

*На правах рукописи*



**ВОРОБЬЕВ ДЕНИС АЛЕКСАНДРОВИЧ**

**ДИАГНОСТИРОВАНИЕ ИЗНОСА ТОРМОЗНОЙ КОЛОДКИ  
ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА**

Специальность: 05.20.03 – Технологии и средства технического обслуживания в  
сельском хозяйстве

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Рязань – 2022

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Рязанский государственный агротехнологический университет имени П.А. Костычева» (ФГБОУ ВО РГАТУ)

**Научный руководитель:** кандидат технических наук  
**Лимаренко Николай Владимирович**

**Официальные оппоненты:** **Асоян Артур Рафикович**, доктор технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ)», профессор кафедры «Эксплуатация автомобильного транспорта и автосервис»  
**Голубев Иван Григорьевич**, доктор технических наук, профессор, ФГБНУ «Росинформагротех», заведующий отделом научно-информационного обеспечения инновационного развития АПК

**Ведущая организация:** федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва» (ФГБОУ ВО «МГУ им. Н.П. Огарёва»)

Защита диссертации состоится «21» сентября 2022 года в 14.00 часов на заседании диссертационного совета Д 220.057.03 при федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Рязанский государственный агротехнологический университет имени П.А. Костычева» по адресу 390044, Рязанская область, г. Рязань, ул. Костычева, д.1, зал заседаний диссертационного совета.

С диссертацией и авторефератом можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО РГАТУ, на сайте: [www.rgatu.ru](http://www.rgatu.ru), с авторефератом – на сайте Высшей аттестационной комиссии Министерства науки и высшего образования Российской Федерации <https://vak.minobrnauki.gov.ru>.

Автореферат разослан «    » \_\_\_\_\_ 2022 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
доктор технических наук, профессор



Юхин И.А.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность исследования.** Согласно стратегии безопасности дорожного движения Российской Федерации, утверждённой распоряжением правительства РФ от 08.01.2018 № 1-р обеспечение эффективности эксплуатации подвижного состава является одним из приоритетных направлений. Нормативно-правовыми актами, регламентирующими развитие данного направления, являются ФЗ от 10.12.1995 № 196-ФЗ «О безопасности дорожного движения», постановление Правительства РФ от 05.12.2011 № 1008 «О проведении технического осмотра транспортных средств», ГОСТ Р 51709-2001 «Автотранспортные средства. Требования безопасности к техническому состоянию и методы проверки». Безопасная и эффективная эксплуатация транспортных средств является специфической и многофакторной задачей. Анализ статистических данных НИЦ ГИБДД МВД России в период с 2018 по 2022 годы показал, что причиной порядка 25 % всех ДТП является отказ рабочей тормозной системы грузового транспорта. Известно, что одним из основных элементов, обеспечивающих эффективность использования тормозной системы являются тормозные колодки. Специфика эксплуатации, которых на транспортных средствах АПК, определяется многими факторами: используемыми материалами, стилем вождения, маршрутом, качеством дорожного покрытия, периодичностью технического обслуживания и т.п. Как показал анализ информационных источников, практический опыт, существующие методы диагностирования износа тормозных колодок транспортных средств являются периодическими и не позволяют оценивать её техническое состояние. Соответственно задача разработки способа и устройства, повышающего эффективность оценки технического состояния тормозной колодки является актуальной для науки и техники.

**Степень разработанности темы.** Исследованию вопросов повышения эффективности эксплуатации тормозных систем транспортных средств АПК посвящены работы следующих учёных: А.Р. Асояна, С.Н. Бoryчева, Н.В. Бышова, И.Г. Голубева, И.К. Данилова, А.П. Иншакова, П.А. ИONOва, Е.С. Кузнецова, Н.В. Лимаренко, П.В. Сенина, А.А. Симдянкина, Г.К. Рембаловича, И.А. Успенского, И.А. Юхина и других.

Работа выполнена по плану НИР ФГБОУ ВО РГАТУ на 2019-2022 гг. по теме 3 «Совершенствование технологий, средств механизации, электрификации и технического сервиса в сельскохозяйственном производстве» в рамках раздела 3.3 «Повышение эффективности эксплуатации мобильной сельскохозяйственной техники за счет разработки новых конструкций, методов и средств технического обслуживания, ремонта и диагностирования».

**Цель исследования** – разработка метода диагностирования тормозной колодки транспортного средства агропромышленного комплекса.

**Задачи исследования:**

1. Теоретически исследовать способы диагностирования износа тормозной колодки при эксплуатации ТС.
2. Разработать устройство диагностирования износа тормозных колодок транспортного средства АПК.
3. Разработать методику экспериментальных исследований диагностирования износа тормозных колодок транспортного средства АПК.
4. Провести экспериментальные исследования износа тормозных колодок транспортного средства и математически формализовать их результаты.
5. Оценить экономический эффект созданного технического решения.

**Объект исследования** – износ тормозной колодки транспортного средства АПК.

**Предмет исследования** – диагностирование износа тормозной колодки транспортного средства АПК.

**Научная новизна работы:**

- способ и устройство измерения износа тормозной колодки;
- математические модели влияния пробега на износ тормозной колодки, давление в тормозной системе и активную мощность электродвигателя экспериментального стенда при торможении.

**Теоретическая значимость** работы заключается в получении научно-обоснованного технического решения диагностирования износа тормозных колодок транспортных средств АПК.

**Практическая значимость работы** состоит в:

- научно-обоснованном техническом решении, определяющим износ тормозных колодок в период эксплуатации ТС;
- оценке технико-экономического эффекта от использования разработанного технического решения, определяющего износ тормозных колодок в период эксплуатации ТС.

**Реализация результатов исследования.** Результаты исследования внедрены в производственную деятельность ООО «Автогарант» и используются при диагностировании износа тормозных колодок эксплуатируемых транспортных средств.

**Методы исследования.** Исследования проводились с использованием методов электрических измерений неэлектрических величин, статистического моделирования, теории вероятностей, математической теории планирования эксперимента и регрессионного анализа.

**Положения, выдвигаемые на защиту:**

– научно-обоснованное техническое решение повышения эффективности эксплуатации тормозных колодок;

– результаты теоретических и экспериментальных исследований влияния пробега на износ тормозной колодки, давление в тормозной системе и активную мощность электродвигателя экспериментального стенда при торможении;

– результаты оценки технико-экономического эффекта применения технического решения повышения эффективности эксплуатации тормозных колодок в производственных условиях.

**Степень достоверности и апробация результатов.** Проведение теоретических и экспериментальных исследований с использованием сертифицированных и поверенных средств измерений позволило получить обоснованные, достоверные и соответствующие теме диссертации и общим выводам результаты.

**Личный вклад соискателя.** Состоит в участии в формулировании цели, разработке и конкретизации задач диссертации, определении направлений теоретических и экспериментальных исследований, написании статей.

**Апробация результатов исследований.** Основное содержание диссертационной работы излагалось, обсуждалось и было одобрено на научно-практических конференциях: национальной научно-практической конференции: «Научно-инновационные технологии как фактор устойчивого развития отечественного агропромышленного комплекса» (ФГБОУ ВО РГАТУ, 12 декабря 2019 года, г. Рязань), 78 научно-методической и научно-исследовательской конференции «Проблемы технической эксплуатации и автосервиса, подвижного состава автомобильного транспорта» (МАДИ, 28-29 января 2020 года, г. Москва), международной студенческой научно-практической конференции: «Научно-практические аспекты инновационного развития транспортных систем и инженерных сооружений» (ФГБОУ ВО РГАТУ, 20 февраля 2020 года, г. Рязань), международной научно-практической конференции, посвященной 20-летию кафедры техническая эксплуатация транспорта: «Актуальные вопросы совершенствования технической эксплуатации мобильной техники» (ФГБОУ ВО РГАТУ, 12 октября 2020 года, г. Рязань), региональной студенческой научно-практической конференции: «Автомобильный транспорт: перевозки, безопасность, прогрессивные технологии» (ФГБОУ ЧГПУ им Яковлева, 26 февраля 2021 года, г. Чебоксары), международной научно-практической конференции, посвященной 95-летию заслуженного деятеля науки и техники РФ, академика РАТ, доктора технических наук, профессора Н.Н. Колчина: «Совершенствование

конструкций и эксплуатации техники» (ФГБОУ ВО РГАТУ, 27 мая 2021 года, г. Рязань).

**Публикации.** Основное содержание диссертации отражено в 11 печатных работах, в том числе: 3 в изданиях, рекомендованных ВАК, 1 патенте РФ на изобретение. Объем публикаций составляет 5,1 усл. п. л., из которых лично автору принадлежит – 3,8 усл. п. л.

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка источников, включающего 153 наименования, приложений, представленных на 26 страницах. Работа изложена на 153 страницах машинописного текста, включает 24 таблицы и 43 рисунка.

### **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цель, научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, приведены основные положения, выдвигаемые для защиты, а также сведения об апробации.

**В первой главе «Анализ состояния вопроса. Постановка цели и задач исследования»** проведён анализ влияния технического состояния тормозной системы на безопасность дорожного движения и эффективность технической эксплуатации, рассмотрено понятие износа и специфика его проявления в АПК, определены параметры его характеризующие, а также способы диагностирования. Разработана классификация без стендовых методов диагностирования износа тормозных колодок транспортных средств, эксплуатируемых в АПК. Выявлены факторы, оказывающие влияние на износ тормозных колодок транспортных средств АПК.

**Во второй главе «Теоретические исследования диагностирования износа тормозных колодок транспортных средств АПК»** изучены физические основы повышения эффективности диагностирования тормозной колодки при эксплуатации. После изучения физических основ диагностирования износа тормозной колодки был разработан элемент тормозной системы транспортного средства, эксплуатируемого в АПК (патент на изобретение №2758530). Суть разработанного решения заключается в изготовлении датчика износа составного типа, представляющего последовательно чередующиеся проводящие и непроводящие электричество части. Проводящие части соединены через световые индикаторы с аккумулятором транспортного средства, что позволяет отслеживать процесс износа тормозной колодки транспортного средства непосредственно при его эксплуатации. При этом твердость и/или толщина электропроводящих частей датчика подбирается в соответствии с градацией «допустимый», «приемлемый» и «критический» износ. Конструктивное исполнение разработанного элемента

тормозной колодки, сигнализирующего об её износе представлено на рисунке 1.

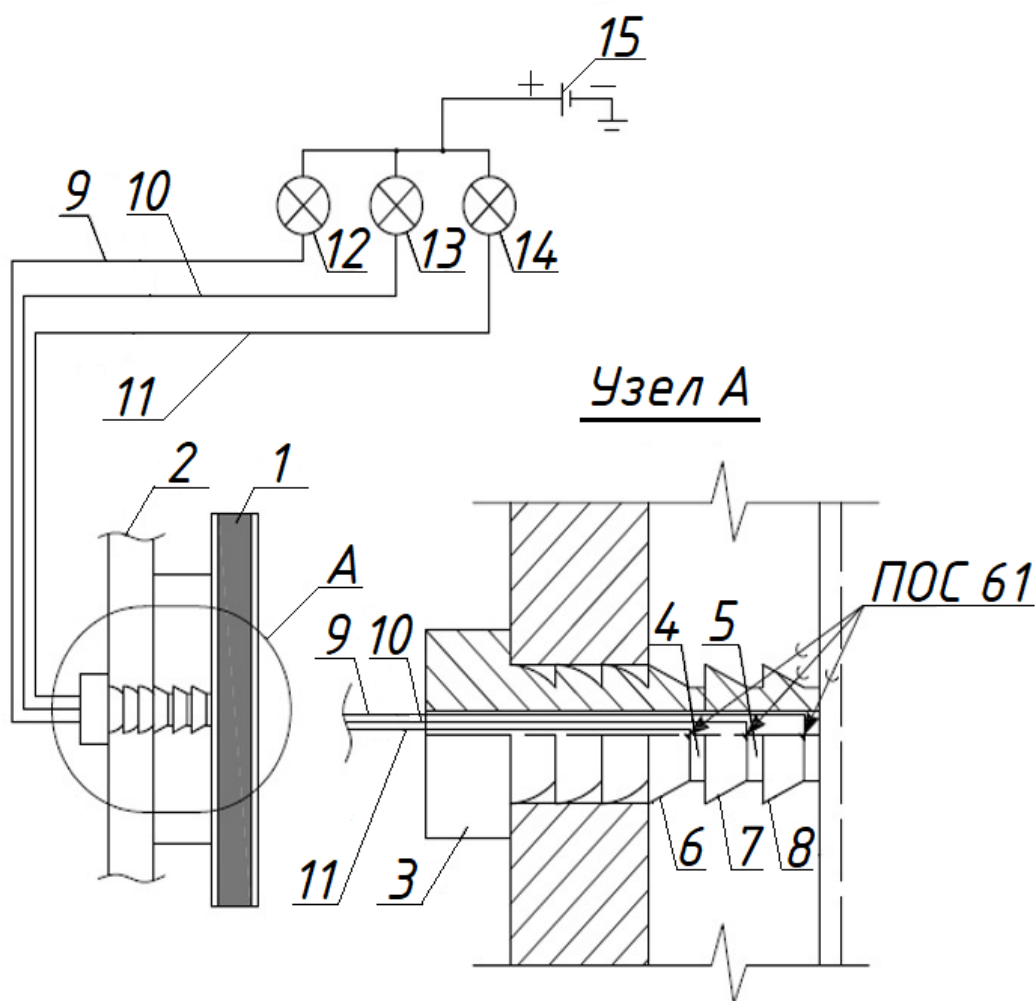


Рисунок 1 – Контактный датчик измерения величины износа тормозной колодки:

1 – Тормозной диск; 2 – Тормозная колодка, 3 – Датчик износа, выполненный наборным в форме шайб с кольцевыми зубцами конической формы типа «Ёрш»; 4, 5 – Диэлектрические слои; 6, 7, 8 – ферромагнитные слои; 9, 10, 11 – Изолированные провода; 12, 13, 14 – Сигнальные индикаторы; 15 – Аккумулятор

Устройство состоит из тормозного диска 1, контактирующего (при торможении) с металлической пластиной тормозной колодки 2, в теле которой жестко закреплен датчик износа 3, прослоенный в поперечном направлении путем чередования диэлектрического 4,5 и ферромагнитных слоев 6,7,8, при этом каждый из ферромагнитных слоев 6,7,8 соединен изолированными проводами 9,10,11 с одним концом сигнального индикатора 12,13,14, соответственно, другой конец которых подсоединен к «плюсу» аккумулятора 15. Токпроводящие сердечники изолированных проводов 9,10,11 соединены с

соответствующими им ферромагнитными слоями 6,7,8, например, посредством припоя ПОС-61. Индикаторы 12,13,14 располагаются в зоне непосредственной видимости водителя транспортного средства. По мере износа тормозной колодки 2 и, соответственно, ферромагнитного слоя 8 датчика износа 3, наступает момент, когда толщина ферромагнитного слоя 8 становится равной нулю и электрическая цепь, включающая провод 9, сигнальный индикатор 12 и аккумулятор 15, размыкается – в результате чего сигнальный индикатор 12 перестает светиться при торможении транспортного средства. На рисунке 2 представлен общий вид экспериментального образца устройства с уровнями индикации.

**Малый износ**

**Средний износ**

**Большой износ**



Рисунок 2 – Общий вид экспериментального образца элемента тормозной системы

После изучения физических основ диагностирования, разработки концепции способа и макетного образца устройства его реализующего было принято решение об вероятностной оценке его функционирования. Для этого были сформированы массивы данных представляющих собой выборки, состоящие из 100 наблюдений для которых были реализованы проверки гипотез о законе распределения Гаусса плотности вероятности износа тормозной колодки, а также распределении Вейбулла. Соответствие полученной выборки закону Гауссовского распределения необходимо для обоснования приемлемости последующего использования математической теории планирования эксперимента при стендовых испытаниях. Соответствие полученной выборки закону распределения Вейбулла необходимо для



подтверждения вероятностной значимости получаемых в ходе стендовых испытаний математических моделей.

Для нормального закона теоретическое распределение плотности вероятностей имеет вид:

$$\varphi(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2}} \quad (1)$$

где  $x$  – переменная, для которой высчитывается значение функции, т.е. плотность вероятности;

$\pi$  – соотношение длины окружности и его диаметра,

$e$  – основание натурального логарифма

$m$  – математическое ожидание;

$\sigma^2$  – дисперсия воспроизводимости.

Для распределения Вейбулла теоретическое распределение плотности вероятностей имеет вид:

$$f(x) = \frac{b}{a} \left(\frac{x-c}{a}\right)^{b-1} e^{-\left(\frac{x-c}{a}\right)^b}, \quad (2)$$

где  $a$  – масштабный параметр, определяющий «вытянутость» или «сжатость» распределения по оси абсцисс;

$b$  – параметр вершины, определяющий положение вершины кривой плотности распределения;

$c$  – параметр смещения (сдвига).

Известно, что построение вероятностной модели невозможно без активного применения статистических замеров подконтрольной детали автомобиля, призванных выявить закономерности изменения износа фрикционного материала и спрогнозировать срабатывание датчика износа тормозной колодки в процессе эксплуатации. Установление процесса определения износа тормозных колодок разрабатывалось на примере г. Рязани и Рязанской области. Исходя из этого для формирования выборки были приняты три маршрута движения: 1) Рязань – Спас-Клепики – Касимов – Рязань длиной 320 км; 2) Рязань – Михайлов – Скопин – Кораблино – Рязань длиной 320 км; 3) Рязань – Луховицы – Озеры – Зарайск – Рязань длиной 270 км. В качестве автомобиля использовался ГАЗ – А21R33. Проверим с помощью  $\chi^2$ -критерия Пирсона гипотезу о соответствии рассматриваемой выборки по  $X$  нормальному распределению. Выдвинем две гипотезы:  $H_0$ : нормальное распределение – является функцией распределения  $X$  и  $H_1$ : нормальное

распределение – не является функцией распределения  $X$ . Исходя из сформулированных гипотез примем:

$$a = \langle x \rangle \approx 3,2049, \sigma = S_{\text{HECM}} \approx 0,2006. \quad (3)$$

Согласно полученным экспериментально данным наблюдаемое значение  $\chi^2$ -критерия:  $\chi^2_{\text{набл}} \approx 309.04$  В свою очередь, для числа степеней свободы:

$$f = k - m - 1 = 9 - 2 - 1 = 6. \quad (4)$$

и уровня значимости  $\alpha = 0,05$  критическое значение  $\chi^2$ -критерия:  $\chi^2_{\text{крит}} \approx 12.59$ .

Далее с помощью  $\chi^2$ -критерия Пирсона осуществлялась проверка гипотезы о соответствии полученной выборки распределению Вейбулла. Выдвигались две гипотезы:  $H_0$ : распределение Вейбулла – является функцией распределения с.в.  $X$ ;  $H_1$ : распределение Вейбулла – не является функцией распределения с.в.  $X$ .

На рисунке 3 представлена графическая интерпретация соответствия выборки распределению Вейбулла.

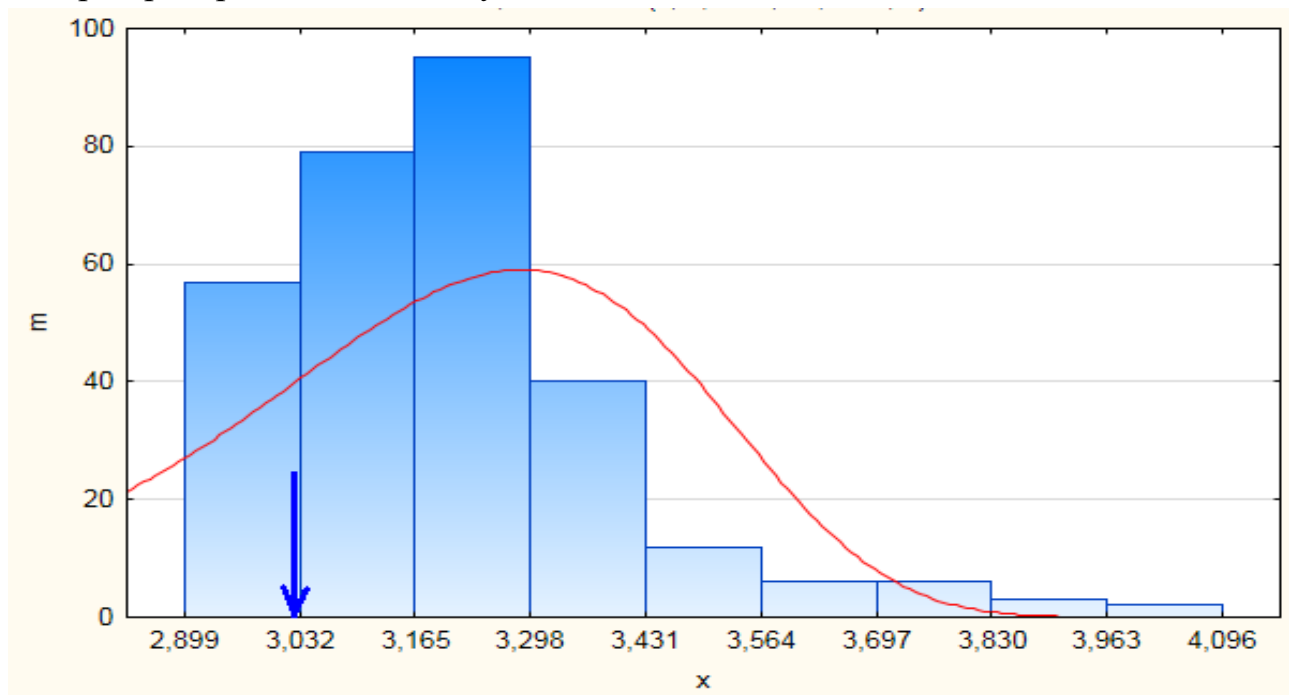


Рисунок 3 –Эмпирическая гистограмма распределения и график функции, соответствующий распределению Вейбулла

Проанализировав соответствие плотности вероятностей полученной экспериментально выборки, было доказано её соответствие гипотезе о нормальном распределении и распределении Вейбулла при уровне значимости  $\alpha = 0,05$ .

В третьей главе «Программа и методика экспериментальных исследований износа тормозных колодок транспортных средств в АПК» разработаны методики экспериментальных исследований диагностирования износа тормозных колодок ТС с учётом их эксплуатации в АПК. Обоснован выбор плана экспериментального исследования, тип формализующего полинома. Разработан экспериментальный стенд, общий вид которого представлен на рисунке 4.

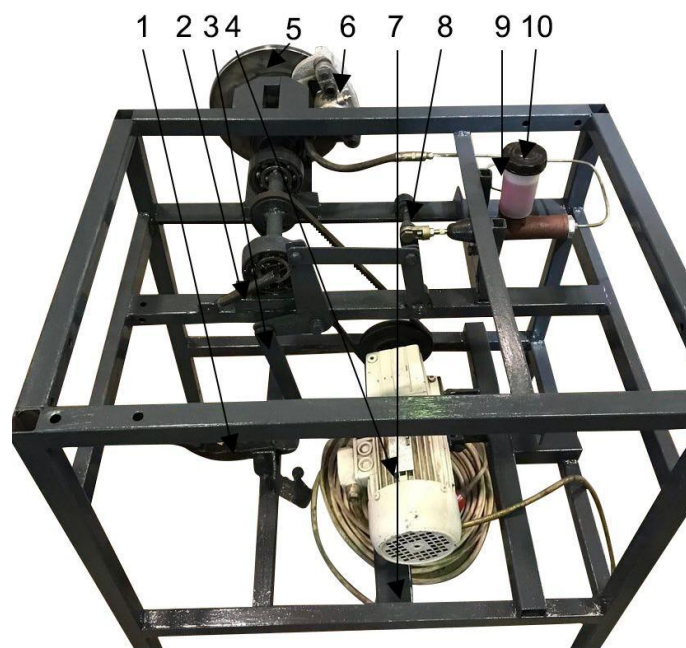


Рисунок 4 – Общий вид экспериментального стенда:

1 – Тормозная педаль; 2 – Пружина тормозного привода; 3 – Привод тормозного штока; 4 – Электродвигатель; 5 – Тормозной диск; 6 – Тормозной суппорт; 7 – Рама; 8 – Тормозной привод; 9 – Манометр тормозного давления; 10 – Рабочий тормозной цилиндр

В процессе экспериментальных исследований использовались безасбестовые тормозные колодки производителя ALLIED NIPPON. Измеряемые параметры экспериментального исследования представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Параметры экспериментального исследования

№ п/п	Наименование параметра	Обозначение, размерность
1	Частота вращения при торможении	$U_1, \text{мин}^{-1}$
2	Давление в тормозной системе	$U_2, \text{мПа}$
3	Активная мощность электродвигателя стенда при торможении	$U_3, \text{кВт}$

Варьируемыми факторами были приняты:  $x_1$  – толщина тормозной колодки, мм;  $x_2$  – плотность материала тормозной колодки, кг/м<sup>3</sup>;  $x_3$  – пробег, км. Уровни их варьирования при исследовании износа тормозных колодок ALLIED NIPPON представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Факторы, диапазоны их варьирования при исследовании износа тормозной колодки ТС в АПК

№ п/п	Номер компл.	Наименование фактора	Обозначение, размерность	Уровень варьирования		
				Верхний + 1	Средний 0	Нижний – 1
1	1-й комплект тормозных колодок	Толщина тормозной колодки	$X_1$ , мм	10,2	7,2	3,0
2		Плотность материала тормозной колодки	$X_2$ , кг/м <sup>3</sup>	7,5	10,6	25,5
3		Пробег	$X_3$ , км	36250	42100	51200
1	2-й комплект тормозных колодок	Толщина тормозной колодки	$X_1$ , мм	9,7	7,0	3,0
2		Плотность материала тормозной колодки	$X_2$ , кг/м <sup>3</sup>	7,9	10,9	25,5
3		Пробег	$X_3$ , км	57050	63150	72250
1	3-й комплект тормозных колодок	Толщина тормозной колодки	$X_1$ , мм	9,8	7,3	2,7
2		Плотность материала тормозной колодки	$X_2$ , кг/м <sup>3</sup>	7,8	10,5	28,3
3		Пробег	$X_3$ , км	78000	87100	96300

Для повышения эффективности экспериментального исследования, т.е. получения наилучшего результата при минимальном числе повторностей было принято решение использовать математическую теорию планирования эксперимента. В качестве плана эксперимента был выбран полнофакторный G-оптимальный план Бокса-Бенкена, матрица которого в кодированных переменных и результаты проведенных исследований представлены в таблице 3. Установлено, что наиболее перспективным полиномом, формализующим исследуемые взаимосвязи, является линейная модель вида:

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_i, \quad (5)$$

где  $b_0, b_i$  – коэффициенты, характеризующие влияние свободных, линейных

эффектов членов уравнения.

Таблица 3 – Матрица 3-х факторного плана Бокса-Бенкена в кодированных переменных

№ опыта	Факторы			Отклики измеряемых параметров								
				1-й комплект			2-й комплект			3-й комплект		
	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$Y_1$	$Y_2$	$Y_3$	$Y_1$	$Y_2$	$Y_3$	$Y_1$	$Y_2$	$Y_3$
1	-1	-1	-1	996,00	0,28	8,50	1009,00	0,53	7,50	1006,00	0,49	14,20
2	-1	0	1	1010,00	0,72	22,00	971,00	0,75	20,90	969,00	0,69	28,00
3	-1	1	0	967,00	0,30	18,00	1016,00	0,36	16,80	1013,00	0,30	23,70
4	0	-1	1	995,00	1,38	6,50	1008,00	1,35	5,40	1005,00	1,31	12,30
5	0	0	0	1020,00	0,62	24,00	981,00	0,97	22,90	978,00	0,91	30,00
6	0	1	-1	966,00	0,20	16,00	1015,00	0,58	14,70	1012,00	0,52	21,80
7	1	-1	0	985,00	1,28	4,50	998,00	1,25	3,40	996,00	1,21	10,30
8	1	0	-1	1010,00	0,52	22,00	971,00	0,90	20,90	969,00	0,84	28,00
9	1	1	1	956,00	1,30	14,00	1005,00	1,11	12,70	1003,00	1,05	19,80

На рисунке 5 представлен процесс проведения стендовых экспериментальных исследований с использованием бесконтактной тахометрической системы измерения частоты вращения UNIT-372.



Рисунок 5 – Измерение частоты вращения колеса при торможении в процессе стендовых испытаний программно-аппаратным комплексом UNIT-372

Все измерительные средства, используемые при проведении экспериментальных исследований, применялись в соответствии со

стандартными методиками и прошли поверку и сертификацию.

**В четвёртой главе «Результаты экспериментальных исследований износа тормозных колодок транспортных средств в АПК»** представлены математические модели влияния пробега на износ каждого из комплектов исследуемых тормозных колодок, давление в тормозной системе и активную мощность электродвигателя экспериментального стенда при торможении.

Для первого комплекта тормозных колодок были получены следующие математические модели.

Частота вращения колеса экспериментального стенда при торможении  $U_1$ , мин<sup>-1</sup>, представленная после исключения не значимых факторов в натуральных переменных:

$$U_1 = 1191,286 - 0,912x_1 + 4,701x_2 - 0,006x_3, \quad (6)$$

полученная в ходе статистической обработки результатов экспериментальных исследований в виде уравнения (6), которое адекватно по критерию Фишера характеризует зависимость исследуемых факторов при уровне значимости  $\alpha = 0,05$ , при коэффициенте множественной регрессии Фишера  $R^2 = 0,98$ .

Давление в тормозной системе  $U_2$ , мПа, при использовании первого комплекта колодок ALLIED NIPPON:

$$U_2 = 0,77292 + 0,08310x_1 + 0,02916x_2 - 0,00001x_3, \quad (7)$$

полученное в ходе статистической обработки результатов экспериментальных исследований уравнение (7), которое адекватно по критерию Фишера характеризует зависимость исследуемых факторов при уровне значимости  $\alpha = 0,05$ , при коэффициенте множественной регрессии Фишера  $R^2 = 0,87$ .

Активная мощность электродвигателя стенда при торможении  $U_3$ , кВт, представленная после исключения не значимых факторов в натуральных переменных, при использовании первого комплекта колодок ALLIED NIPPON:

$$U_3 = 65,266 - 0,356x_1 + 0,003x_2 - 0,0011x_3, \quad (8)$$

полученное в ходе статистической обработки результатов экспериментальных исследований уравнение (8), которое адекватно по критерию Фишера характеризует зависимость исследуемых факторов при уровне значимости  $\alpha = 0,05$ , при коэффициенте множественной регрессии Фишера  $R^2 = 0,97$ .

Для второго комплекта тормозных колодок были получены следующие математические модели. Частота вращения колеса экспериментального стенда



при торможении  $U_1$ , мин<sup>-1</sup>, представленная после исключения не значимых факторов в натуральных переменных:

$$U_1 = 832,806 - 0,912x_1 - 8,874x_2 + 0,004x_3, \quad (9)$$

полученная в ходе статистической обработки результатов экспериментальных исследований в виде уравнения (9), которое адекватно по критерию Фишера характеризует зависимость исследуемых факторов при уровне значимости  $\alpha = 0,05$ , при коэффициенте множественной регрессии Фишера  $R^2 = 0,97$ .

Давление в тормозной системе  $U_2$ , мПа, при использовании второго комплекта тормозных колодок ALLIED NIPPON:

$$U_2 = 0,67350 + 0,07660x_1 + 0,02872x_2 - 0,00001x_3, \quad (10)$$

полученное в ходе статистической обработки результатов экспериментальных исследований уравнение (10), которое адекватно по критерию Фишера характеризует зависимость исследуемых факторов при уровне значимости  $\alpha = 0,05$ , при коэффициенте множественной регрессии Фишера  $R^2 = 0,85$ .

Активная мощность электродвигателя стенда при торможении  $U_3$ , кВт, представленная после исключения не значимых факторов в натуральных переменных, при использовании второго комплекта колодок ALLIED NIPPON:

$$U_3 = 64,665 - 0,366x_1 + 0,058x_2 - 0,0011x_3, \quad (11)$$

полученное в ходе статистической обработки результатов экспериментальных исследований уравнение (11), которое адекватно по критерию Фишера характеризует зависимость исследуемых факторов при уровне значимости  $\alpha = 0,05$ , при коэффициенте множественной регрессии Фишера  $R^2 = 0,97$ .

Для третьего комплекта тормозных колодок были получены следующие математические модели. Частота вращения колеса экспериментального стенда при торможении  $U_1$ , мин<sup>-1</sup>, представленная после исключения не значимых факторов в натуральных переменных:

$$U_1 = 831,307 - 0,830x_1 - 2,851x_2 + 0,004x_3, \quad (12)$$

полученная в ходе статистической обработки результатов экспериментальных исследований в виде уравнения (12), которое адекватно по критерию Фишера характеризует зависимость исследуемых факторов при уровне значимости  $\alpha = 0,05$ , при коэффициенте множественной регрессии Фишера  $R^2 = 0,97$ .

Давление в тормозной системе  $Y_2$ , мПа, при использовании третьего комплекта тормозных колодок ALLIED NIPPON:

$$Y_2 = 0,58738 + 0,07660x_1 + 0,02960x_2 - 0,00002x_3, \quad (13)$$

полученное в ходе статистической обработки результатов экспериментальных исследований уравнение (13), которое адекватно по критерию Фишера характеризует зависимость исследуемых факторов при уровне значимости  $\alpha = 0,05$ , при коэффициенте множественной регрессии Фишера  $R^2 = 0,85$ .

Активная мощность электродвигателя стенда при торможении  $Y_3$ , кВт, представленная после исключения не значимых факторов в натуральных переменных, при использовании третьего комплекта колодок ALLIED NIPPON:

$$Y_3 = 72,172 - 0,347x_1 + 0,054x_2 - 0,0011x_3, \quad (14)$$

полученное в ходе статистической обработки результатов экспериментальных исследований уравнение (14), которое адекватно по критерию Фишера характеризует зависимость исследуемых факторов при уровне значимости  $\alpha = 0,05$ , при коэффициенте множественной регрессии Фишера  $R^2 = 0,97$ .

На рисунках 6...8 представлены графические интерпретации результатов экспериментальных исследований.

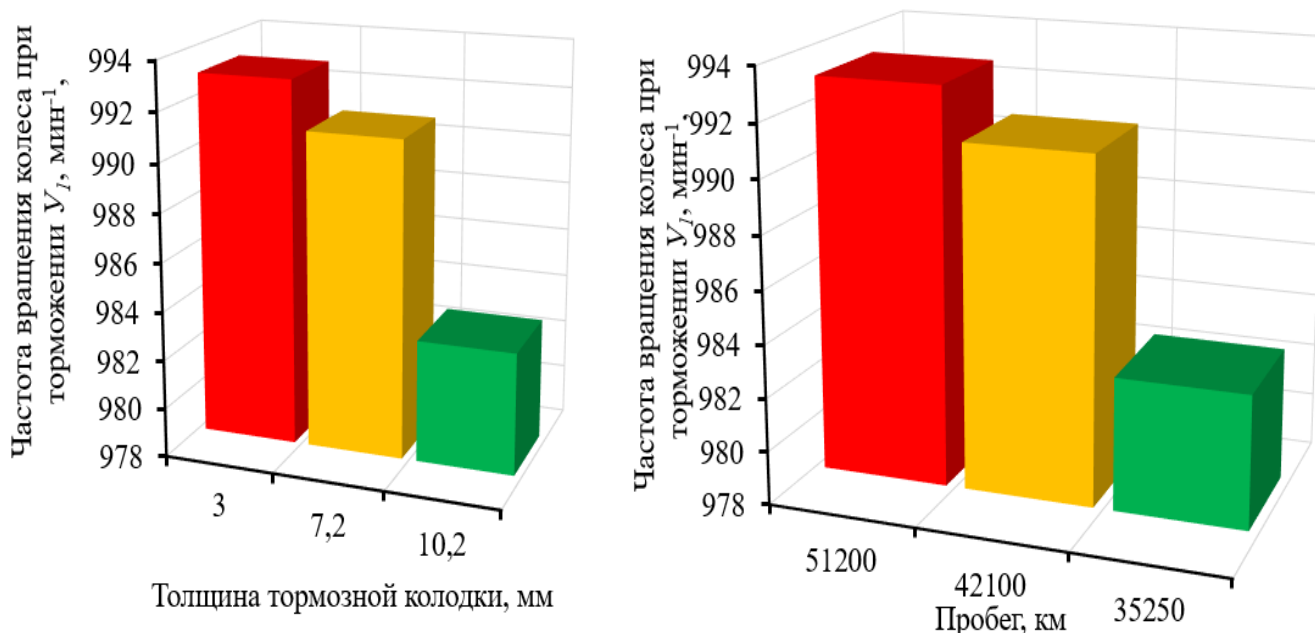


Рисунок 6 – Зависимость частоты вращения колеса экспериментального стенда при торможении от толщины тормозной колодки и пробега



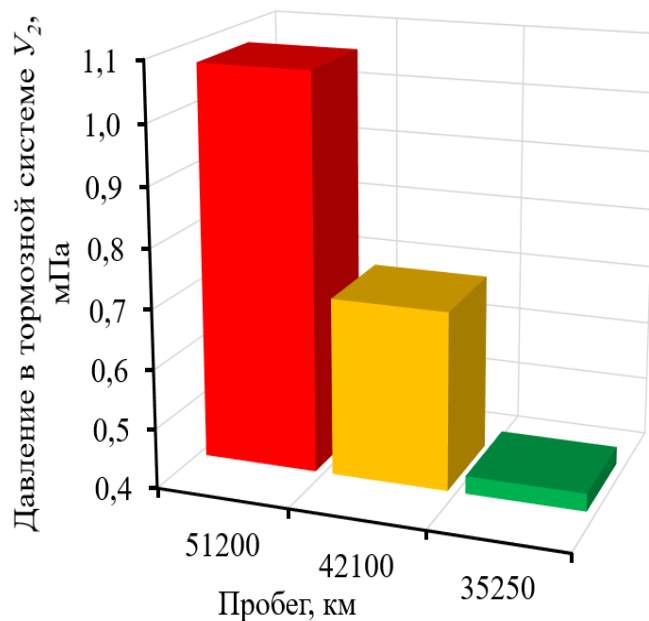
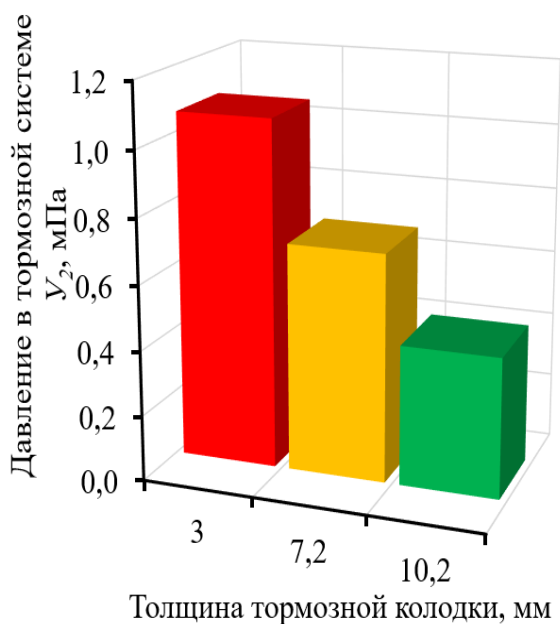


Рисунок 7 – Зависимость давления в тормозной системе экспериментального стенда от толщины тормозной колодки и пробега

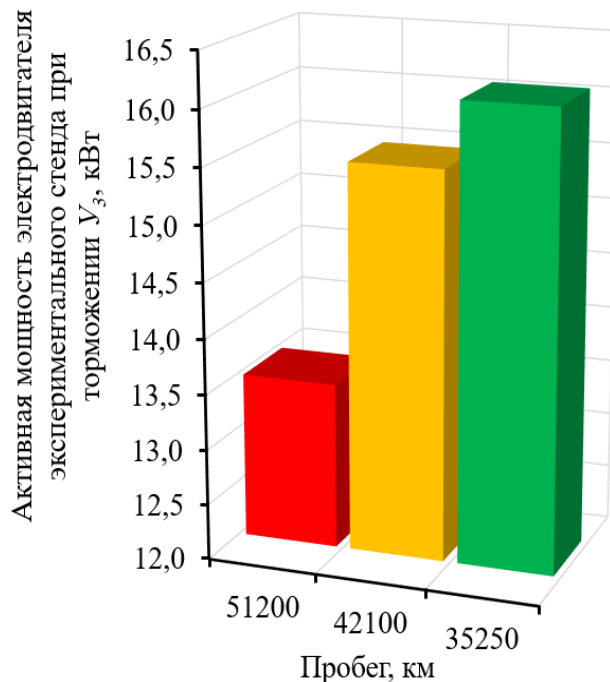
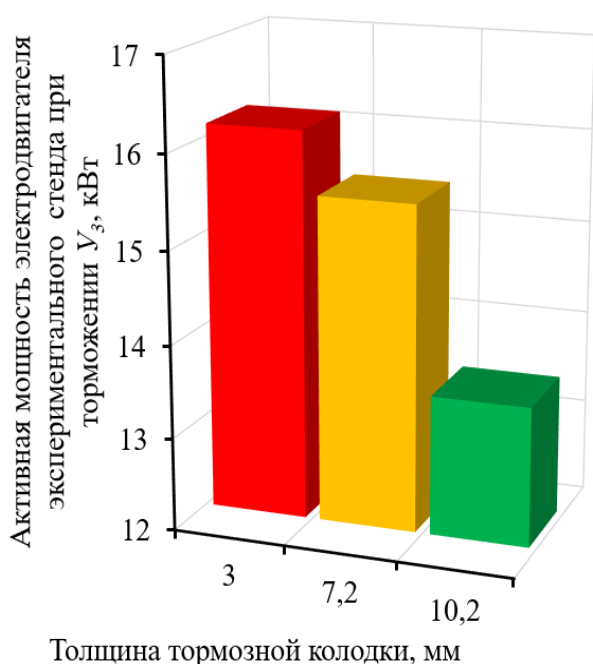


Рисунок 8 – Зависимость активной мощности электродвигателя экспериментального стенда при торможении от толщины тормозной колодки и пробега

**В пятой главе «Технико-экономическая эффективность применения разработанных решений»** проведены расчёты потенциального экономического эффекта от внедрения разработанного решения в производственную деятельность, на примере ООО «Автогарант». Годовой экономический эффект от использования разработанного технического

решения на одном автомобиле составил 26500 руб., при сроке окупаемости 10,5 месяцев.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

1. Теоретически исследованы способы повышения эффективности технического состояния тормозной колодки при эксплуатации. Установлено, что наиболее перспективным является измерение износа тормозной колодки путём электрического измерения её износа.

2. Разработано и защищено патентом РФ №2758530 устройство диагностирования износа тормозных колодок транспортных средств АПК.

3. Разработаны методики экспериментальных исследований диагностирования износа тормозных колодок транспортных средств АПК с помощью созданного устройства.

4. Проведены экспериментальные исследования влияния эксплуатационных факторов на износ тормозных колодок транспортных средств. Получены математические модели, формализующие влияние пробега на износ тормозной колодки, давление в тормозной системе и активную мощность электродвигателя экспериментального стенда при торможении.

5. Техничко-экономический эффект от применения созданного технического решения с одного транспортного средства составил 26 500 рублей.

### **Рекомендации производству**

Для повышения эффективности эксплуатации тормозных колодок транспортных средств в АПК необходимо использовать методы постоянного диагностирования их износа.

### **Перспективы дальнейшей разработки темы**

Дальнейшие научные исследования необходимо продолжить в области интеллектуализации и цифровизации контроля текущего состояния износа тормозных колодок транспортных средств АПК.

## **ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ОПУБЛИКОВАНЫ В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ:**

*– в изданиях перечня ВАК:*

1. Успенский, И.А. Определение удельного электрического сопротивления сдвига фрикционной накладке тормозной колодки относительно металлической пластины (корпуса) / И.А. Успенский, И.А. Юхин, Н.В. Лимаренко, Д.А. Воробьев, О.В. Филюшин // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование. - 2020. - № 3 (59). - С. 395-405.

2. Успенский, И.А. Оценка состояния износа тормозных колодок / И.А.Успенский, И.А.Юхин, Н.В.Лимаренко, **Д.А.Воробьев**, О.В.Филюшин // Вестник Рязанского государственного агротехнологического университета имени П.А. Костычева. - Рязань. - 2020. - № 3 (47). - С.119-125.

3. Успенский, И.А. Вероятностное прогнозирование износа тормозных колодок / И.А.Успенский,И.А. Юхин, Н.В.Лимаренко, **Д.А.Воробьев**, Е.А.Ракул // Вестник Рязанского государственного агротехнологического университета имени П.А. Костычева. - Рязань, - 2021.- №3 (13). - С.111-119.

– патенты РФ:

4. Пат.2758530, МКП F16D 66/02 (2006.01); F16D 66/02 (2021.01); Элемент тормозной системы мобильного транспортного средства/Успенский И.А., Юхин И.А., Воробьев Д.А.[и др]; -Опубл. 29.10.2021, бюл. №31.

– в периодических изданиях:

5. Успенский, И.А. Обзор методов диагностирования износа фрикционных накладок тормозной колодки автомобиля / И.А. Успенский, **Д.А. Воробьев**, О.В.Филюшин // Проблемы технической эксплуатации и автосервиса, подвижного состава автомобильного транспорта: сборник научных трудов кафедры ЭАТ и С посвященный 90-летию МАДИ, по материалам 78 научно-методической и научно-исследовательской конференции, МАДИ. - Москва. - 2020. - №3 (31). - С. 86-91.

6. **Воробьев, Д.А.** Совершенствование механизма обнаружения и устранения неисправностей сельскохозяйственной техники / **Д.А. Воробьев** // Научно-инновационные технологии как фактор устойчивого развития отечественного агропромышленного комплекса. Материалы национальной научно-практической конференции, ФГБОУ ВО РГАТУ. - Рязань, - 2020.- №3. - С.94-98.

*Бумага офсетная. Гарнитура Times. Печать лазерная*

*Усл. печ. л. 1. Тираж 100 экз. Заказ №1516 подписано в печать 21.07.2022 г.*

*Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования*

*«Рязанский государственный агротехнологический университет имени  
П. А. Костычева»*

*390044, г. Рязань, ул. Костычева, 1*

*Отпечатано в издательстве учебной литературы  
и учебно-методических пособий ФГБОУ ВО РГАТУ*

*390044, г. Рязань, ул. Костычева, 1*