы дальнейшей разработки темы**

Полученные теоретические и экспериментальные результаты позволяют сформулировать перспективы дальнейшей разработки темы, которая заключается в получении параметров торможения через бортовые средства, что предоставляет возможность осуществлять контроль за работоспособность TopC в реальных условиях и в режиме реального времени.

### **Основные результаты диссертационного исследования опубликованы в работах:**

– в изданиях перечня ВАК:

1 Кокарев, О.П. Методика оперативного прогнозирования остаточного ресурса элементов тормозной системы / Кокарев О.П., Кириллов А.Г., Ратников А.С. // Вестник гражданских инженеров. – 2020. - №78. – Т1. – С. 168-172.

2 Кокарев, О.П., Исследование влияния режимов работы тормозных механизмов на надежность элементов тормозной системы / Кокарев О.П., Кириллов А.Г, Нуждин Р.В // Техничко-технологические проблемы сервиса. – 2022. – №1(59). – С. – 23-27.

3 Кокарев, О. П. Оценка ресурса элементов тормозной системы / О. П. Кокарев, А.Г. Кириллов, Р.В. Нуждин // Мир транспорта и технологических машин. – 2023. – № 3-3(82). – С. 16-23.

*– патенты РФ:*

4. Автоматизированная система оценки износа систем транспортных средств: свидетельство регистрации программы ЭВМ № 2019662723/ О.П. Кокарев, А.Г. Кириллов, Д.Ю. Орлов. - №: 2019619979: заявл. 12.08.2019; опубл. 02.10.2019.

5. Прогнозирование износа и определения остаточного ресурса тормозных дисков и колодок автомобиля: свидетельство регистрации программы ЭВМ № 2020615682/ О.П. Кокарев, А.Г. Кириллов, Д.Ю. Орлов. - № 2020614465: заявл. 19.05.2020; опубл. 29.05.2020.

6. Определение коэффициента Кокарева: свидетельство регистрации программы ЭВМ № 2022619257/ О.П. Кокарев, А.Г. Кириллов, Р.В. Нуждин. - № 2022615236: заявл. 25.03.2022; опубл. 19.05.2022.

7 Кокарев О.П. Патент на полезную модель № 221477 Российская Федерация, МПК В60Т 17/22 G01L 5/28 G01M 17/00. Тормозной стенд отладки системы сбора данных при торможении/ О.П. Кокарев, А.Г. Кириллов, Р.В. Нуждин. - № 2023119203; заявл. 19.07.2023 : опубл. 08.11.2023

*прочие публикации:*

8 Кокарев, О.П. Методика выбора обобщенного параметра диагностирования автомобиля / О.П. Кокарев, А.Г. Кириллов // Состояние и перспективы развития социально-культурного и технического сервиса . – Бийск : Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, 2014. – С. 95-98.

9 Кокарев, О. П. Влияние насыщенности парка автомобилей на безопасность дорожного движения / О.П. Кокарев, А.Г. Кириллов, Е.В. Кокарева [и др.] // Актуальные проблемы эксплуатации автотранспортных средств . – Владимир : ВлГУ, 2018. – С. 50-53.

10 Кокарев, О.П. Определение доминирующих марок автомобилей на вторичном рынке России / О.П. Кокарев, А.Г. Кириллов, Е.В. Кокарева // Инженерное и экономическое обеспечение деятельности транспорта и машиностроения . – Гродно : ГрГУ им. Янки Купалы, 2018. – С. 119-122.

11 Кокарев, О.П. Обзор датчиков определения предельного износа тормозной колодки / О.П. Кокарев, А.Д. Цыганков, Д.А. Новожилов // Студенческий : электронный журнал. – URL: [http://www.sibac.info/archive/Technic/6\(77\)](http://www.sibac.info/archive/Technic/6(77)). – Дата публикации: 2019.

12 Кокарев, О.П. Исследование влияния применяемых тормозных колодок с разными коэффициентами трения / О.П. Кокарев, А.Д. Цыганков // Студенческий : электронный журнал. – URL: [https://sibac.info/archive/journal/student/3\(89\\_2\)](https://sibac.info/archive/journal/student/3(89_2)). – Дата публикации: 2020.

13 Кокарев, О.П. Исследование надежности механизмов тормозных систем автомобилей / О.П. Кокарев, А.Г. Кириллов, Д.Н. Смирнов // Информационные технологии и инновации на транспорте . – Орел : Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева, 2020. – С. 269-275.

14 Кокарев, О.П. Калибровка тензодатчика давления в тормозном механизме / О.П. Кокарев, А.Г. Кириллов, М.В. Латышев // Актуальные проблемы эксплуатации автотранспортных средств . – Владимир : ВлГУ, 2021. – С. 41-47.

15 Кокарев, О.П. Термонагруженность элементов тормозной системы при торможении / О.П. Кокарев, А.Г. Кириллов // Актуальные проблемы эксплуатации автотранспортных средств . – Владимир : ВлГУ, 2023. – С. 38-43.