

На правах рукописи



БОЛОТОВ Дмитрий Борисович

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ УПРУГО-ДЕМПФИРУЮЩЕЙ СИСТЕМЫ
ПОДВЕСКИ СИДЕНЬЯ ОПЕРАТОРА СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО
КОЛЕСНОГО ТРАКТОРА**

4.3.1. Технологии, машины и оборудование для агропромышленного комплекса

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Воронеж – 2025

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I» (ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ).

Научный руководитель **Поливаев Олег Иванович**, доктор технических наук, профессор, Заслуженный работник высшей школы Российской Федерации.

Официальные оппоненты: **Жулай Владимир Алексеевич**, доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Воронежский государственный технический университет», заведующий кафедрой строительной техники и инженерной механики имени профессора Н.А. Ульянова;
Сидоров Максим Владимирович, кандидат технических наук, доцент, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)», Калужский филиал, доцент кафедры МК6 «Колесные машины и прикладная механика».

Ведущая организация: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Донской государственный технический университет».

Защита состоится 25 декабря 2025 г. в 09 часов 00 минут на заседании диссертационного совета 35.2.008.01, созданного на базе ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ, по адресу: 394087, г. Воронеж, ул. Тимирязева, д. 13, учебный корпус агроинженерного факультета (корпус № 3), аудитория 319.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ и на сайте www.vsau.ru («Диссертационные советы» – «Защиты» – «35.2.008.01»), а также по ссылке: <https://ds.vsau.ru/?p=12676>.

Автореферат разослан 31 октября 2025 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Афоничев Дмитрий Николаевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Повышение объемов сельскохозяйственного производства связано с увеличением энерговооруженности мобильных энергетических средств (МЭС). Исследования показывают, что в связи с плохими дорожными условиями, 40-50% внутрихозяйственных перевозок осуществляется тракторно-транспортными агрегатами (ТТА). Однако рост мощностей и рабочих скоростей ведет к возрастанию вибрационной нагруженности, передаваемой на оператора, что негативно влияет на его здоровье, вызывая профессиональные заболевания, а также снижает эффективность работы, приводя к уменьшению производительности ТТА. В настоящее время наиболее перспективным решением по снижению уровня вибрации на рабочем месте оператора тракторно-транспортного агрегата является использование системы поддрессоривания сиденья. Наиболее распространенные пассивные системы поддрессоривания, в которых характеристики упругих и демпфирующих элементов постоянны, имеют низкую эффективность работы и на сегодняшний день сдерживают рост производительности ТТА. В связи с этим разработка виброзащитной системы, которая может динамически изменять свои характеристики в зависимости от различных режимов работы ТТА, является актуальной проблемой.

Диссертационная работа выполнена в рамках научно-исследовательской работы (НИР) агроинженерного факультета ФГБОУ ВО Воронежский государственный аграрный университет «Инновационные направления совершенствования мобильных энергетических средств», утвержденной ученым советом университета (номер государственной регистрации 01.200.1-003986).

Степень разработанности темы. Проведенный анализ опубликованных работ показал, что вопрос снижения воздействия вибрационной нагруженности на оператора МЭС возможно решить, затрагивая различные уровни демпфирования колебаний. На основании проанализированной литературы можно сделать вывод, что наиболее эффективным способом снижения вибрационной нагрузки, оказываемой на оператора ТТА, является использование системы поддрессоривания сиденья. Исследованием конструкции подвески сиденья МЭС с целью снижения вибрационной нагрузки, передаваемой на оператора, занимались: Г.О. Котиев, Ю.Ф. Устинов, В.В. Шеховцов, М.В. Лященко, О.И. Поливаев, З.А. Годжаев, А.И. Искалиев и др. Однако, несмотря на значительное количество исследований, проведенных различными авторами, не все аспекты проблемы снижения вибрационной нагруженности оператора МЭС проработаны. Это объясняется сложностью генерации колебательного процесса сиденья оператора, зависящего от многих факторов. На основании подробно изученных известных решений конструкций подвесок сиденья оператора были определены их основные преимущества и недостатки, многие из которых возможно устранить путем модернизации существующих систем поддрессоривания, а также через разработку новых конструкций активных демпфирующих устройств.

Цель диссертационной работы: снижение вибронагруженности оператора сельскохозяйственного колесного трактора при выполнении транспортных работ посредством управления вязкостью магнитореологической жидкости активного демпфера подвески сиденья.

Объект исследования: подвеска сиденья оператора сельскохозяйственного колесного трактора Беларус-1221.2 при выполнении транспортных работ.

Предмет исследования: закономерности изменения виброускорений в октавных полосах частот вибрации на сиденье оператора сельскохозяйственного колесного трактора, работающего в составе ТТА, при управлении вязкостью магнитореологической жидкости в активном демпфере подвески сиденья.

Задачи исследования:

- разработать имитационные модели вертикальных колебаний подвески сиденья оператора сельскохозяйственного колесного трактора;
- обосновать техническое решение подвески сиденья оператора сельскохозяйственного колесного трактора, позволяющее снизить уровень вертикальных ускорений на сиденье;
- выявить зависимость для управления демпфированием подвески сиденья оператора сельскохозяйственного колесного трактора;
- установить закономерности изменения уровней вертикальных ускорений в октавных полосах частот подвески сиденья оператора сельскохозяйственного колесного трактора.

Научной новизной обладают:

- имитационные модели вертикальных колебаний подвески сиденья оператора сельскохозяйственного колесного трактора, отличающиеся комплексным учетом кинематических и динамических параметров механических элементов, а также гидравлических характеристик демпфера подвески;
- техническое решение подвески сиденья оператора сельскохозяйственного колесного трактора с активным демпфированием, отличающееся тем, что используется магнитореологическая жидкость с управляемой вязкостью для изменения демпфирующих свойств подвески;
- зависимость кинематической вязкости магнитореологической жидкости от скорости перемещения сиденья относительно пола кабины;
- закономерности изменения уровней вертикальных ускорений в октавных полосах частот подвески сиденья оператора сельскохозяйственного колесного трактора, отличающиеся учетом изменения вязкости магнитореологической жидкости в активном демпфере в зависимости от режима работы ТТА.

Теоретическая значимость работы заключается: в разработке имитационных моделей подвески сиденья оператора сельскохозяйственного колесного трактора, позволяющих выявлять недостатки подвески и находить новые решения для ее совершенствования, а также установить закономерности изменения уровней вертикальных ускорений в октавных полосах частот при работе трактора в составе ТТА; в получении зависимости кинематической вязкости магнитореологической жидкости от скорости перемещения сиденья относительно пола кабины, позволяющей разработать алгоритм управления активным демпфером подвески.

Практическую значимость работы составляют: техническое решение подвески сиденья оператора сельскохозяйственного колесного трактора (патент № 233623 РФ), основанное на применении изменения вязкости магнитореологической жидкости в зависимости от режима работы, обеспечивающее снижение уровня вибронегативности оператора и повышение рабочих скоростей ТТА; компьютерные программы, моделирующие режимы работы подвески и позволяющие установить рациональные параметры подвески (свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024619829 РФ и № 2024681543 РФ).

Методология и методы исследования. В процессе исследования использовали компьютерное моделирование и экспериментальные исследования с регистрацией динамически изменяющихся сигналов, методы сглаживания экспериментальных данных, основанные на оптимизации и оценке результатов с помощью дисперсионного анализа. Лабораторные эксперименты поставлены на основе апробированных методик, при этом измерения проводили сертифицированными и поверенными приборами. При проведении расчетов и обработке результатов эксперимента использовали

современные компьютеры и применяли программное обеспечение: Microsoft Excel, Matlab, Simulink, КОМПАС 3D.

Положения, выносимые на защиту:

- имитационные модели вертикальных колебаний подвески сиденья оператора сельскохозяйственного колесного трактора, позволяющие выявить уровень вертикальных ускорений сиденья оператора сельскохозяйственного колесного трактора для определения допустимых по вибронагруженности скоростей движения ТТА;
- техническое решение подвески сиденья оператора сельскохозяйственного колесного трактора с активным демпфированием, обеспечивающее снижение уровня вертикальных ускорений на сиденье;
- зависимость кинематической вязкости магнитореологической жидкости от скорости перемещения сиденья относительно пола кабины, позволяющая эффективно управлять активным демпфером подвески;
- закономерности изменения уровней вертикальных ускорений в октавных полосах частот подвески сиденья оператора сельскохозяйственного колесного трактора, позволяющие установить диапазон наиболее эффективного применения предложенной подвески сиденья с активным демпфером.

Степень достоверности и апробация результатов. Результаты получены с применением современных теоретических подходов, методов математического анализа, имитационного моделирования, апробированных методик выполнения экспериментальных исследований. Их достоверность подтверждается методологической базой исследований, использованием современных средств вычислительной техники, поверенных измерительных приборов, сходимостью результатов теоретических исследований с известными техническими и экспериментальными данными, а также результатами внедрения в производство.

Результаты диссертационной работы внедрены в ООО «Брянский тракторный завод», где используются при выборе параметров подвесок сиденья, а также используются в учебном процессе ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ при подготовке магистров по направлению «Агроинженерия».

Основные положения и результаты диссертации докладывались и обсуждались в период с 2021 по 2025 г. на ежегодных научных конференциях профессорско-преподавательского состава ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ, а также на международных, всероссийских и национальных научных конференциях.

Личный вклад заключается в постановке цели, задач, выборе методов исследований, анализе состояния вопроса, разработке и отладке имитационных моделей, получении аналитических зависимостей и проведении расчетов, обработке результатов эксперимента, выполненных лично автором; определении методики и проведении теоретических, а также экспериментальных исследований, выполненных при участии автора; подготовке научных публикаций по теме диссертации.

Публикации. По теме диссертации опубликованы 23 научные работы, в том числе три статьи – в российских журналах, включенных в перечень ВАК, пять патентов на полезные модели, один патент на изобретение и два свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Структура и объем диссертационной работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти разделов, заключения, списка литературы и приложений, изложена на 164 страницах, содержит 65 рисунков, 6 таблиц и два приложения. Список литературы включает 181 источник.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, приведена степень ее разработанности, определены объект и предмет исследования, сформулированы цель и задачи исследований, научная новизна, изложены теоретическая и практическая значимость работы, методология и методы исследований, положения, выносимые на защиту, степень достоверности и апробация результатов, отражены личный вклад соискателя, количество публикаций соискателя по теме диссертации, структура и объем диссертационной работы.

В разделе 1 «Обзор результатов исследований по снижению вибрационной нагрузки на оператора мобильного энергетического средства» выполнен анализ влияния источников возмущения при движении транспортных средств на организм человека. Установлено, что повышенный уровень вибрационной нагруженности негативно влияет на здоровье оператора МЭС, приводя к развитию профессиональных заболеваний. Проведенный анализ показал, что среди различных уровней виброзащиты оператора ТТА (пневматические шины, поддрессоривание колес, виброизоляция кабины, подвеска сиденья), наиболее эффективным является использование системы поддрессоривания сиденья МЭС. В настоящее время чаще всего применяется пассивная система поддрессоривания сиденья оператора, которая обладает постоянной характеристикой упругих и демпфирующих элементов, однако такие конструкции имеют низкую эффективность работы, так как не могут результативно гасить вибрацию на различных частотах. Системы поддрессоривания сиденья с активными устройствами демпфирования колебаний наиболее эффективны в сравнении с другими системами, однако имеют сложную и дорогую конструкцию, потребляют значительное количество энергии, являются труднообслуживаемыми, что не позволяет им получить широкого распространения для сельскохозяйственной техники. Результаты теоретического анализа показали, что наиболее перспективно использование демпфирующих устройств полуактивного типа с использованием магнитореологической жидкости в качестве рабочей. Однако известные демпфирующие устройства требуют упрощения конструкции и повышения надежности при работе.

В разделе 2 «Теоретическое исследование работы подвески сиденья оператора тракторно-транспортного агрегата» описывается разработка имитационных моделей серийной и предложенной конструкций подвесок сиденья оператора ТТА в системе автоматизированного моделирования Simulink, которая является расширением Matlab. Общая схема разработанной имитационной модели представлена на рисунке 1.

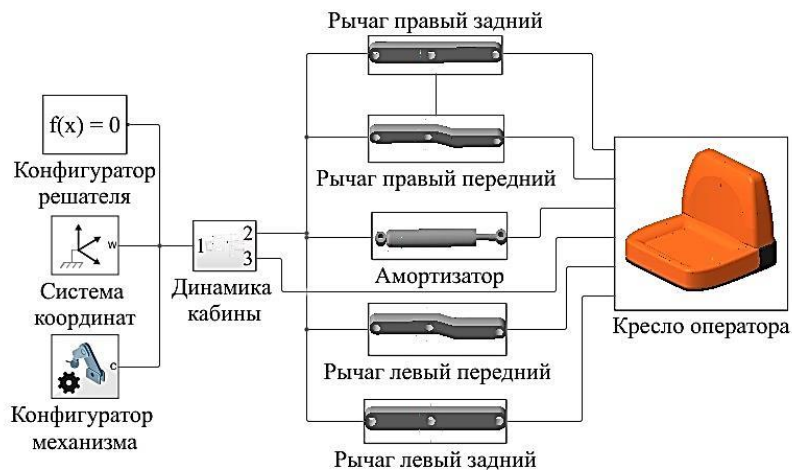


Рисунок 1 — Общая имитационная модель сиденья оператора трактора Беларус-1221.2

Подмодель механической части представляет собой модели трёхмерного движения следующих элементов: сиденья, рычагов подвески, демпфирующего элемента, пола кабины трактора. В основе расчета данных элементов лежит принцип Даламбера.

Демпфирующий элемент подвески сиденья вынесен в отдельную подмодель. Схема гидروпневматической части серийного демпфера представлена на рисунке 2.

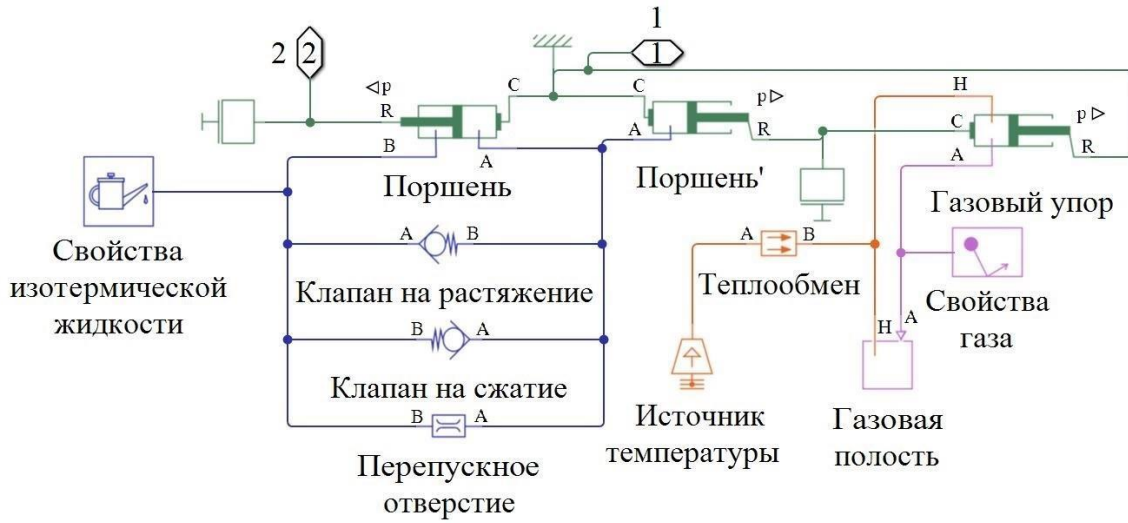


Рисунок 2 — Схема модели демпфирующего устройства серийной конструкции

В основе расчета при моделировании газовых элементов использовался закон сохранения массы в следующем виде:

$$\frac{\partial M}{\partial p} \cdot \frac{dp_1}{dt} + \frac{\partial M}{\partial T} \cdot \frac{dT_1}{dt} = \frac{dm_A}{dt} + \frac{dm_B}{dt}, \quad (1)$$

где $\frac{\partial M}{\partial p}$ — частная производная массы объема газа по давлению при постоянных температуре и объеме, кг/Па; $\frac{\partial M}{\partial T}$ — частная производная массы объема газа по температуре при постоянных давлении и объеме, кг/К; p_1 — давление объема газа, Па; T_1 — температура газового объема, К; t — время, с; $\frac{dm_A}{dt}$, $\frac{dm_B}{dt}$ — массовый расход через порты гидравлических устройств A, B, кг/с.

Энергетический баланс для газовых элементов выражается уравнением

$$\frac{\partial U}{\partial p} \cdot \frac{dp_1}{dt} + \frac{\partial U}{\partial T} \cdot \frac{dT_1}{dt} = \Phi_A + \Phi_B + Q_H, \quad (2)$$

где $\frac{\partial U}{\partial p}$ — частная производная внутренней энергии объема газа по давлению при постоянных температуре и объеме, Дж/Па; $\frac{\partial U}{\partial T}$ — частная производная внутренней энергии объема газа по температуре при постоянных давлении и объеме, Дж/К; Φ_A , Φ_B — расход энергии в порту A, B, Дж; Q_H — скорость теплового потока в порту H, Вт.

Частные производные массы M и внутренней энергии U объема газа по отношению к давлению и температуре при постоянном объеме зависят от модели свойств газа. В расчете использовались модели идеального и полуидеального газа, для которых уравнения выглядят следующим образом:

$$\frac{\partial M}{\partial p} = V \frac{\rho_1}{p_1}; \quad \frac{\partial M}{\partial T} = -V \frac{\rho_1}{T_1}; \quad \frac{\partial U}{\partial p} = V \left(\frac{h_1}{ZRT_1} - 1 \right); \quad \frac{\partial U}{\partial T} = V_{p_1} \left(c_{pl} - \frac{h_1}{T_1} \right), \quad (3)$$

где ρ_1 — плотность объема газа, кг/м^3 ; V — объем газа, м^3 ; h_1 — удельная энтальпия объема газа, кДж/кг ; z — коэффициент сжимаемости; R — удельная газовая постоянная, $\text{Дж/(кг}\cdot\text{К)}$; c_{p1} — удельная теплоёмкость при постоянном давлении объема газа, $\text{Дж/(кг}\cdot\text{К)}$.

Расчет механического движения поршня учитывал законы поступательного движения, а также трение поршня о стенки цилиндра, где использовалось уравнение Стрибека:

$$F_{\text{Стрибек}} = \sqrt{2e}(R_{\text{отр.Кулон}} - 1) \cdot F_{\text{к}} \left(\frac{v}{v_{\text{стат.}}} \right) e^{-\left(\frac{v}{v_{\text{стат.}}} \right)^2}, \quad (4)$$

где $v_{\text{стат.}}$ — пороговая скорость для статического состояния, м/с ; $F_{\text{к}}$ — сила трения Кулона, Н ; $R_{\text{отр.Кулон}}$ — значение параметра отношения силы трения отрыва ($F_{\text{отр}}$) к силе трения Кулона ($F_{\text{к}}$); $v = \frac{dx}{dt}$ — поступательная скорость поршня, м/с .

В основе расчета гидравлических элементов лежал закон сохранения массы для жидкости в клапанах и трубопроводах:

$$\frac{dm_A}{dt} + \frac{dm_B}{dt} = \rho v_A A_A + \rho v_B A_B = 0, \quad (5)$$

где ρ — плотность жидкости, кг/м^3 ; v — скорость потока жидкости, м/с ; A — площадь проходного сечения, м^2 .

Массовый расход через клапаны основывался на следующей формуле:

$$\frac{dm}{dt} = \frac{C_{\text{расх}} A_{\text{клапан}} \sqrt{2\bar{p}}}{\sqrt{PR_{\text{потеря}} \left(1 - \left(\frac{A_{\text{клапан}}}{A_{\text{сеч}}} \right)^2 \right)}} \frac{\Delta p}{\left[\Delta p^2 + \Delta p_{\text{крит}}^2 \right]^{1/4}}, \quad (6)$$

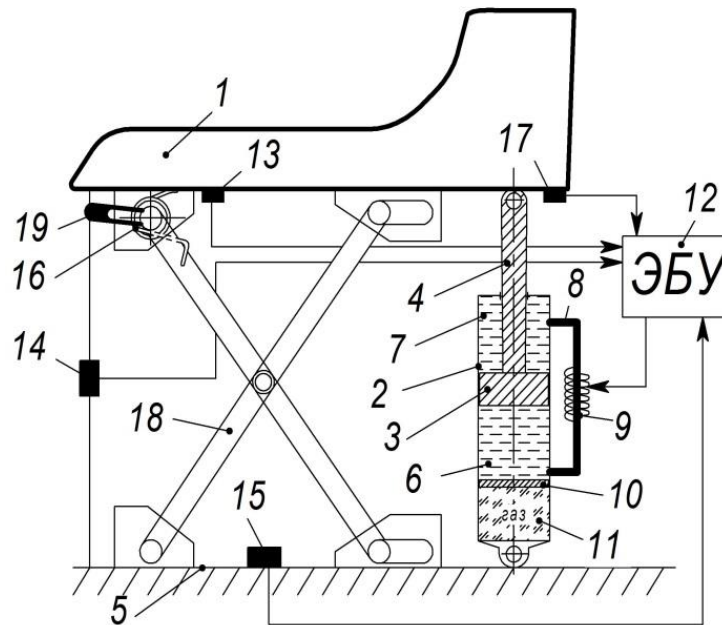
где $C_{\text{расх}}$ — коэффициент расхода; $A_{\text{клапан}}$ — мгновенная площадь поперечного сечения дросселирующих отверстий, м^2 ; $A_{\text{сеч}}$ — площадь поперечного сечения входных отверстий А и В, м^2 ; $\bar{p}$ — средняя плотность жидкости, кг/м^3 ; Δp — разница давления в дросселирующем элементе, Па ; $\Delta p_{\text{крит}}$ — критический перепад давления, Па ; $PR_{\text{потеря}}$ — потеря давления жидкости, Па .

Адекватность разработанной модели была подтверждена путем сравнения результатов численных экспериментов с данными, полученными в ходе натурных экспериментов отдельных частей системы подпрессоривания, и проверкой системы подвески в сборе путем сопоставления свободных затухающих колебаний в результате работы конструкции подвески сиденья. При этом расхождение опытных и теоретических данных не превышает 4%.

Также была разработана имитационная модель предложенной конструкции подвески сиденья транспортного средства с активным демпфированием. Принципиальная схема данной конструкции представлена на рисунке 3 (ПМ № 233623).

Отличие модели предложенной конструкции демпфирующего устройства состоит в использовании дросселирующего элемента вместо клапанов (рисунок 4). Принцип работы данного элемента заключается в изменении местного сопротивления истечению жидкости. Это обеспечивается за счет использования магнитоэологической жидкости в качестве рабочей. Она способна за доли секунды изменять свои вязкостные свойства под воздействием магнитного поля. Для локального намагничивания данной жидкости используется индукционная катушка. При этом моделирование воздействия магнитного поля на магнитоэологическую жидкость имеет определенные ограничения. Это

объясняется тем, что в используемом программном комплексе нельзя динамически изменять вязкость рабочей жидкости. Поэтому была создана дополнительная (суррогатная) модель, позволяющая заменить работу одного элемента (индукционной катушки) другим, замещающим по свойствам исходный (дрессель).



1 — каркас сиденья; 2 — гидроцилиндр; 3 — поршень; 4 — шток; 5 — основание подвески сиденья; 6, 7 — полости гидроцилиндра; 8 — магистраль; 9 — индукционная катушка; 10 — мембрана; 11 — компенсирующая камера; 12 — электронный блок управления; 13, 14, 15 — датчики виброускорений сиденья, перемещения, виброускорений пола кабины; 16 — торсионная пружина; 17 — датчик горизонтальных колебаний; 18 — рычаг подвески; 19 — регулировочная рукоятка

Рисунок 3 — Схема предложенной конструкции подвески сиденья оператора

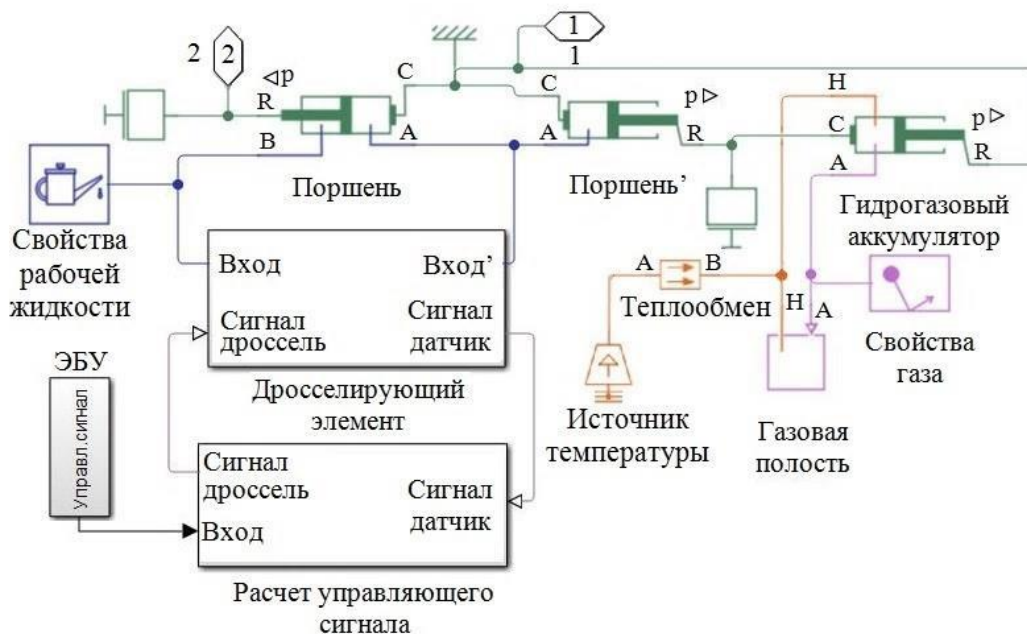


Рисунок 4 — Схема модели предложенного демпфирующего устройства подвески сиденья

Оценка качества расчета суррогатной модели осуществлялась с помощью регрессионного анализа, который показал, что уровень значимости ошибки, рассчитанный по критерию Стьюдента, не превышает 0,43%, что свидетельствует о том, что ошибка находится в пределах погрешности расчета, позволяя получить точные результаты работы имитационной модели. Для данной модели была определена зависимость (7), согласно которой будет регулироваться проходное сечение дросселя для адекватной работы суррогатной модели.

$$\begin{aligned}
 A_{др} = & 12,724 - 2369 \cdot v_{расч} - 55159 \cdot v_{расч} \cdot Q + 39522 \cdot Q^2 + 2,275 \cdot 10^5 \cdot v_{расч}^2 + \\
 & + 1,906 \cdot 10^6 \cdot Q^2 \cdot v_{расч} - 2,328 \cdot 10^6 \cdot Q^3 - 1,008 \cdot 10^7 \cdot v_{расч}^3 - 6,738 \cdot 10^7 \cdot Q^2 \cdot \\
 & \cdot v_{расч}^2 + 9,957 \cdot 10^7 \cdot Q \cdot v_{расч}^3 + 5,239 \cdot 10^7 \cdot Q^4 + 2,248 \cdot 10^8 \cdot v_{расч}^4 + 9,022 \cdot 10^8 \cdot \\
 & \cdot Q^3 \cdot v_{расч}^2 - 5,528 \cdot 10^8 \cdot v_{расч} \cdot Q^4 - 2,828 \cdot 10^9 \cdot Q \cdot v_{расч}^4 - 5,45 \cdot 10^8 \cdot Q^5 - 2,509 \cdot 10^9 \cdot \\
 & \cdot v_{расч}^5 + 1,347 \cdot 10^{10} \cdot Q^3 \cdot v_{расч}^3 - 1,432 \cdot 10^{10} \cdot Q^4 \cdot v_{расч}^2 + 5,774 \cdot 10^8 \cdot Q^2 \cdot v_{расч}^4 + \\
 & + 9,676 \cdot 10^9 \cdot v_{расч} \cdot Q^5 + 3,597 \cdot 10^{10} \cdot Q \cdot v_{расч}^5 + 2,117 \cdot 10^9 \cdot Q^6 + 1,103 \cdot 10^{10} \cdot \\
 & \cdot v_{расч}^6 - 1,697 \cdot 10^{11} \cdot Q^3 \cdot v_{расч}^4 + 5,586 \cdot 10^{10} \cdot v_{расч}^2 \cdot Q^5 - 4,681 \cdot 10^{10} \cdot v_{расч} \cdot Q^6 - \\
 & - 1,73 \cdot 10^{11} \cdot Q \cdot v_{расч}^6 + 7,783 \cdot 10^{11} \cdot Q^3 \cdot v_{расч}^5,
 \end{aligned} \quad (7)$$

где Q — текущий расход жидкости через дроссель, кг/с; $v_{расч}$ — желаемый уровень вязкости жидкости при намагничивании, м²/с.

Расчет суррогатной модели учитывал основные формулы для определения гидравлических параметров, а также дополнительно определялись: объемный расход жидкости через дросселирующий элемент, площадь отверстия в зависимости от положения дросселя, потеря давления при перетекании через дроссель и другие параметры.

Для алгоритма управления демпфирующими свойствами предлагаемой конструкции подвески сиденья предложена зависимость, которая позволяет повысить эффективность гашения вертикальных ускорений на сиденье оператора МЭС, за счет изменения кинематической вязкости магнито-реологической жидкости в диапазоне 0,005...0,08 м²/с:

$$v_{расч} = |V_{сид} - V_{пол}| \cdot (v_{макс} - v_{баз}) + v_{баз}, \quad (8)$$

где $v_{расч}$ — необходимая величина кинематической вязкости; $V_{сид}$ — скорость перемещения сиденья относительно опорной поверхности, м/с; $V_{пол}$ — скорость перемещения пола кабины относительно опорной поверхности, м/с; $v_{макс}$ — максимально возможное значение кинематической вязкости жидкости, полученное в результате воздействия магнитного поля, м²/с. Согласно литературным источникам, $v_{макс} = 0,08$ м²/с; $v_{баз}$ — базовое значение кинематической вязкости жидкости, без воздействия магнитного поля, м²/с. Согласно литературным источникам, $v_{баз} = 0,005$ м²/с.

В разделе 3 «Программа и методика экспериментальных исследований» представлены задачи экспериментальных исследований, дано описание методики проведения численных и натурных экспериментов, обработки результатов, представлена методика определения параметров суррогатной модели для предложенной конструкции подвески сиденья, а также описана методика проверки адекватности разработанной модели. Объектом исследования является ТТА, который состоит из трактора Беларус-1221.2 с полностью загруженным прицепом 2ПТС-6 (рисунок 5). Лабораторные исследования выполнялись в лабораториях кафедры сельскохозяйственных машин, тракторов и автомобилей ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ. Дорожные и дорожно-полевые испытания трактора и ТТА проводились на базе УНТЦ «Агротехнология» ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ.

Дорожные и дорожно-полевые испытания ТТА, осуществлялись с целью определения реального уровня вибронагруженности остова МЭС при движении ТТА на различной скорости в условиях, приближенных к реальной эксплуатации для двух типичных случаев: переезд единичной неровности и движение по участку пути. По-

лученные данные после обработки представляют собой зависимости ускорения, скорости и перемещения некоторых точек остова ТТА в зависимости от времени и использовались в качестве входных сигналов для введения основных кинематических параметров перемещения пола кабины МЭС для имитации движения ТТА в программном комплексе Simulink.



- 1 — передний датчик виброускорений; 2 — задний датчик виброускорений;
3 — демпфер сцепного устройства; 4 — датчик виброускорений на сиденье оператора; 5 — регистрирующее оборудование

Рисунок 5 — ТТА с оборудованием для дорожно-полевых испытаний

Разработанная методика проведения численного эксперимента серийной и предложенной конструкций подвесок сиденья оператора ТТА позволяет провести численные эксперименты, направленные на определение некоторых рабочих параметров системы поддрессоривания сиденья (динамические параметры жидкости и газа, кинематические параметры механических элементов, скорость и перемещение подушки сиденья и т.д.), что позволяет проводить глубокий анализ работы системы поддрессоривания.

В разделе 4 «Результаты проведенных исследований» представлены и проанализированы результаты натурных и численных экспериментов по испытанию ТТА, оборудованного серийной и предложенной конструкциями системы подвески сиденья оператора.

Проведенные испытания по проезду ТТА в составе трактора Беларусь-1221.2 с прицепом 2ПТС-6 единичной неровности и участка пути позволили получить некоторые кинематические данные остова трактора (рисунок 6).

Результаты численного эксперимента при моделировании проезда ТТА единичной неровности на различных скоростях движения показали, что использование предложенной конструкции подвески сиденья ТТА позволило снизить величину ускорения на рабочем месте оператора до 8%, не допуская при этом образование пробоя подвески, который наблюдался у серийной конструкции при движении ТТА со скоростью 9 км/ч (рисунок 7).

В результате испытаний серийной и предлагаемой конструкции подвесок сиденья оператора при проезде ТТА участка пути оценка эффективности работы исследуемых конструкций производилась по двум критериям: в виде зависимости виброускорения на сиденье от времени (рисунок 8), а также был произведен пересчет данных значений в среднеквадратичные значения (СКЗ) вертикальных ускорений в октавных полосах частот.

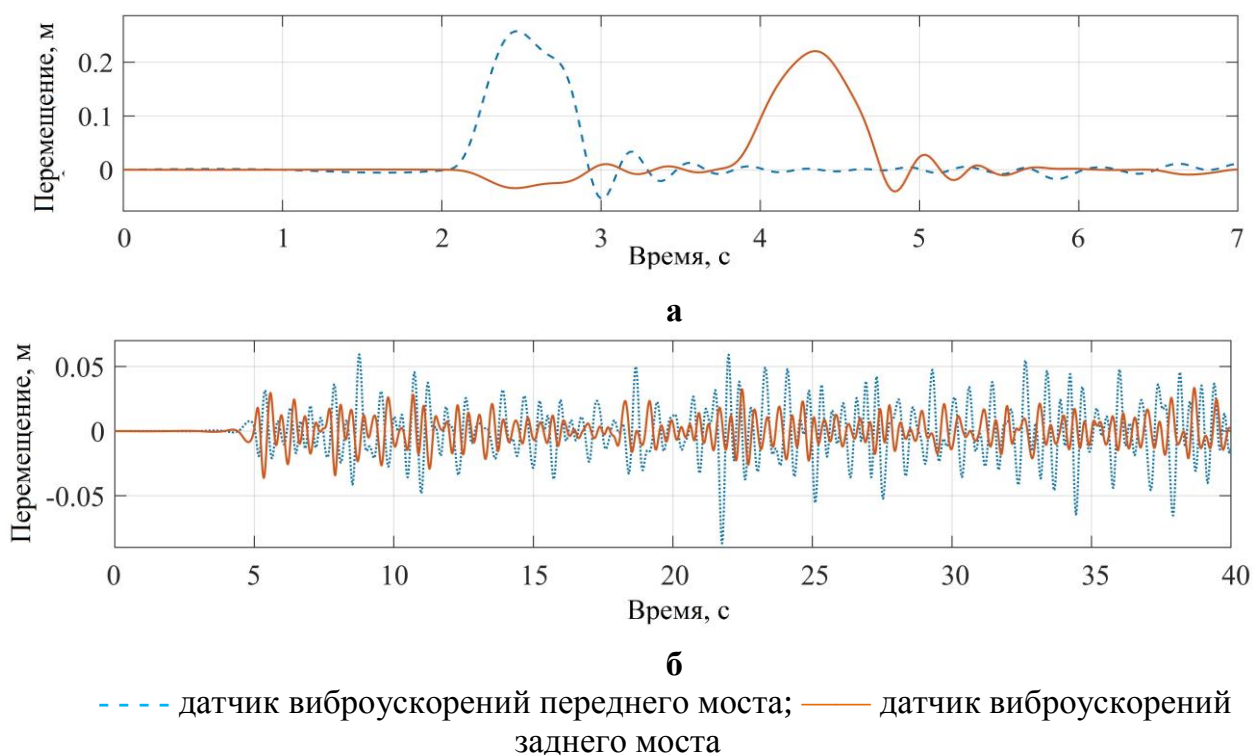


Рисунок 6 — Обработанные результаты датчиков виброускорений при проезде ТТА единичной неровности на скорости 9 км/ч (а) и участка пути на скорости 25,6 км/ч (б)

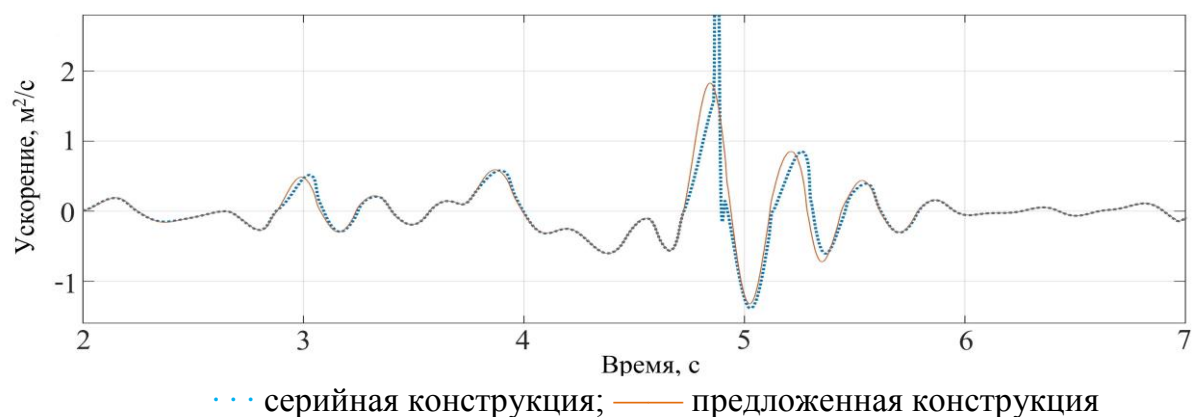


Рисунок 7 — Результаты численного эксперимента при моделировании проезда ТТА единичной неровности на скорости 9 км/ч

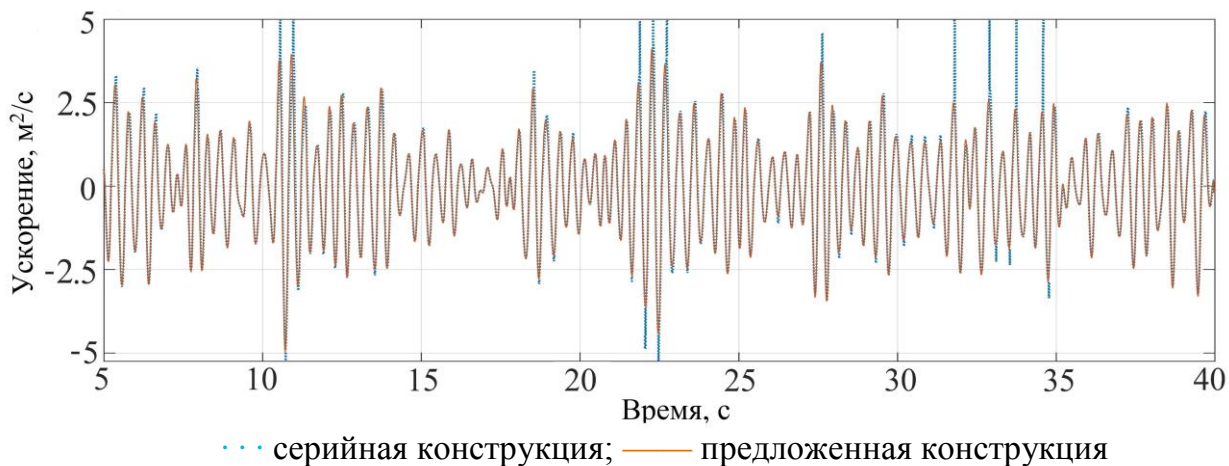


Рисунок 8 — Результаты численного эксперимента при моделировании проезда ТТА участка пути на скорости 25,6 км/ч

Анализ полученных графиков зависимости виброускорений на сиденье от времени показал, что использование предложенной конструкции подвески сиденья при движении ТТА по грунтовому участку пути в диапазоне скоростей от 11,3 до 35 км/ч позволяет снизить величину ускорений на сиденье оператора до 11%, а также не допускает образование пробоя подвески.

Пересчет данных значений в среднеквадратичные значения вертикальных ускорений в октавных полосах частот (рисунок 9) показал, что при увеличении скорости движения ТТА пиковые значения виброускорений смещаются в более высокочастотный диапазон и располагаются в октавах со среднегеометрическими частотами (СГЧ) 8 и 16 Гц, при этом наибольшее значение величины вертикальных ускорений наблюдается в указанных октавах при движении ТТА со скоростью 25,6 км/ч, а при дальнейшем увеличении скорости наблюдается некоторое её снижение, объясняемое тем, что происходит смещение значений в более высокочастотный диапазон.

Предложенная конструкция подвески сиденья в совокупности с предложенным алгоритмом управления показала снижение уровня виброн нагруженности на рабочем месте оператора ТТА во всем частотном диапазоне при движении на всех рассматриваемых скоростях, причем с увеличением скорости эффективность предлагаемой подвески возрастает. На всех рассматриваемых скоростях движения наибольшая эффективность наблюдается в октавах с СГЧ 8 и 16 Гц, а максимальная эффективность, полученная за счет применения предложенной конструкции, в сравнении с серийной, была достигнута при скорости движения ТТА 25,6 км/ч в диапазоне с СГЧ виброускорений 16 Гц и составила 24 дБ.

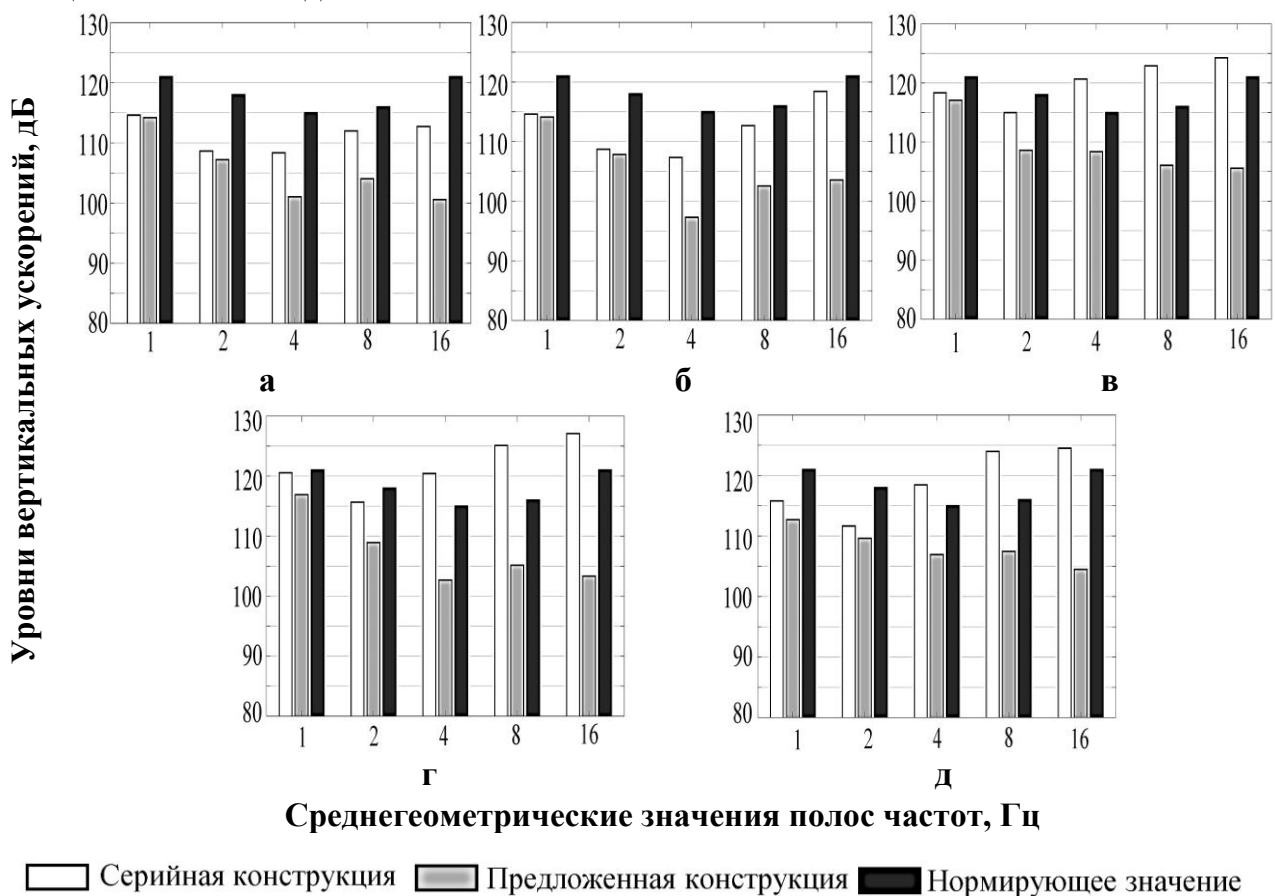


Рисунок 9 — СКЗ вертикальных ускорений в октавных полосах частот при движении ТТА с различной скоростью: а — 11,3 км/ч; б — 14,2 км/ч; в — 18,6 км/ч; г — 25,6 км/ч; д — 35 км/ч

Для определения соответствия санитарным нормам серийной и предлагаемой конструкций подвесок сиденья оператора МЭС результаты, полученные в ходе математического моделирования движения ТТА по участку пути с различными скоростями движения, были пересчитаны для определения эквивалентного скорректированного уровня виброускорений. Анализ полученных результатов показал, что серийная система поддрессирования на скорости свыше 18,6 км/ч не позволяет эффективно гасить возникающие колебания и не отвечает требованиям санитарных норм по допустимым значениям производственной вибрации. При скорости движения 18,6 км/ч серийная подвеска превышает максимально допустимые нормы по величине транспортной вибрации на 8 дБ, при скорости 25,6 км/ч – на 10 дБ, а при 35 км/ч – на 8 дБ. Предложенный механизм поддрессирования сиденья оператора ТТА на всем рассматриваемом диапазоне рабочих скоростей движения не выходит за допустимые рамки величины транспортной вибрации согласно нормативным документам.

В таблице 1 приведены сравнительные значения эквивалентного скорректированного уровня вертикальных ускорений на сиденье оператора ТТА. На основании данных представленной таблицы, видно, что максимальная эффективность предложенной конструкции подвески сиденья оператора ТТА наблюдается при скорости движения 25,6 км/ч.

Таблица 1 — Оценка эффективности предложенной конструкции в сравнении с серийным механизмом поддрессирования сиденья оператора ТТА

Скорость, км/ч	Эквивалентный скорректированный уровень виброускорений на сиденье, дБ		Сравнительная эффективность предложенной конструкции, дБ
	серийная конструкция	предложенная конструкция	
11,3	112	108	4
14,2	114	105	9
18,6	123	111	12
25,6	125	110	15
35,0	123	110	12

В разделе 5 «Определение эксплуатационных издержек на модернизацию серийной подвески сиденья оператора ТТА» показано, что проведенные исследования доказали повышенную эффективность разработанной конструкции подвески сиденья. За счет снижения уровня вибрационного воздействия на оператора ТТА становится возможным увеличение скорости движения без превышения требований, изложенных в СанПиН 1.2.3685-21, что позволяет повысить производительность ТТА с 9,23 до 10,63 т/ч.

Использование усовершенствованной подвески сиденья позволяет получить годовой экономический эффект 151 016 рублей, при сроке окупаемости капитальных вложений 0,72 года.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Результаты испытаний на разработанных моделях вертикальных колебаний подвески сиденья оператора сельскохозяйственного колесного трактора показали, что серийная конструкция не соответствует требованиям, предъявляемым к рабочему месту оператора, по величине транспортной вибрации и уже при скорости движения тракторно-транспортного агрегата 18,6 км/ч превышает максимально допустимые нормы эквивалентного скорректированного уровня виброускорения на 8 дБ, при скорости 25,6 км/ч – на 10 дБ, при 35 км/ч – на 8 дБ. Предложенная конструкция подвески сиденья оператора сельскохозяйственного колесного трактора на всем диапазоне

рабочих скоростей не только демонстрирует меньший уровень виброускорений, но и не выходит за пределы, установленные СанПиН.

2. Предложенное техническое решение подвески сиденья оператора сельскохозяйственного колесного трактора с активным демпфером (патент № 233623 РФ) за счет использования в демпфирующем элементе магнитореологической жидкости позволяет снизить эквивалентный скорректированный уровень виброускорений на рабочем месте оператора тракторно-транспортного агрегата до 15 дБ.

3. Управление демпфирующими свойствами предлагаемой подвеской сиденья, заключающееся в изменении кинематической вязкости магнитореологической жидкости в диапазоне $0,005...0,08 \text{ м}^2/\text{с}$ в зависимости от скорости перемещения сиденья относительно пола кабины, позволяет при переезде единичной неровности устранить пробой подвески сиденья, а также снизить уровень ускорений на других рассматриваемых временных интервалах до 8%. Эффективность предложенной конструкции при проезде участка пути (оцениваемая по эквивалентному скорректированному уровню виброускорений) в зависимости от скорости движения варьируется от 4 до 15 дБ.

4. Подвеска сиденья с активным демпфером обеспечивает снижение уровня вертикальных ускорений на рабочем месте оператора в диапазоне частот до 16 Гц при всех рассмотренных режимах работы тракторно-транспортного агрегата, наибольшая эффективность наблюдается в октавах со среднегеометрической частотой виброускорений 8 и 16 Гц, а максимальная эффективность достигнута при скорости движения тракторно-транспортного агрегата 25,6 км/ч в диапазоне среднегеометрических частот 16 Гц и составила 24 дБ.

5. За счет внедрения в конструкцию подвески сиденья активного демпфирующего устройства экономический эффект при расчете на один агрегат в составе Беларус-1221.2+2ПТС-6, выполняющий внутрихозяйственные транспортные работы, составляет 151 016 рублей при сроке окупаемости инвестиций 0,72 года.

6. Результаты диссертационной работы внедрены в ООО «Брянский тракторный завод» и используются в учебном процессе ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ. Проведенные исследования позволяют рекомендовать использование на сельскохозяйственных колесных тракторах системы поддрессоривания сиденья оператора с активным демпфирующим устройством, в котором диапазон кинематической вязкости магнитореологической жидкости изменяется в диапазоне $0,005...0,08 \text{ м}^2/\text{с}$.

7. Перспективой дальнейшей разработки темы является исследование работы активных регулируемых амортизаторов совместно с изменяющейся упругой характеристикой подвески.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в Российских журналах, включенных в перечень ВАК

1. Анализ способов снижения уровня вибрационной нагруженности рабочего места оператора тракторно-транспортного агрегата / О.И. Поливаев, А.Н. Кузнецов, А.В. Лощенко, **Д.Б. Болотов** // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. – 2021. – Т. 14, № 4(71). – С. 11-20. – DOI 10.53914/issn2071-2243_2021_4_11.

2. Совершенствование систем подвесок сидений операторов сельскохозяйственных тракторов / О.И. Поливаев, **Д.Б. Болотов**, А.В. Лощенко [и др.] // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. – 2024. – Т. 17, № 2(81). –

С. 60-67.– DOI 10.53914/issn2071-2243_2024_2_60.

3. Эффективность использования активного демпфера в подвеске сиденья тракторно-транспортного агрегата / О.И. Поливаев, **Д.Б. Болотов**, А.В. Химченко, А.В. Ворохобин // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. – 2025. – Т. 18, № 2(85). – С. 83-94.– DOI 10.53914/issn2071-2243_2025_2.

Патенты

4. Патент на полезную модель РФ № 206649 U1, МПК В60N 2/50. Активная подвеска сиденья транспортного средства / О.И. Поливаев, С.Н. Пиляев, А.Н. Кузнецов, А.В. Лощенко, **Д.Б. Болотов**; патентообладатель ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ (RU). – № 2021108357; заявл. 26.03.2021; опубл. 21.09.2021.– Бюл. № 27.– 6 с.

5. Патент на изобретение РФ № 2764210 C1, МПК F16F 9/06, F16F 9/53. Регулируемый магнитореологический пневматический амортизатор / О.И. Поливаев, О.М. Костиков, А.В. Лощенко, **Д.Б. Болотов**; патентообладатель ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ (RU). – № 2021105339; заявл. 01.03.2021; опубл. 14.01.2022.– Бюл. № 2.– 10 с.

6. Патент на полезную модель РФ № 211255 U1, МПК В60N 2/52. Подвеска сиденья транспортного средства / О.И. Поливаев, А.Н. Кузнецов, А.В. Лощенко, **Д.Б. Болотов**; патентообладатель ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ (RU). – № 2022104102; заявл. 15.02.2022; опубл. 26.05.2022.– Бюл. № 15.– 8 с.

7. Патент на полезную модель РФ № 215981 U1, МПК В60N 2/52. Подвеска сиденья транспортного средства с активным демпфированием/ О.И. Поливаев, С.Н. Пиляев, А.Н. Кузнецов, А.В. Лощенко, **Д.Б. Болотов**; патентообладатель ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ (RU). – № 2022130786; заявл. 26.11.2022; опубл. 11.01.2023.– Бюл. № 2.– 7 с.

8. Патент на полезную модель РФ № 221611 U1, МПК В60N 2/50, В60N 2/52. Подвеска сиденья транспортного средства с активным демпфированием / О.И. Поливаев, А.В. Химченко, **Д.Б. Болотов** [и др.]; патентообладатель ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ (RU).– № 2023123421; заявл. 09.09.2023; опубл. 14.11.2023.– Бюл. № 32.– 6 с.

9. Патент на полезную модель РФ № 233623 U1, МПК В60N 2/50, В60N 2/52. Подвеска сиденья транспортного средства с активным демпфированием/ О.И. Поливаев, А.В. Химченко, **Д.Б. Болотов** [и др.]; патентообладатель ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ (RU).– № 2025101050; заявл. 21.01.2025; опубл. 28.04.2025.– Бюл. № 13.– 6 с.

Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ

10. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ РФ № 2024619829. Имитационная модель для испытания амортизатора подвески сиденья оператора транспортного средства / А.В. Химченко, **Д.Б. Болотов**, О.И. Поливаев; правообладатель ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ (RU). – № 2024619175; заявл. 27.04.2024; опубл. 27.04.2024.– Бюл. № 5.– 1 с.

11. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ РФ № 2024681543. Программа для оптимизации упруго-демпфирующих свойств сиденья оператора трактора / А.В. Химченко, **Д.Б. Болотов**, О.И. Поливаев; правообладатель ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ (RU). – № 2024680779; заявл. 11.09.2024; опубл. 11.09.2024.– Бюл. № 9.– 1 с.

Публикации в материалах научных конференций и сборниках научных трудов

12. Влияние вибрационных процессов на физическое состояние оператора машинно-тракторного агрегата / А.С. Корнев, **Д.Б. Болотов**, В.Ю. Кирмасов [и др.] // Наука и образование на современном этапе развития: опыт, проблемы и пути их решения: материалы междунар. науч.-практ. конф. (Россия, Воронеж, 24-25 ноября 2020 г.). – Воронеж: ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ, 2020. – С. 49-53.

13. Исследование и анализ магнитореологических амортизирующих устройств / О.И. Поливаев, **Д.Б. Болотов**, А.С. Канищев [и др.] // Наука и образова-

ние на современном этапе развития: опыт, проблемы и пути их решения: материалы международной научно-практической конференции, (Россия, Воронеж, 24–25 ноября 2020 г.). – Воронеж: Воронежский ГАУ, 2020. – С. 46-49.

14. Анализ устройств демпфирования, используемых в машиностроении / **Д.Б. Болотов**, А.С. Корнев, В.Ю. Кирмасов [и др.] // Тенденции развития технических средств и технологий в АПК: материалы междунар. науч.-практ. конф. (Россия, Воронеж, 25 февраля 2021 г.) – Ч. I. – Воронеж: ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ, 2021. – С. 60-65.

15. Поливаев О.И. Анализ конструкций подвесок сиденья оператора транспортного средства / О.И. Поливаев, А.В. Лощенко, **Д.Б. Болотов** // Энергоэффективность и энергосбережение в современном производстве и обществе: материалы междунар. науч.-практ. конф. (Россия, Воронеж, 06-07 июня 2022 г.). Ч. II. – Воронеж: ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ, 2022. – С. 347-353.

16. Исследование и анализ подвесок сиденья оператора транспортного средства / О.И. Поливаев, А.В. Лощенко, **Д.Б. Болотов** [и др.] // Тенденции развития технических средств и технологий в АПК: материалы междунар. науч.-практ. конф. (Россия, Воронеж, 20 февраля 2023 г.). – Воронеж: ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ, 2023. – С. 133-141.

17. Эффективность использования подвески сиденья с магнитореологической жидкостью / О.И. Поливаев, **Д.Б. Болотов**, Л.М. Ситников [и др.] // Теория и практика инновационных технологий в АПК: материалы нац. науч.-практ. конф. (Россия, Воронеж, 01-28 марта 2023 г.). Ч. V. – Воронеж: ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ, 2023. – С. 238-245.

18. **Болотов Д.Б.** Исследование систем поддрессоривания транспортных средств / **Д.Б. Болотов**, О.И. Поливаев // Наука и образование на современном этапе развития: опыт, проблемы и пути их решения для АПК: материалы междунар. науч.-практ. конф. (Россия, Воронеж, 30 ноября 2023 г.). – Воронеж: ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ, 2023. – С. 23-28.

19. **Болотов Д.Б.** Анализ подвесок сиденья оператора транспортного средства / **Д.Б. Болотов**, О.И. Поливаев // Тенденции развития технических средств и технологий в АПК: материалы междунар. науч.-практ. конф. (Россия, Воронеж, 12 февраля 2024 г.). – Воронеж: ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ, 2024. – С. 31-35.

20. **Болотов Д.Б.** Использование магнитореологической жидкости в различных конструкциях демпфирующих устройств / **Д.Б. Болотов**, О.И. Поливаев // Молодежный вектор развития аграрной науки: материалы 75-й нац. науч.-практ. конф. студентов и магистрантов (Россия, Воронеж, 15-31 февраля 2024 г.). – Воронеж: ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ, 2024. – С. 77-81.

21. Химченко А.В. Имитационное моделирование работы подвески сиденья оператора мобильного энергетического средства / А.В. Химченко, **Д.Б. Болотов**, О.И. Поливаев // Проблемы ресурсобеспеченности и перспективы развития агропромышленного комплекса: материалы междунар. науч.-практ. конф. (Россия, Воронеж, 25 сентября 2024 г.). – Воронеж: ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ, 2024. – С. 20-26.

22. **Болотов Д.Б.** Анализ систем поддрессоривания сиденья оператора мобильного энергетического средства / **Д.Б. Болотов**, О.И. Поливаев // Тенденции развития технических средств и технологий в АПК: материалы междунар. науч.-практ. конф. (Россия, Воронеж, 31 января 2025 г.). – Воронеж: ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ, 2025. – С. 228-233.

23. **Болотов Д.Б.** Виды систем поддрессоривания сиденья оператора мобильного энергетического средства / **Д.Б. Болотов**, О.И. Поливаев // Теория и практика инновационных технологий в АПК: материалы нац. науч.-практ. конф. (Россия, Воронеж, 01-31 апреля 2025 г.). – Воронеж: ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ, 2025. – С. 51-56.

Просим принять участие в работе диссертационного совета 35.2.008.01 или выслать Ваш отзыв на автореферат в двух экземплярах с заверенными подписями по адресу: 394087, г. Воронеж, ул. Тимирязева, д. 13, ученому секретарю Афоничеву Д.Н. Телефон: +7(473)224-39-39 (доб. 3320), e-mail: et@agroeng.vsau.ru.

Подписано в печать 17.10.2025 г. Формат 60x84 1 /16. Бумага кн.-журн.
П.л. 1,0. Гарнитура Таймс. Тираж 100 экз. Заказ № 27756
Типография ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ. 394087, г. Воронеж, ул. Мичурина, 1.