

## **ОТЗЫВ**

официального оппонента доктора технических наук, профессора  
Зайца Юрия Александровича на диссертацию Родичева Алексея Юрьевича  
«Увеличение ресурса грузовых автомобилей на основе функционального  
тюнинга подшипников скольжения балансирующих подвесок»

Диссертация представлена на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 2.9.5 – Эксплуатация автомобильного транспорта.

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, содержит 336 страниц машинописного текста, список литературы из 281 наименования, одиннадцать приложений на 48 страницах. Автореферат диссертации представлен на 44 страницах и включает в себя общую характеристику работы, содержание работы, основные результаты работы и список работ, опубликованных автором по теме диссертации. После изучения представленных на оппонирование диссертации и автореферата сделано следующее заключение.

### **Актуальность избранной темы**

Балансирующая подвеска грузовых автомобилей представляет собой ключевой элемент ходовой части, обеспечивающий равномерное распределение нагрузки между осями и повышающий устойчивость транспортного средства при движении. Однако, как и любая механическая система, она подвержена изнашиванию и отказам, что может привести к снижению эксплуатационных характеристик автомобиля.

Для решения проблемы повышения эффективности функционирования балансирующей подвески автор предлагает комплекс методов, включающий внедрение биметаллических подшипников скольжения, нанесение твердосмазочных антифрикционных покрытий на рабочие поверхности, а также интеграцию систем предиктивной диагностики для непрерывного мониторинга температуры, вибраций и износа в реальном времени. Реализация этих решений направлена на минимизацию энергетических потерь, прогнозирование износа и снижение эксплуатационных затрат за счет оптимизации условий функционирования узла. В связи с этим необходимо выявить и изучить закономерности протекания процессов трения, смазки и изнашивания, разработать методы и технологии повышения износостойкости подшипников скольжения балансирующей подвески для реализации практической потребности увеличения ресурса и межремонтных интервалов грузовых автомобилей.

Тематика диссертационной работы соответствует приоритетным направлениям Стратегии научно-технологического развития и Перечня критических технологий Российской Федерации (2024 г.), предполагающих совершенствование транспортных систем, переход к передовым технологиям создания научно-технических продуктов, в частности, на основе методов машинного обучения и новых конструкторских и технологических решений.

Материалы диссертации подготовлены во взаимосвязи с шестью научно-исследовательскими проектами, грантами и государственными заданиями, финансируемыми различными ведомствами.

В соответствии с изложенным, тему диссертационной работы Родичева А. Ю. «Увеличение ресурса грузовых автомобилей на основе функционального тюнинга подшипников скольжения балансирующих подвесок» следует признать актуальной.

Научная проблема, решаемая в диссертации, посвящена разработке метода увеличения ресурса подшипников скольжения балансирующих подвесок грузовых автомобилей.

Для решения научной проблемы диссидентант ставит задачи исследования:

- провести исследования статистических закономерностей изнашивания подшипников скольжения в различных условиях эксплуатации, разработать методы повышения ресурса подшипниковых узлов скольжения и способы их осуществления;

- разработать математическую модель подшипников скольжения балансирующей подвески грузового автомобиля, включающую анализ зависимости грузоподъемности и потерь на трение от эксцентричности, исследование условий перехода от граничного к жидкостному трению и провести комплекс вычислительных экспериментов их работы;

- разработать математическую модель оценки ресурса подшипников скольжения балансирующей подвески грузового автомобиля в зависимости от скорости, нагрузки и параметров дорожного полотна для определения возможного внепланового ТО и ТР;

- разработать нейросетевую модель прогнозирования остаточного ресурса подшипников скольжения башмака балансира грузового автомобиля, функционирующую в экстремальных условиях, которая интегрирует физические закономерности изнашивания и методы машинного обучения, адаптируется к динамическим параметрам эксплуатации (скорость, нагрузка, коэффициент дорожного полотна) через коррекцию прогнозов в реальном времени;

- решить задачу повышения прочности сцепления и микротвердости антифрикционных покрытий для биметаллических подшипников скольжения, используемых в процессе ТО и ТР грузовых автомобилей, через рациональный выбор параметров газопламенного напыления, подбор модифицирующих порошков и режимов его формирования;

- решить задачу повышения прочности сцепления твердосмазочных антифрикционных покрытий, используемых в процессе ТО и ТР грузовых автомобилей, за счет рационального выбора технологических параметров нанесения и изучения их структурно-механических свойств. Установить взаимосвязи между методами подготовки поверхности, морфологией покрытий и их триботехническими характеристиками. Определить механизмы формирования аддитивных слоев, снижающих трение и изнашивание, а также разработать практические рекомендации для их применения в условия автотранспортных предприятий, направленные на увеличение ресурса узлов трения;

- разработать комплекс технических решений и программных средств диагностики балансирующей подвески грузовых автомобилей, объединяющий

алгоритмы дискретного и многопозиционного контроля и нейросетевого прогнозирования изнашивания подшипниковых узлов скольжения для совершенствования системы ТО и ТР;

- создать экспериментальные образцы подшипников скольжения с интегрированной системой мониторинга, обеспечивающей совместимость с бортовой сетью транспортного средства и облачными платформами для обработки данных. Реализовать функциональные схемы подключения и программные решения, адаптированные к вариативным эксплуатационным режимам;

- выполнить технико-экономическое обоснование эффективности применения предлагаемых решений.

Считаю, что постановка научной проблемы, аргументация ключевых задач исследования и научно-практический смысл выносимых на защиту положений достаточно проработаны, новы и убедительны в плане достижения сформулированной цели исследования.

### **Оценка общего содержания работы**

**Во введении** изложены основные положения диссертации: актуальность, степень разработанности темы исследования, область исследования, предмет и объект исследований, цель, задачи, научная новизна, теоретическая и практическая значимость, методы исследования, выносимые на защиту положения, личный вклад автора, реализация и апробация результатов исследования. Выполнена постановка научной проблемы. Даны краткая характеристика по структуре и объему работы.

**В первой главе** выполнен аналитический обзор состояния вопроса исследования работоспособности и эффективности подвесок грузовых автомобилей. Изложены теоретические методы оценки износа подшипников скольжения. Дан глубокий анализ повреждений подшипниковых узлов и анализ их износа в зависимости от условий эксплуатации. Представлены результаты обзора исследований и технических решений в направлении применения биметаллических подшипников скольжения, применения твердосмазочных покрытий, а также методов мониторинга износа рабочих поверхностей.

**Во второй главе** автором дано теоретическое обоснование процессов смазки и изнашивания подшипников скольжения балансирной подвески грузовых автомобилей. Рассмотрена схема перемещения автомобиля по степеням свободы в процессе движения и влияние сочетания поступательных и вращательных движений на элементы подвески. Разработана модель процесса смазки подшипников скольжения и дан анализ причин их износа. Основу модели составляют уравнения Навье-Стокса в цилиндрических координатах для расчета давлений.

В результате моделирования выявлены закономерности изменения величины давления в системе в зависимости от углового отклонения башмака балансира относительно его оси вращения при фиксированной скорости. При моделировании с учетом комбинированного воздействия тангенциального сдвига опорных поверхностей и радиального сжатия смазочного слоя,

вызванного динамическими нагрузками (вертикальными колебаниями грузового автомобиля на дорожных неровностях) расчетное значение коэффициента режима смазки  $\delta$  достигло 3,1. Полученное значение ( $\delta > 3$ ) подтверждает установление режима гидродинамического трения под влиянием совокупности факторов.

Представлена разработанная методика предиктивного анализа остаточного ресурса на основе применения методов машинного обучения.

**В третьей главе** автором предлагается использование биметаллических подшипников скольжения при ремонте узлов и агрегатов автомобилей. Разработаны методы повышения прочности сцепления антифрикционного покрытия, используемые материалы и методика оценки прочности сцепления. В частности, три взаимодополняющих метода, обеспечивающих синергетическое усиление межфазного взаимодействия, при этом стоит учесть, что каждый из предложенных ниже методов может использоваться отдельно. Первый метод основан на совмещении центробежной силы с импульсным энергетическим воздействием частиц металла при соударении с подложкой. Данная технология обеспечивает формирование слоя с повышенной плотностью и градиентной структурой за счет динамического воздействия. Второй метод основан на формировании активного промежуточного слоя с использованием никельсодержащих термореагирующих порошковых композиций. Третий метод основан на послойном пластическом структурирование поверхности методом контролируемой деформации нанесенных покрытий.

Представлены технологические, эксплуатационные и экономические аспекты применения биметаллических подшипников скольжения.

**Четвертая глава** диссертации посвящена исследованию твердосмазочных антифрикционных покрытий. Рассмотрены вопросы формирования твердосмазочного антифрикционного покрытия поверхности узлов трения с выбором оптимальных значений скорости воздушного потока и дистанции. Стабильное формирование аэрозольного факела с равномерным распределением материала и отсутствием дефектов достигается при дистанции нанесения 180 – 200 мм, скорости воздушного потока 24 – 28 м/с, давлении 3 атм и угле распыления 90°.

На основе построения многофакторной модели и проведения экспериментальных исследований получена зависимость адгезионной прочности антифрикционного покрытия от дистанции нанесения ( $L$ ), шероховатости поверхности ( $R_a$ ) и угла нанесения покрытия ( $\alpha$ ). Проведен анализ модели. Сравнительный анализ адгезионной прочности антифрикционных покрытий MODENGY выявил их превосходство над коммерческими аналогами. В стандартных условиях MODENGY 1003 показал прочность 8,3 МПа, что от 47 до 73 % выше аналогов, что является существенным результатом.

Проведены эксплуатационные испытания в реальных условиях (скорости 10 – 90 км/ч, различные дорожные покрытия), в результате которых установлено, что нанесение твердосмазочного покрытия MODENGY 1003 на биметаллические подшипники скольжения БрОФ10-1 балансирной подвески

является ключевым ресурсоопределяющим фактором.

**В пятой главе** представлены разработанные методы превентивной диагностики подшипников скольжения балансирующих подвесок, разработаны алгоритмы функционирования контрольно-измерительной системы подшипников скольжения, а также технические решения, направленные на контроль износа рабочей поверхности подшипника скольжения. Разработана принципиальная схема технологического процесса изготовления подшипника скольжения с интегрированной системой контроля износа рабочей поверхности. Разработанная иерархия алгоритмов, эволюционирующая от простых дискретных методов к непрерывному мониторингу параметров электрической цепи и интеллектуальному анализу данных комплексом датчиков с использованием нейронной сети, обеспечивает многоуровневый контроль износа в реальном времени, точное прогнозирование остаточного ресурса и своевременное предупреждение о критических состояниях.

**В заключении** отражены результаты решения поставленных задач в исследовании. Изложенные в заключении диссертационной работы (с. 298–303) выводы и научные результаты достаточно информативны, обоснованы и носят конкретный характер. Особенno следует отметить значительный объем численных значений параметров, что свидетельствует о глубине исследований и объективности полученных результатов. В п. 1 речь идет о результатах статистического анализа экспериментальных данных износа подшипников скольжения балансирующих подвесок грузовых автомобилей с различным пробегом и условиями эксплуатации. Пункты 2–3 содержат информацию о результатах моделирования и значениях экстремальных параметров подшипников балансиров. Результаты тестирования и возможности предиктивной модели на основе искусственной нейронной сети для прогнозирования ресурса опор балансиров автомобилей изложены в п. 4. Конкретные особенности методов повышения адгезии антифрикционных покрытий, формирование структуры покрытий, результаты оптимизации составов модификаторов и технологических режимов представлены в п.п. 5–6. Комплексный подход к диагностике балансирующей подвески грузового автомобиля с алгоритмами контроля износа, дискретного и многопозиционного анализа параметров, нейросетевой предиктивной моделью изложен в п. 7. Соискатель отмечает эффективность работы предложенного технического решения, обеспечивающего непрерывный мониторинг износа и температуры, а также адаптацию системы к режимам работы подшипников.

### **Степень достоверности и обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации**

Обзор отечественной и зарубежной литературы, программных средств, представленный в работе Родичева А.Ю., является достаточным. Список использованной в исследовании литературы содержит 281 наименование.

Обоснованность научных положений, выводов и рекомендаций, достоверность полученных результатов подтверждены корректным применением известных научных методов исследования и обработки данных,

современного математического аппарата, а также согласованностью результатов теоретических исследований с результатами экспериментов, проведёнными на натурном оборудовании. Для решения поставленных в диссертации задач, для обоснования полученных результатов и выводов автор корректно использует аналитические методы, методы теории алгоритмов, системного анализа и синтеза, теории вероятности и математической статистики, математического моделирования. В системах оценки остаточного ресурса подшипников скольжения применялись методы машинного обучения.

Результаты проведённых исследований защищены десятью патентами на изобретения и семью свидетельствами о регистрации программ для ЭВМ, которые использованы на предприятиях.

### **Новизна научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации**

Для решения проблемы интенсивного изнашивания подшипников скольжения башмака балансира в условиях экстремальных эксплуатационных нагрузок и агрессивных сред предложены три инновационных подхода:

1. Применение в конструкции балансирующей подвески биметаллических подшипников с антифрикционными покрытиями. Комбинация высокопрочной основы (сталь, алюминиевые сплавы) и антифрикционного слоя на основе медных бронз обеспечивает снижение коэффициента трения и повышение износостойкости. Ключевым фактором эффективности таких подшипников является адгезия между слоями, определяющая устойчивость к расслоению при циклических нагрузках.

2. Применение твердосмазочных покрытий на основе дисульфида молибдена ( $\text{MoS}_2$ ) и политетрафторэтилена (PTFE). Данные материалы характеризуются низким коэффициентом трения, термостабильностью и способностью функционировать в условиях ограниченной смазки. Технологии нанесения покрытий направлены на обеспечение однородности слоя и адгезии к металлической подложке, что критически важно для долговечности.

3. Применение систем мониторинга износа рабочих поверхностей. Внедрение датчиков, отслеживающих температуру, вибрацию и зазоры в реальном времени, позволяет перейти от планового технического обслуживания к обслуживанию по фактическому состоянию узла.

Работа соответствует пунктам 12, 15, 18 и 23 паспорта заявленной научной специальности. Выводы согласуются с задачами диссертационной работы.

Представленные автором результаты характеризуются научной новизной и получены впервые:

- установлены режимы смазки сложно нагруженного подшипника скольжения балансирующей подвески грузового автомобиля, работающего в условиях возвратно-вращательного режима работы, а именно: определены поля давлений, минимальная толщина смазочного слоя, грузоподъемность, моменты трения и потери мощности на основе оригинальной методики, заключающейся в реализации математической, алгоритмической и программной модели;

- на основе моделирования выявлено определяющее влияние эффекта гидродинамического сдавливания смазочной пленки на величину несущей способности и формирование режима смазки в подшипнике скольжения балансирной подвески грузового автомобиля. Установлено, что в данных подшипниках существует принципиальная возможность реализации гидродинамического режима смазки на отдельных этапах движения. Теоретически обосновано, что данный режим, характеризующийся отсутствием контактного взаимодействия опорных поверхностей подшипника скольжения и оси балансира, реализуем при определенном сочетании геометрических, кинематических и силовых параметров в установленных диапазонах;

- установлены теоретические зависимости скорости изнашивания опорной поверхности подшипника скольжения башмака балансира грузового автомобиля от скорости движения транспортного средства и состояния дорожного полотна на основе оригинальной модифицированной методики оценки ресурса подшипника скольжения балансирной подвески с использованием уравнения Арчарда с введенным в него коэффициентом дорожного полотна и экспериментально уточненным безразмерным коэффициентом износа;

- на основе оригинального комплекса методов, направленных на повышение прочности сцепления антифрикционного покрытия подшипника скольжения балансирной подвески грузового автомобиля в процессе ТО и ТР, формирование структуры, выбор оптимального состава модификаторов и технологических режимов, установлено, что рациональный выбор технологических параметров (расстояние, давление, угол нанесения покрытия) увеличивает прочность сцепления антифрикционных покрытий с основой не более 4 %, доказана эффективность использования термореагирующих порошков в качестве подслоя в составе антифрикционного покрытия, обеспечивающая увеличение прочности сцепления с основой до 12,5 %, выявлено, что послойное деформирование материала сопровождается упрочнением структуры: микротвердость поверхности возрастает как в приконтактной зоне, так и в глубинных слоях, при этом происходит увеличением прочности сцепления антифрикционного покрытия с основой до 7 %. Установлено, что применение полного комплекса методов увеличивает прочность сцепления антифрикционного покрытия с основанием до 20 %;

- установлены факторы, влияющие на прочность сцепления твердосмазочного покрытия с основой, определены структурно-механические особенности формирования покрытий, выявлена зависимость изменения толщины твердосмазочного покрытия от процесса приработки; на основе комплекса методов установлены и уточнены технологические параметры нанесения твердосмазочных антифрикционных покрытий (дистанции нанесения покрытия, давление (скорость потока), угол нанесения покрытия).

### **Замечания по диссертационной работе**

1. Во введении при указании методологии и методов исследования необходимо более четко указывать используемые в работе теории (в частности,

необходимо указать, что лежит в основе используемой гидродинамической теории? То, что уравнения математической физики решаются численными методами – очевидно. Какие методы машинного обучения применены?).

2. Толщина вытеснения пограничного слоя ( $\delta^*$ ) является важным параметром в гидродинамике и количественно описывает влияние вязкого течения вблизи стенки на внешний потенциальный поток. Учитывая величины зазоров в подшипнике целесообразно было бы сделать оценку этой величины.

3. Учитывалось ли в модели изменение динамической вязкости в процессе эксплуатации трансмиссионного масла ТАП-15В? Каков его ресурс в балансирующей подвеске?

4. На рисунке 2.29 представлена топология нейросети, а в таблице 2.4 ошибки для различных топологий. При этом во всех топологиях количество входных параметров равно трем (что явно недостаточно для данной задачи), а количество эпох предельно мало – 1100.

5. При построении модели множественной регрессии в главе 4 нет обоснования выбора факторов. В таблице 4.1 указаны диапазоны варьирования при предварительных испытаниях. А какие уровни приняты в эксперименте? Почему на стр. 206 указан полнофакторный эксперимент  $5^3$ , а ниже –  $2^3$ ? Почему уровни варьирования Ra не симметричны? Почему при явно выраженным максимуме (нелинейности функции) не применены композиционные планы?

6. В работе делается вывод о превосходстве покрытий MODENGY над аналогами Molykote на основе сравнения в основном одного параметра – адгезионной прочности. Учитывая, что эксплуатационные свойства определяются комплексом характеристик (износостойкость, термостабильность, коррозионная стойкость), не является ли такой вывод некорректным?

## Заключение

Содержание диссертационной работы соответствует ее названию. Перечисленные замечания не снижают общего положительного впечатления от проделанной автором работы и полученных результатов.

Диссертационная работа Родичева А. Ю. «Увеличение ресурса грузовых автомобилей на основе функционального тюнинга подшипников скольжения балансирующих подвесок» соответствует п. 9 «Положения о порядке присуждения ученых» степеней, научной специальности 2.9.5. – Эксплуатация автомобильного транспорта. Диссертационная работа выполнена в соответствии с пунктами: 12 «Закономерности изменения технического состояния автомобилей, их агрегатов и систем, технологического оборудования предприятий, совершенствование на их основе систем технического обслуживания и ремонта, определение нормативов технической эксплуатации»; 15 «Технологические процессы и организация технического обслуживания, ремонта; методы диагностирования технического состояния автомобилей, агрегатов и материалов»; 18 «Совершенствование методов восстановления деталей, агрегатов и управление авторемонтным производством», 23 «Тюнинг

конструкций автотранспортных средств в эксплуатации на основе применения новых материалов, технического совершенствования деталей, узлов и агрегатов, программного обеспечения».

Диссертация Родичева А. Ю. представляет собой завершенную научно-квалификационную работу, выполненную на высоком научном уровне. В ней разработан ряд новых научно обоснованных технологических и практических решений для увеличения ресурса подшипников скольжения балансирных подвесок грузовых автомобилей, внедрение которых вносит значительный вклад в развитие высокотехнологичных методов технического обслуживания и ремонта.

Полученные автором научные результаты по теме диссертации опубликованы в 77 научных работах, в том числе одна монография, 22 статьи в изданиях из перечня рецензируемых научных журналов и изданий для опубликования основных научных результатов диссертаций, 14 в изданиях, включенных в зарубежную аналитическую базу данных Web of Science и Scopus. Автор имеет десять патентов на изобретения, семь свидетельств об официальной регистрации программ для ЭВМ, одно свидетельство о регистрации базы данных.

Диссертационная работа соответствует требованиям Положения о присуждении ученых степеней, предъявляемым к докторским диссертациям, а ее автор – Родичев Алексей Юрьевич заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 2.9.5 – Эксплуатация автомобильного транспорта.

Официальный оппонент:

Фамилия: Заяц

Имя: Юрий

Отчество: Александрович

Ученая степень: Доктор технических наук по специальности 4.3.1. (05.20.03 – «Технологии и средства технического обслуживания в сельском хозяйстве»)

Ученое звание: Профессор (специальность 6.2.1 Вооружение и военная техника. Комплексы и системы военного назначения)

Место работы: ФГКВОУ ВО «Рязанское гвардейское высшее воздушно-десантное ордена Суворова дважды Краснознаменное командное училище имени генерала армии В.Ф. Маргелова» Министерства обороны Российской Федерации

Должность: профессор кафедры математических и естественнонаучных дисциплин

Контактные сведения:

e-mail: [sajua@yandex.ru](mailto:sajua@yandex.ru)

Телефон: 89537340011

Почтовый адрес: 390031, г. Рязань, пл. генерала армии В.Ф. Маргелова д.1.

Личная подпись



Подпись Заяц Юрия Александровича заверяю  
Старший помощник начальника строевого отдела ГВ, майор

21.10.2022

А. Швыдко