

## **ОТЗЫВ**

официального оппонента доктора технических наук, профессора Добромирова Виктора Николаевича на диссертационную работу Родичева Алексея Юрьевича на тему «Увеличение ресурса грузовых автомобилей на основе функционального тюнинга подшипников скольжения балансируемых подвесок», представленную на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 2.9.5. Эксплуатация автомобильного транспорта

### **Актуальность избранной темы**

Автомобильные перевозки — наиболее востребованный в мире вид грузоперевозок. К 2027 г. их доля на мировом логистическом рынке может приблизиться к 40% от общего объема рынка, значительно опережая остальные виды транспорта. В 2024 г коммерческий грузооборот автомобильного транспорта в России вырос на 5%, по сравнению с предыдущим и составил около 291 млрд тонно-км. В то же время, различные условия работы автотранспортных средств, высокие эксплуатационные нагрузки и многообразные режимы движения предопределяют необходимость на системной основе обеспечивать разработку и реализацию мероприятий, направленных на обеспечение высокого уровня надежности грузовых автомобилей в эксплуатации.

Эффективность использования грузовых автомобилей во многом определяется их грузоподъемностью, тягово-скоростными свойствами, ресурсом, безотказностью, ремонтопригодностью и реализуемой системой сервисного обслуживания. Уровень соответствия этих факторов заданным значениям в значительной мере определяется работоспособностью балансирующей подвески, воспринимающей высокие динамические нагрузки, обеспечивающей плавность хода и устойчивость. Традиционным элементом балансируемых подвесок являются подшипниковые узлы, а ресурс работы подвески существенно зависит от состояния подшипников скольжения и динамики их износов.

Конструктивные и технологические особенности подшипниковых узлов в таких подвесках не позволяют своевременно диагностировать их износ. Это повышает вероятность полного разрушения отдельных компонентов узла и увеличивает риск возникновения аварийной ситуации. Поэтому решение технической проблемы увеличения ресурса грузовых автомобилей на основе функционального тюнинга подшипников скольжения балансируемых подвесок, является своевременной и актуальной.

### **Научная новизна, обоснованность и достоверность научных положений и выводов диссертационной работы**

Научная новизна диссертационного исследования заключается:

- в установлении автором закономерностей процесса смазки сложно нагруженного подшипника скольжения балансирующей подвески грузового автомобиля, работающего в условиях возвратно-вращательного режима;
- в выявлении зависимости величины несущей способности и формирования режима смазки в подшипнике скольжения от эффекта гидродинамического сдавливания смазочной пленки;
- в теоретическом обосновании условий реализации гидродинамического режима смазки, характеризуемых сочетанием геометрических, кинематических и силовых параметров в установленных диапазонах;
- в аналитических зависимостях скорости изнашивания опорной поверхности подшипника скольжения башмака балансира от скорости движения грузового автомобиля и состояния дорожного полотна, полученных с помощью оригинальной модифицированной методики оценки ресурса подшипника скольжения балансирующей подвески с использованием уравнения Арчарда;
- в теоретическом обосновании рационального комплекса технологических параметров процесса нанесения антифрикционного покрытия и эффективности использования термореагирующих порошков в качестве подслоя в его составе;

- в установлении зависимости изменения толщины твердосмазочного антифрикционного покрытия на поверхности узлов трения от процесса приработки.

Изложенные соискателем научные и практические рекомендации, положения и выводы являются новыми и полностью вытекают из содержания диссертационной работы, они аргументированы и подтверждаются результатами большого объема теоретических и экспериментальных исследований, проведенных с использованием современных методов и средств, а также данными производственных и эксплуатационных испытаний.

### **Ценность выполненной работы для науки и практики**

**Значимость результатов диссертации для науки** заключается в том, что автором разработан комплекс математических и программных моделей, объединяющий гидродинамические расчёты подшипников скольжения, оценку их изнашивания и методы предиктивного анализа, обеспечивающие в совокупности расчет остаточного ресурса и планирование сроков технического обслуживания автомобилей.

**Практическая ценность** работы состоит в том, что разработанные автором физические основы новых методов нанесения износостойких антифрикционных покрытий и доказательства возможностей повышения прочности их сцепления с основой, позволили предложить новые технико-технологические решения и разработать программные средства, обеспечивающие реализацию новых методов диагностики балансирной подвески грузовых автомобилей. Они объединяют алгоритмы дискретного и многопозиционного контроля и нейросетевого прогнозирования изнашивания подшипниковых узлов скольжения, что важно для принятия решений о корректировке режимов проведения ТО и ремонта.

**Обоснованность и достоверность** научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации, обеспечивается

применением общепринятых методов математической статистики, действующих рекомендаций, методик и стандартов для исследований и испытаний автомобильной техники, подтверждается достаточной сходимостью экспериментальных и теоретических данных, согласованностью полученных результатов с результатами исследований других авторов, одобрением научной общественностью и специалистами результатов отдельных этапов исследования, доложенных на восьми международных научно-практических конференциях. Научно обоснованную новизну предложенных автором технических решений подтверждают 10 патентов РФ на изобретения, 7 свидетельств о государственной регистрации программ для ЭВМ и одно свидетельство о государственной регистрации базы данных.

Разработанные в диссертационном исследовании методы, технологии и программные средства прошли апробацию и внедрение на производственных предприятиях (автобаза № 9 ФАО «Орелдорстрой» и ООО «АПК Юность» г. Орла; ООО «Белмаг» и ООО «Белдорстрой» г. Белгород), а также на профильных направлениях подготовки ряда образовательных учреждений (ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева» г. Орел; ФГБОУ ВО «БГТУ им. В.Г. Шухова», г. Белгород). Все изложенное дает основание квалифицировать рассматриваемую научную работу, как направленную на решение научной проблемы, имеющей существенное значение для развития теории эксплуатации автотранспортных средств и совершенствования автомобильного транспорта. Внедрение предлагаемых технических и технологических решений вносит значительный вклад в развитие транспортного комплекса страны.

### **Оценка содержания диссертационной работы**

Диссертационная работа представлена в рукописи на 384 страницах, содержит 15 таблиц, 151 рисунок и включает титульный лист, содержание, введение, 5 глав, заключение, список литературы из 281 источника, в том числе 104 – на иностранном языке, одиннадцать приложений на 47 страницах.

**Во введении** обоснована актуальность работы, показана ее научная и практическая значимость, представлены цель и задачи исследования, основные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** «Подшипники скольжения балансирной подвески грузовых автомобилей как объект исследования» представлены состояние проблемы, обоснование цели и задач исследования, выполнен анализ эксплуатационных характеристик подвесок грузовых автомобилей, благодаря которому установлено, что несоблюдение регламентов ТО и эксплуатации снижает надежность, увеличивает затраты на восстановление, провоцирует простой и повышает риски безопасности. Эмпирически подтверждено, что сокращение ресурса обусловлено нарушениями технологических норм ремонта и неудовлетворительным качеством ТО. Обзором исследований автор подтверждает, что выявление износа подшипников скольжения балансирной подвески критически важно для обеспечения надежности и экономической эффективности грузового транспорта. Решение данной задачи, способствующее увеличению ресурса работы грузовых автомобилей, автор видит в реализации функционального тюнинга подшипников скольжения балансирных подвесок по трем ключевым направлениям: внедрение биметаллических подшипников с антифрикционными покрытиями, применение твердосмазочных покрытий, интеграция систем мониторинга для обслуживания по состоянию. Кроме того, на основании анализа износа подшипников скольжения балансирной подвески грузовых автомобилей автором установлена численно выраженная существенная зависимость скорости изнашивания от условий эксплуатации. Определены направления сервисных мероприятий для повышения долговечности подшипниковых узлов, основанных на дифференциированном подходе: для первой группы достаточно стандартный регламент обслуживания с контролем зазоров и заменой смазки; для второй группы рекомендованы подшипники с защитными покрытиями и сокращение межсервисных интервалов; для третьей группы обязательны применение износостойких подшипников,

регулярная очистка узлов подвески и внедрение систем предиктивного мониторинга состояния.

На основании проведенного анализа в диссертации сформированы цель и задачи исследований.

**Во второй главе** «Теоретическое обоснование процессов смазки и изнашивания подшипников скольжения балансирной подвески грузовых автомобилей» реализован комплекс процедур моделирования, включающий расчет характеристик подшипников скольжения с использованием уравнений гидродинамической теории смазки, определение степени износа антифрикционной поверхности в зависимости от условий эксплуатации на основе теории Арчарда и формирование методики предиктивного анализа состояния и остаточного ресурса подшипников скольжения с использованием методов машинного обучения. Автором предложены оригинальная математическая модель, алгоритм и программный комплекс для расчета ключевых характеристик подшипника скольжения балансирной подвески грузового автомобиля. Уникальность модели обусловлена учетом двух механизмов формирования несущей способности: сдвигового гидродинамического эффекта при возвратно-вращательном движении подшипника скольжения башмака балансирной подвески, а также эффекта радиального сжатия смазочного слоя под действием динамических вертикальных нагрузок от неровностей дороги.

Исследованиями установлено, что механизм формирования гидродинамического давления исключительно за счет тангенциального сдвига опорных поверхностей является недостаточным, приводя к граничному трению даже при экстремальных значениях относительного эксцентризитета и малом радиальном зазоре. По мнению автора, ключевым фактором, обеспечивающим переход в устойчивый гидродинамический режим, при реальных условиях эксплуатации, является радиальное сжатие смазочного слоя под действием высоких динамических нагрузок (10...50 кН), возникающих при вертикальных колебаниях на неровностях дороги.

Повышения ресурса подшипника скольжения балансирующей подвески (на 30 – 55 %) можно достичь управлением режимами эксплуатации, а именно: ограничением скорости движения преимущественно диапазоном 5 – 30 км/ч на дорогах с высоким коэффициентом дорожного полотна, приоритетное использование шоссейных дорог и минимизация перегрузки грузового автомобиля.

В третьей главе «Увеличение ресурса грузовых автомобилей за счет использования биметаллических подшипников скольжения» исследовано техническое решение применения биметаллических подшипников скольжения в конструкции балансирующей подвески грузового автомобиля. Данные подшипники характеризуются комбинированной структурой, сочетающей высокопрочную стальную основу с антифрикционным слоем на медной основе, что рассматривается как перспективное направление для повышения ресурса узла. Основное внимание уделено теоретическому и экспериментальному анализу методов усиления адгезионной прочности соединения между стальной втулкой и антифрикционным покрытием, являющейся критически важным параметром при производстве биметаллических подшипников в условиях автотранспортных предприятий.

С целью повышения адгезии и эксплуатационных характеристик антифрикционных покрытий при изготовлении биметаллических подшипников скольжения автором предложен комплекс методов: первый метод – использование центробежной силы и импульсного воздействия, возникающего при ударе частиц расплавленного металла об основу; второй метод – использование в качестве промежуточного слоя между основанием и основным антифрикционным слоем в процессе создания биметаллического подшипника скольжения термореагирующих порошков на основе никеля; третий метод – использование пластического деформирования каждого из антифрикционных слоев после их нанесения.

Представленные в главе результаты сравнительных эксплуатационных испытаний однозначно демонстрируют существенное повышение ресурса

биметаллических подшипников скольжения в балансирующих подвесках по сравнению с бронзовыми аналогами БрОФ10-1, что обусловлено значительным снижением скорости их изнашивания (на 60...80%) в исследованном диапазоне пробегов 31000...63565 км. На основании полученных данных автором сделан вывод о том, что внедрение биметаллических подшипников скольжения обеспечивает расчетную экономическую эффективность в размере 8650 рублей на единицу автомобильной техники (при ее оснащении четырьмя подшипниками указанного типа).

**В четвертой главе «Увеличение ресурса грузовых автомобилей за счет твердосмазочных антифрикционных покрытий при техническом обслуживании и ремонте»** рассмотрен процесс формирования твердосмазочного антифрикционного покрытия при ремонте и техническом обслуживании балансирующей подвески грузового автомобиля.

Экспериментально обоснованы рациональные параметры для формирования твердосмазочного антифрикционного покрытия (Molykote 3402 C LF) методом пневматического распыления. Установлено, что формирование 4...5 слоев твердосмазочного антифрикционного покрытия обеспечивает суммарную толщину 24...30 мкм, что соответствует критериям адгезионной стабильности, равномерности распределения и минимизации дефектов. Кроме того, лабораторные исследования подтвердили, что формирование сплошного твердосмазочного слоя толщиной  $\geq 15$  мкм требует последовательного нанесения не менее трех слоев, что согласуется с данными микроскопического анализа морфологии подложки. Интенсивность характеристических пиков в ИК-спектрах возрастает аддитивно с добавлением каждого слоя, указывая на физическое наслаждение без образования новых химических соединений.

Полученные в ходе полнофакторного эксперимента зависимости позволили определить рациональные технологические параметры для достижения максимальной прочности сцепления покрытия.

Рядом сравнительных испытаний группы покрытий двух марок — MODENGY (Россия) и Molykote (США) методом определения адгезионной прочности нормальным отрывом по ГОСТ 27890-88, выявлено превосходство MODENGY над их коммерческими аналогами. В стандартных условиях MODENGY 1003 показал прочность 8,3 МПа, что на 47...73% выше аналогов. При термоотверждении MODENGY 1005 прочность достигла 11,6 МПа, превысив показатели ближайших аналогов на 9,5...52,6%.

Сравнительный анализ эксплуатационных характеристик подшипниковых балансирующих устройств автомобиля КамАЗ продемонстрировал обеспечение расчетной экономической эффективности от внедрения подшипников скольжения с твердосмазочным антифрикционным покрытием в размере 2514 руб. на единицу автомобильной техники (при оснащении ее четырьмя подшипниками указанного типа).

В пятой главе «Повышение ресурса грузовых автомобилей через превентивную диагностику подшипников скольжения балансирующих подвесок» изложены алгоритмические принципы функционирования контрольно-измерительной системы подшипников скольжения, проанализированы конструктивные решения подшипниковых узлов с интегрированными системами мониторинга, а также предложена технологическая методика и технические требования к производству подшипников скольжения со встроенными датчиками диагностики. Проведенным исследованием подтверждено, что алгоритмы функционирования контрольно-измерительной системы подшипников скольжения балансирующих подвесок КамАЗ, основанные на превентивной диагностике, являются эффективным инструментом для существенного повышения их ресурса. Разработанная иерархия алгоритмов, эволюционирующая от простых дискретных методов (датчик обрыва цепи, датчик с несколькими дискретными положениями - Пат. 2750542 РФ) к непрерывному мониторингу параметров электрической цепи (Пат. 2783716

РФ) и интеллектуальному анализу данных комплексом датчиков с использованием нейронные сети (Пат. № 2822207 РФ), обеспечивает многоуровневый контроль износа в реальном времени, точное прогнозирование остаточного ресурса и своевременное предупреждение о критических состояниях. Внедрение этих алгоритмов, подтвержденное патентными решениями, обеспечивает переход от обслуживания по регламенту или по факту отказа к обслуживанию по фактическому состоянию, что минимизирует риск аварийных отказов, снижает затраты на техническое обслуживание и повышает надежность и ресурс балансирующих подвесок грузовых автомобилей за счет предотвращения критического износа подшипников скольжения.

По результатам исследования сделано заключение, обобщающее основные научные и практические результаты работы.

### **Соответствие паспорту научной специальности**

Диссертация соответствует паспорту научной специальности 2.9.5. – Эксплуатация автомобильного транспорта: пункт 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»; пункт 15 «Технологические процессы и организация технического обслуживания, ремонта; методы диагностирования технического состояния автомобилей, агрегатов и материалов»; пункт 18 «Совершенствование методов восстановления деталей, агрегатов и управление авторемонтным производством»; пункт 23 «Тюнинг конструкций автотранспортных средств в эксплуатации на основе применения новых материалов, технического совершенствования деталей, узлов и агрегатов, программного обеспечения».

### **Подтверждение публикаций по результатам диссертационной работы и соответствие автореферата содержанию диссертации**

**Опубликованные работы** по теме диссертации в полной мере отражают содержание проведенных исследований. Опубликовано 77 печатных работ, в том числе 22 в ведущих рецензируемых научных журналах из перечня, рекомендованного ВАК Минобрнауки РФ, 14 статей в МБД Web of Science и Scopus, издана 1 монография.

**Автореферат** представлен на 44 страницах и включает в себя общую характеристику работы, ее основные положения и результаты, заключение и список публикаций по теме диссертационной работы. Содержание автореферата соответствуют направленности и содержанию диссертационной работы.

### **Замечания по диссертации**

При общей положительной оценке по диссертационной работе необходимо отметить ряд замечаний:

1. В разделе 1.2 работы приведена Таблица 1.1, из которой следует, что подвеска характеризуется минимальной повторяемостью отказов среди основных узлов автомобиля (всего 3 случая повторных поломок). Данный статистический факт вступает в противоречие с тезисом диссертации о том, что подшипники скольжения балансирной подвески являются критически ненадежным элементом, требующим дорогостоящего усовершенствования. При очевидной актуальности решения проблемы комплексного усовершенствования системы обеспечения работоспособного состояния автотранспортных средств требует пояснения факт выбора в качестве объекта исследования подшипника скольжения балансирной подвески, который, согласно приведенным данным, обладает весьма низкой частотой повторных отказов в общей структуре поломок автомобиля?

2. На стр. 109 в п. 2.2 указано, что при относительном эксцентриките  $\epsilon > 0,995$  и радиальном зазоре 85 мкм расчетное значение коэффициента режима смазки составило  $\delta = 0,03$ , что, согласно предложенной в работе классификации при  $\delta < 1$  соответствует граничному трению. Однако в п. 2.5 (Выводы, пункт 2) утверждается, что ключевым

фактором перехода в гидродинамический режим ( $\delta \approx 3,1$ ) является радиальное сжатие смазочного слоя. Почему же в рассмотренном случае при значительном радиальном сжатии ( $\varepsilon > 0,995$ ) не был достигнут гидродинамический режим, и не является ли это противоречием?

3. В резюме по п.2.3 на стр. 121 отмечено (дословно): «Оптимизация ресурса требует минимизации скорости (5 – 30 км/ч) и выбора покрытий с низким коэффициентом сопротивления, особенно при транспортировке грузов». Хотелось бы понять, как автор представляет практическую реализацию данной рекомендации с учетом решения конкретных транспортных задач на конкретных маршрутах, при конкретной скорости и плотности транспортных потоков, а также с учетом того, что основным фактором, ограничивающим скорость движения по грунтовым дорогам любого состояния, является индивидуальное восприятие водителем негативного воздействия вибронагруженности на рабочем месте.

4. Экспериментально установлено, что подслой ПГ-Ю5-Н обеспечивает более высокую прочность сцепления, чем ПГ-Ю10-Н. Однако в работе отсутствует детальный анализ механических или микроструктурных причин этого превосходства. В чём заключается принципиальное различие в поведении этих материалов?

5. В разделе 4.4.2 установлено, что в процессе приработки толщина покрытий Molykote 3402 С LF и MODENGY 1003 снижается на 20–30%. При этом в разделе 4.3 прочность сцепления декларируется одним из ключевых показателей надежности подшипника. Не свидетельствует ли такое значительное снижение толщины о начале процесса разрушения покрытия и не опровергает ли это тезис о его высокой адгезионной стабильности?

6. В разделе 3.6.2 (стр.170) приведено описание процесса подготовки к испытаниям балансирующей подвески автомобилей КАМАЗ в части оценки износстойкости сопряжения «ось балансира – подшипник скольжения». Отмечены мероприятия контроля перед монтажом и испытаниями опытного подшипника, но нет информации о контроле другого

элемента сопряжения - оси балансира. Не ясно, использовались ли новые оси или уже бывшие в эксплуатации, проверялось ли их фактическое состояние и степень износа. Если такой контроль отсутствовал, то возникает вопрос о чистоте эксперимента.

7. Экономическая эффективность (2514 руб. на автомобиль) рассчитана исходя из разницы в стоимости подшипников с учетом их увеличенного ресурса. Учтены ли в этом расчете сопутствующие затраты: стоимость оборудования для нанесения покрытия, увеличение трудоемкости ремонта, стоимость обучения персонала? Не нивелируют ли эти затраты полученный экономический эффект?

8. Отдельные разделы работы насыщены избыточной информацией, например, в п.1.1 дается общезвестная классификация подвесок, п.1.3.1- тоже относительно методов оценки износа, на стр.134-137 приведено подробное описание конструкции серийной газопламенной горелки «Термика – универсал», имеющееся в инструкции по ее эксплуатации. Подобные излишества вызывает необоснованное увеличение объема диссертации.

Вместе с тем, приведенные замечания не снижают научной ценности выполненных автором исследований, часть из них носит дискуссионный характер и направлена на улучшение представления полученных результатов исследования.

### **Заключение о соответствии диссертации критериям, установленным Положением о порядке присуждения ученых степеней**

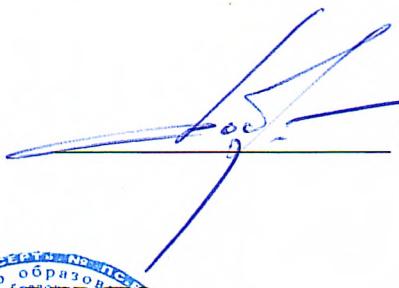
Диссертационная работа Родичева Алексея Юрьевича на тему «Увеличение ресурса грузовых автомобилей на основе функционального тюнинга подшипников скольжения балансируемых подвесок» представляет собой научно-квалификационную работу, в которой разработан комплекс математических и программных моделей, объединяющий гидродинамические расчёты подшипников скольжения, оценку их

изнашивания и методы предиктивного анализа, обеспечивающие в совокупности расчет остаточного ресурса и планирование сроков технического обслуживания автомобилей, а также изложены новые научно обоснованные технические и технологические решения по увеличению ресурса грузовых автомобилей путем функционального тюнинга подшипников скольжения балансирующих подвесок, внедрение которых вносит значительный вклад в развитие транспортного комплекса страны.

Диссертационная работа полностью отвечает требованиям, предъявляемым к докторским диссертациям по п. 9-11, 13 и 14 Постановления Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842 «О порядке присуждения ученых степеней» (ред. 25.01.2024) применительно 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**

Доктор технических наук, специальность 2.5.11 Наземные транспортно-технологические средства и комплексы (05.05.03 Колесные и гусеничные машины), профессор, профессор кафедры наземных транспортно-технологических машин ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет».



В.Н. Добромиров

«13» октября 2025 года

Подпись Добромирова В.Н. **ЗАВЕРЯЮ**

ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет»  
190005 г.Санкт-Петербург, ул. 2-я Красноармейская, д. 4,  
тел. +7 (981) 712-19-79, e-mail: viktor.dobromirov@mail.ru

