

*На правах рукописи*

**Домнышев Дмитрий Александрович**

**ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК  
ГИДРАВЛИЧЕСКИХ АМОРТИЗАТОРОВ АВТОМОБИЛЕЙ,  
ИСПОЛЬЗУЕМЫХ В СЕЛЬСКОМ ХОЗЯЙСТВЕ  
ПРИ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ**

Специальность 05.20.03 – Технологии и средства технического  
обслуживания в сельском хозяйстве

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

Новосибирск - 2021

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Новосибирский государственный аграрный университет» (ФГБОУ ВО Новосибирский ГАУ).

**Научный руководитель:** Долгушин Алексей Александрович  
доктор технических наук, доцент

**Официальные  
оппоненты:**

**Картошкин Александр Петрович**  
доктор технических наук, профессор,  
ФГБОУ ВО СПбГАУ, заведующий кафедрой  
«Автомобили, тракторы и технический сервис»

**Разяпов Махмут Магдутович**  
кандидат технических наук, доцент,  
ФГБОУ ВО «Башкирский ГАУ», доцент  
Кафедры «Автомобилей и машинно-тракторных  
комплексов»

**Ведущая организация:** Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Северо-Восточный федеральный университет имени М.К. Аммосова» (СВФУ)

Защита диссертации состоится «28» декабря 2021 г. в 14-00 часов на заседании диссертационного совета Д 002.278.01, созданном на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Сибирский федеральный научный центр агробιοтехнологий Российской академии наук (СФНЦА РАН) по адресу: 630501, Новосибирская область, Новосибирский район, р.п. Краснообск-1, СФНЦА РАН, телефон (факс): 8(383) 348-46-36; e-mail: [aspsibime@ngs.ru](mailto:aspsibime@ngs.ru).

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью вашего учреждения, просим направить в адрес диссертационного совета.

С диссертацией можно ознакомиться в читальном зале СИБИМЭ СФНЦА РАН, автореферат и диссертация размещены на сайтах: [www.sfsca.ru](http://www.sfsca.ru) и <http://vak.minobrnauki.gov.ru>.

Автореферат разослан «      » \_\_\_\_\_ 2021 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Назаров Николай Николаевич

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** Для перевозок различных грузов в сельском хозяйстве на территории России используются преимущественно грузовые автомобили. Значительная доля грузов перевозится в периоды года с низкой температурой окружающей среды. Для условий Сибири эта доля может составлять до 50% от общего годового объема. Анализ большого количества работ показал, что серийные грузовые автомобили плохо приспособлены к эксплуатации в условиях низких температур. Одной из систем автомобиля, в значительной степени подверженных негативному влиянию низких температур, является подвеска. В результате увеличения вязкости рабочей жидкости в гидравлических амортизаторах происходит увеличение сил сопротивления на отбой и сжатие, что приводит к снижению средней технической скорости автомобилей, уменьшению производительности и увеличению количества отказов элементов подвески.

Для обеспечения эксплуатационных характеристик гидравлических амортизаторов значения сил сопротивления должны находиться в определенных пределах. Анализ выполненных исследований показал, что в условиях низких температур окружающей среды значения сил сопротивления могут превышать допустимые пределы, что негативно сказывается на эффективности работы элементов подвески и автомобиля в целом.

Диссертационная работа выполнена в соответствии с планом НИР ФГБОУ ВО Новосибирский ГАУ в рамках государственной темы «Энергосберегающее использование транспортных машин в суровых климатических условиях» (госрегистрация № 01201177760).

**Степень разработанности темы.** Большой объем исследований, выполненных в НАТИ, НАМИ, ТИУ (ТюмНГУ), Башкирском ГАУ, Иркутском ГАУ, Новосибирском ГАУ, Красноярском ГАУ, ФГАОУ ВО СВФУ имени М.К. Аммосова» и других научных организациях и учебных заведениях, показал, что при нарушении тепловых режимов работы некоторых агрегатов подвески машин в условиях низких температур ухудшается их функционирование. Установлено, что большая часть энергии колебаний, возникающая в результате взаимодействия колес с неровностями дорог, поглощается за счет взаимной работы элементов подвески и амортизаторов. Однако в условиях, при которых происходит нарушение процесса функционирования этих агрегатов, возникают дополнительные нагрузки и сопротивления, что отрицательно сказывается на взаимодействии элементов подвески в целом. Существующие способы решения данной проблемы не нашли широкого применения в силу низкой эффективности и значительных затрат для массового применения, а также малой изученности данного направления. Предполагается, что обеспечение эксплуатационных характеристик гидрав-

лических амортизаторов, работающих в условиях низких температур, возможно путем адаптации состава рабочей жидкости к условиям нагружения и температурам окружающей среды.

**Цель исследования** – повышение эксплуатационных характеристик гидравлических амортизаторов автомобилей, работающих в условиях низких температур, за счет применения модифицированной рабочей жидкости.

**Объект исследования** – процесс изменения эксплуатационных характеристик гидравлических амортизаторов автомобилей в условиях низких температур.

**Предмет исследования** – зависимости изменения эксплуатационных характеристик гидравлических амортизаторов автомобилей в условиях низких температур от изменения свойств рабочей жидкости.

**Задачи исследования:**

1. Установить зависимости изменения эксплуатационных характеристик гидравлических амортизаторов автомобилей, работающих в условиях низких температур.

2. Разработать математическую модель процесса функционирования гидравлических амортизаторов автомобилей в условиях низких температур окружающей среды.

3. Обосновать и разработать состав рабочей жидкости для амортизаторов автомобилей, используемых в сельском хозяйстве при низких температурах.

4. Провести производственную проверку и оценить экономическую эффективность полученных результатов исследования.

**Научная новизна работы:**

– установлены зависимости изменения эксплуатационных характеристик гидравлических амортизаторов автомобилей работающих в условиях низких температур;

– разработана математическая модель процесса функционирования гидравлических амортизаторов автомобилей в условиях низких температур окружающей среды;

– обоснован модифицированный состав рабочей жидкости для амортизаторов автомобилей, используемых в сельском хозяйстве при низких температурах.

Новизна технических решений, используемых при проведении исследований, подтверждена патентами РФ № 142785 и №.167373.

**Теоретическая и практическая значимость.**

1. Зависимости сил сопротивления на отбой и сжатие от температуры окружающей среды и состава амортизаторной жидкости.

2. Рекомендации по составу и условиям применения модифицированной жидкости для автомобилей, используемых при низких температурах.

3. Технология и техническое средство (патент № 167373 РФ) для сезонного технического обслуживания подвески.

4. Повышение средней технической скорости перевозки грузов на 21% и повышение производительности на 18%.

**Методология и методы исследования.** Основой для проведения теоретических и экспериментальных исследований являлся системный подход, обеспечивающий анализ взаимодействия элементов подвески автомобилей, используемых при низких температурах для перевозок грузов, в том числе сельскохозяйственного назначения, с учетом изменения режимов функционирования. В процессе исследований использованы положения гидростатики и гидродинамики, термодинамики, численные методы математического анализа и методы математического моделирования, современные программные комплексы систем автоматизированного проектирования и анализа. Экспериментальные и стендовые исследования были выполнены на лабораторных установках с использованием современных приборов и аппаратуры. Методы проведения и обработки полученных результатов экспериментальных данных соответствовали государственным методикам и стандартам.

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Математическая модель, описывающая процесс функционирования гидравлических амортизаторов автомобилей с учетом температуры окружающей среды, состава и свойств рабочей жидкости.

2. Зависимости изменения силового нагружения гидравлических амортизаторов при изменении температуры окружающей среды, скорости и величины перемещения штока амортизатора.

3. Результаты теоретических и экспериментальных исследований по обоснованию состава и условий применения рабочей жидкости гидравлических амортизаторов автомобилей, работающих при низких температурах окружающей среды.

**Степень достоверности и апробация работы.** Достоверность подтверждается высоким объемом теоретических и экспериментальных исследований; использованием современных нормативных документов, ГОСТов, приборов и оборудования; сопоставлением результатов, полученных теоретическими и экспериментальными исследованиями; совпадением полученных результатов исследований с данными других ученых по соответствующей тематике; внедрением полученных результатов в производственные сферы; выступлениями с докладами на международных конференциях и семинарах с результатами исследований; публикацией и одобрением полученных материалов в ведущих журналах.

Результаты диссертационной работы обсуждались и докладывались на заседаниях кафедры эксплуатации машинно-тракторного парка и на ученом совете Инженерного института Новосибирского ГАУ (2013 - 2020 гг.); на региональных научно-практических конференциях «Состояние и инновации технического сервиса машин и оборудования» в Новосибирском ГАУ (Новосибирск, 2011 и 2016 гг.); на II этапе Всероссийского конкурса на лучшую

научную работу среди студентов, аспирантов и молодых ученых Минсельхоза России в Красноярском ГАУ (Красноярск, 2016 г.); на III этапе Всероссийского конкурса на лучшую научную работу среди студентов, аспирантов и молодых ученых Минсельхоза России в РГАУ МСХА им. К.А. Тимирязева (Москва, 2016 г.).

**Реализация работы.** Внедрение результатов исследований осуществлялась в период с 2018 по 2019 г. в ООО «Сибирская Нива» Маслянинского района НСО, в ООО «Соколово» Колыванского района НСО и ЗАО «Крутишинское» Черепановского района НСО. Обоснован и внедрен разработанный технологический процесс обеспечения сил сопротивления гидравлических амортизаторов. Результаты исследования используются в учебном и научно-исследовательском процессах ФГБОУ ВО Новосибирский ГАУ.

**Публикации.** По теме диссертационной работы опубликовано 12 печатных работ, в том числе 4 публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, 1 статья в зарубежном журнале, получено 2 патента РФ.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, четырёх глав, общих выводов, рекомендаций, библиографического списка, включающего 111 наименований, из них 6 на иностранных языках, и приложений. Общий объем составляет 119 страниц машинописного текста, который включает 8 таблиц, 34 рисунка.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность выполненной работы, сформулированы цель, объект и предмет диссертационного исследования, научная новизна, практическая значимость, основные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе «Состояние вопроса. Цель и задачи исследований»** рассмотрены особенности эксплуатации и использования грузовых автомобилей в условиях низких температур, влияние внешних условий эксплуатации на процесс функционирования гидравлических амортизаторов подвески, процесс изменения технического состояния амортизаторов при низких температурах окружающей среды, определены применяемые в гидравлических амортизаторах рабочие жидкости и их характеристики, а также процесс изменения сил сопротивления под влиянием различных факторов, подробный анализ способов обеспечения функционирования гидравлических амортизаторов. Отмечено, что для перевозки различных грузов, в том числе сельскохозяйственного назначения, используется преимущественно автомобильный транспорт при продолжительном влиянии низких температур.

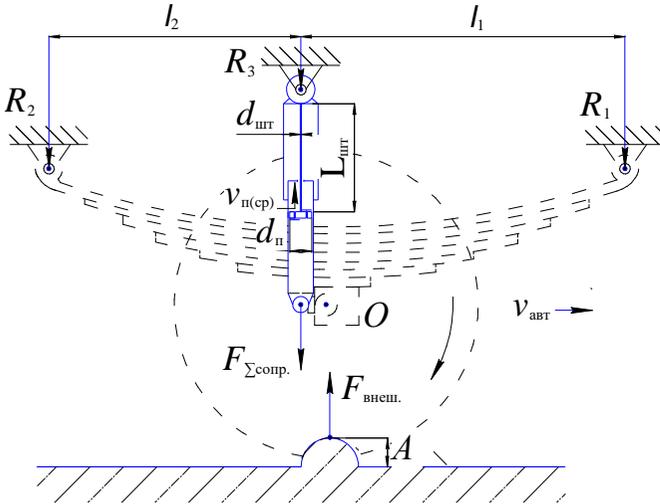
Вопросами эксплуатации в сельском хозяйстве транспорта при низких температурах, а также исследованием эффективности его использования занимались К.С. Алексахина, Н.В. Аникин, Ю.И., Ив.В. Денисов, А.А. Долгушин, А.П. Картошкин, Г.М. Крохта, Д.Ю. Левицкий, С.С. Молотов, Я.В. Про-

зоров, М.М. Разяпов, А.И. Савлук, Н.Е. Сергиенко, Ю.Н. Храпов и др. Авторами отмечено, при перевозке различных грузов, в том числе и в сельском хозяйстве, используются преимущественно грузовые автомобили семейства КамАЗ. При работе автомобилей в условиях низких температур эксплуатации происходит ухудшение работоспособности большинства его агрегатов, вследствие чего увеличивается динамическая нагруженность, ухудшаются показатели плавности хода, падает средняя эффективная скорость движения, возрастает количество неисправностей и снижается сохранность перевозимых грузов. Установлено также, что работа элементов подвески с нарушением параметров функционирования снижает долговечность узлов и агрегатов всего автомобиля более чем в 1,5 раза и ухудшает сохранность перевозимых грузов при их транспортировке. Так как большая часть энергии колебаний поглощается именно за счет гидравлических амортизаторов, эффективность их функционирования зависит от теплового режима и эксплуатационных характеристик рабочей жидкости.

Обеспечением функционирования амортизаторов с использованием различных технических решений занимались Н.В. Брусянцев, П.С. Казорин, Ю.Г. Морошкин, Н.П. Мустафаев, Ф.Н. Хламцов и др. Описанные способы позволили определить, что одним из перспективных и наиболее технологичных, на наш взгляд, является способ управления вязкостно-температурными характеристиками амортизаторной жидкости при добавлении маловязких компонентов. Однако данная тематика изучена мало и требуются дополнительные исследования.

**Во второй главе «Теоретический расчет значений сил сопротивления гидравлических амортизаторов с учетом изменения температуры окружающей среды»** проведён теоретический анализ функционирования гидравлического амортизатора в зависимости от внешних условий.

**1. Расчет значений сил сопротивления на отбой и сжатие в зависимости от температуры окружающей среды.** При движении транспортных средств по неровностям дорог возникают колебания, большая часть которых



передаются на кузов. Через колесо возмущающие силы, возникающие в результате перемещения направляющих элементов, в которых создается противодействующая сила, воздействуют на элементы подвески.

Рисунок 1 – Схема действующих сил в результате наезда колеса на препятствие

Действующая на колеса автомобиля вертикальная нагрузка  $F_{внеш}$  с амплитудой  $A$ , воздействует на точку приложения сил  $O$ . Заданный ход подвески обеспечивается за счет суммарных противодействующих сил  $F_{\Sigma сопр}$ , возникающих в упругом элементе и гидравлическом амортизаторе со скоростью перемещения поршня  $v_{п}$ .

При этом большая часть энергии колебаний не должна передаваться на вертикальные реакции опор  $R_1$ ,  $R_2$  и  $R_3$ , а преобразовываться из механической энергии в тепловую (рисунок 1).

На основе приведенной схемы разработана математическая модель расхода жидкости гидравлического амортизатора с несимметричной нагрузкой работы клапанного механизма, представленная формулами

$$Q_i = Q_{1i} + Q_{2i} + Q_{3i} + Q_{4i}, \text{ м}^3/\text{с}; \quad (1)$$

$$Q_i = Q_{1i} + Q_{3i} + Q_{4i}, \text{ м}^3/\text{с}. \quad (2)$$

где  $Q_i$  – суммарный расход амортизаторной жидкости,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;

$Q_{1i}$  – расход амортизаторной жидкости через радиальный зазор штока – направляющая,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;

$Q_{2i}$  – расход амортизаторной жидкости через радиальный зазор поршень–цилиндр,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;

$Q_{3i}$  – расход амортизаторной жидкости через дроссельные отверстия,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;

$Q_{4i}$  – расход амортизаторной жидкости через клапанные отверстия,  $\text{м}^3/\text{с}$ .

Для расчёта действительного расхода амортизаторной жидкости предложено выражение вида

$$Q_i = k_y \cdot S_{bi} \cdot v_{п}, \text{ м}^3/\text{с}, \quad (3)$$

где  $k_y$  – коэффициент утечек амортизаторной жидкости, характеризующий герметичность прилегания уплотнительного кольца к стенкам цилиндра;

$S_{bi}$  – площадь вытеснителя,  $\text{м}^2$ ;

$v_{п}$  – скорость относительного перемещения поршня,  $\text{м}/\text{с}$ ;

Выражения (4) и (5) позволяют рассчитать площади вытеснителя в различных режимах работы амортизатора:

$$S_{bi} = \frac{(d_{п}^2 - d_{шт}^2) \cdot \pi}{4}, \text{ мм}^2; \quad (4)$$

$$S_{bi} = \frac{d_{п}^2 \cdot \pi}{4}, \text{ мм}^2; \quad (5)$$

где  $d_{п}$  – диаметр поршня,  $\text{м}$ ;

$d_{шт}$  – диаметр штока,  $\text{м}$ ;

При расчетах расхода жидкости через радиальные зазоры шток–направляющая и поршень–цилиндр в режиме работы амортизатора на отбой и сжатие используется уравнение Хагена-Пуазейля, за основу которого взято уравнение течения жидкости через кольцевые зазоры и параллельные пластины клапанов:

$$Q_{o1,2} = \frac{\pi \cdot d_{шт} \cdot \delta^3}{12 \cdot \mu \cdot \rho \cdot l_1} \cdot \Delta P_i, \text{ м}^3/\text{с}; \quad (6)$$

$$Q_{c1} = \frac{\pi \cdot d_{п} \cdot \delta^3}{12 \cdot \mu \cdot \rho \cdot l_2} \cdot \Delta P_i, \text{ м}^3/\text{с}, \quad (7)$$

где  $\delta$  – радиальный зазор между элементами,  $\text{м}$ ;

$\mu$  – кинематическая вязкость жидкости,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;

$\rho$  – плотность амортизаторной жидкости,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;

$l_1$  – активная длина штока,  $\text{м}$ ;

$l_2$  – активная длина поршня,  $\text{м}$ ;

$P_i$  – перепад давления жидкости на отбой (сжатие),  $\text{МПа}$ .

Перепад давления в надпоршневом и подпоршневом пространстве находим по выражениям

$$\Delta P_{отб} = P_1 - P_2, \text{ МПа}; \quad (8)$$

$$\Delta P_{ск} = P_2 - P_1, \text{ МПа}, \quad (9)$$

где  $P_1$  – давление в надпоршневом пространстве,  $\text{МПа}$ ;

$P_2$  – давление в подпоршневом пространстве,  $\text{МПа}$ ;

Значения давления в надпоршневом и подпоршневом пространствах находим по формуле

$$P_i = \frac{F_i}{S_{vi}}, \text{ Н/м}^2, \quad (10)$$

где  $F_i$  – сила сопротивления на отбой или на сжатие, Н.

Установлено, что в зависимости от температуры амортизаторной жидкости происходит изменение ее динамической вязкости и незначительное изменение значений плотности, которые возможно определить с использованием выражения

$$\rho = \rho_{20} [1 + \zeta \cdot (T_{нач} - T)], \text{ кг/м}^3, \quad (11)$$

где  $\zeta$  – коэффициент теплового объемного расширения технических жидкостей на основе нефти, 1/К;

$\rho_{20}$  – плотность амортизаторной жидкости при температуре окружающей среды, равной 20 °С, кг/м<sup>3</sup>;

$T_{нач}$  – температура амортизаторной жидкости, равная значению плотности при 293 К;

$T$  – температура амортизаторной жидкости, °С.

Значение коэффициента объемного теплового расширения технических жидкостей на основе нефти приведено в справочнике и выбирается из таблицы при температуре 293 К.

Расход жидкости через дроссельные и клапанные отверстия рассчитываем исходя из выражений

$$Q_{o3} = \psi_d \cdot S_{до} \sqrt{\frac{2 \cdot F_i}{(\rho_{20} [1 + \zeta (T_{нач} - T)]) \cdot S_{в.i}}}, \text{ м}^3/\text{с}; \quad (12)$$

$$Q_{o4} = \psi_{кл} \cdot S_{кл} \sqrt{\frac{2 \cdot F_i}{(\rho_{20} [1 + \zeta (T_{нач} - T)]) \cdot S_{в.i}}}, \text{ м}^3/\text{с}; \quad (13)$$

где  $\psi_d$  – коэффициент расхода жидкости через дроссельные отверстия;

$\psi_{кл}$  – коэффициент расхода жидкости через клапанные отверстия;

$S_{до}$  – площадь проходного сечения дроссельного отверстия, м<sup>2</sup>;

$S_{кл}$  – площадь проходного сечения клапанного отверстия, м<sup>2</sup>;

$\rho$  – плотность амортизаторной жидкости АЖ-12Т (при 20° С), кг/м<sup>3</sup>.

$F_i$  – сила сопротивления гидравлического амортизатора в режиме его работы на отбой либо сжатие, Н.

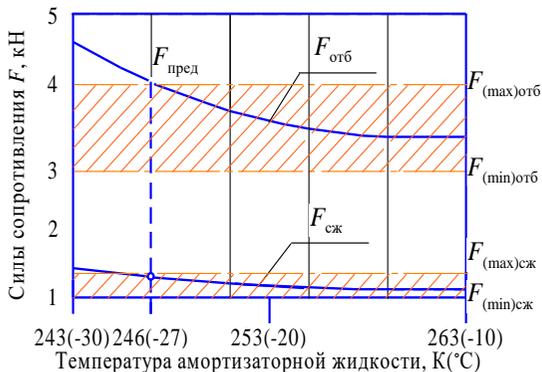
Объединив при расчетах все выражения зависимостей расхода жидкости через элементы дроссельной системы гидравлического амортизатора в режиме «отбой», получим

$$F_{отб} = \frac{6 \cdot \pi \cdot \mu \cdot k_y \cdot l_1 \cdot v_n \cdot d_n \cdot S_{в(отб)} \cdot \delta^3 - 18 \sqrt{\frac{4 \cdot \pi \cdot k_y \cdot v_n \cdot d_n \cdot \delta^3}{3(\mu \cdot l_1 \cdot S_{в(отб)}) \cdot (\rho_{20} [1 + \zeta (T_{нач} - T)]) \cdot (\psi_d \cdot S_{до} \cdot \psi_{кл} \cdot S_{кл})}}}{\sqrt{\frac{4}{(S_{в.i} \cdot (\rho_{20} [1 + \zeta (T_{нач} - T)]))^2 \cdot \mu^2 \cdot l_1^2 \cdot \psi_n^2 \cdot S_{в.i}^2 \cdot S_{до}^2 \cdot \psi_{кл}^2 \cdot S_{кл}^2} + \frac{36 \cdot S_{в(отб)} \cdot \mu^2 \cdot l_1^2 \cdot \psi_d^2 \cdot S_{до}^2 \cdot S_{кл}^2 \cdot \psi_{кл}^2}{(\rho_{20} [1 + \zeta (T_{нач} - T)])}}, \text{ Н.} \quad (14)$$

$$\pi^2 \cdot d_n \cdot \delta^6$$

Аналогично расход жидкости через элементы дроссельной системы гидравлического амортизатора в режиме «сжатие» рассчитываем исходя из того, что расход жидкости через радиальный зазор поршень – цилиндр исключен:

$$F_{сж} = \frac{k_y^2 \cdot v_n^2 \cdot S_{в(сж)}^2}{\left( \frac{\pi \cdot k_y \cdot v_n \cdot d_{ш} \cdot \delta^3}{3 \cdot \mu \cdot l_2} + \frac{2 \cdot \psi_d^2 \cdot S_{до}^2 \cdot S_{кл}^2 \cdot \psi_{кл}^2}{S_{в(сж)} \cdot (\rho_{20} [1 + \zeta(T_{нач} - T)])} \right)}, \text{ Н.} \quad (15)$$



На основании анализа выражений (13) и (14) построена теоретическая зависимость изменения сил сопротивления гидравлического амортизатора от условий внешнего нагружения и температуры окружающей среды (рисунок 2).

Рисунок 2 – Теоретическая зависимость изменения сил сопротивления гидравлического амортизатора от температуры эксплуатации

Установлено, что значения сил сопротивления гидравлического амортизатора выходят за пределы значений, установленных заводом изготовителем, с отметки 246 К (-27 °C) и достигают 4022 и 1226 Н на отбой и сжатие соответственно, следовательно, в этих точках амортизатор становится неработоспособным. Зоной со штрихованием отмечено, что гидравлический амортизатор работоспособен в диапазоне температур от 263 К (-10 °C) до указанной линии, далее силы сопротивления превышают заданные значения в несколько раз.

**2. Расчет теплового баланса гидравлического амортизатора грузового автомобиля.** За основу рабочего процесса гидравлических амортизаторов взят процесс преобразования механической энергии и энергии гидравлического трения в узлах в тепловую энергию. Образование тепловой энергии внутри гидравлических амортизаторов зависит в большей степени от процесса дросселирования амортизаторной жидкости через специальные клапаны. Однако эффективность работы гидравлических амортизаторов также напрямую зависит и от их свойства поддерживать эффективную температуру – поддержания теплового баланса, а именно, отведения избыточной теплоты в атмосферу через наружные поверхности. Соответственно, уравнение теплового баланса гидравлического амортизатора будет иметь следующий вид:

$$Q_s = Q_{пов} + Q_{наг}, \text{ Дж,} \quad (16)$$

где  $Q_s$  – количество теплоты, выделившееся в амортизаторе за счет дросселирования амортизаторной жидкости через систему клапанов при перемещении поршня относительно стенок внутреннего резервуара, Дж;

$Q_{\text{пов}}$  – количество теплоты, отведенное с поверхности гидравлического амортизатора, Дж;

$Q_{\text{наг}}$  – количество теплоты, использованное для нагрева деталей гидравлического амортизатора, Дж.

Количество теплоты, выделившееся в амортизаторе за счет дросселирования амортизаторной жидкости, определялось по выражению

$$Q_s = k_{\text{ср}} \cdot v_{\text{п}}^2, \text{ Дж}, \quad (17)$$

где  $k_{\text{ср}}$  – средний коэффициент сопротивления амортизатора, Н·с/м<sup>2</sup>;

$v_{\text{п}}$  – скорость перемещения штока гидравлического амортизатора, м/с;

Преобразовав уравнение (17), получим:

$$Q_s = \frac{k_{\text{отб}} + k_{\text{сж}}}{2} \cdot v_{\text{пор}}, \text{ Дж}, \quad (18)$$

где  $k_{\text{отб}}$  – коэффициент сопротивления амортизатора на ходе отбоя, Н·с/м;

$k_{\text{сж}}$  – коэффициент сопротивления амортизатора на ходе сжатия, Н·с/м;

Потери теплоты с поверхности гидравлического амортизатора описываются как

$$Q_{\text{пов}} = \alpha \cdot (\pi \cdot D \cdot L) \cdot (T_{\text{ам.ж}} - T_{\text{об.л}}) \cdot t, \text{ Дж}, \quad (19)$$

где  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи, характеризующий интенсивность конвективного теплообмена Дж / (м<sup>2</sup>·К·с);

$D$  – диаметр наружной стенки цилиндра гидравлического амортизатора, мм;

$L$  – длина цилиндра гидравлического амортизатора, мм;

$T_{\text{ам.ж}}$  – среднестатистическая температура амортизаторной жидкости, К;

$T_{\text{об.л}}$  – среднестатистическая температура обдувающего потока воздуха, К;

$t$  – время работы гидравлического амортизатора, с.

Значения коэффициента теплоотдачи  $\alpha$ , характеризующего интенсивность конвективного теплообмена, получены в результате расчетов в пакете программ SOLIDWORKS Simulation на основании рекомендаций.

Количество теплоты, потраченное на нагрев деталей гидравлического амортизатора:

$$Q_{\text{наг}} = c \cdot M \cdot (T_{\text{ам.ж}} - T_{\text{об.л}}), \text{ Дж}, \quad (20)$$

где  $c$  – удельные теплоемкости амортизаторной жидкости и деталей амортизатора, участвующих в теплообмене, Дж / (кг·К);

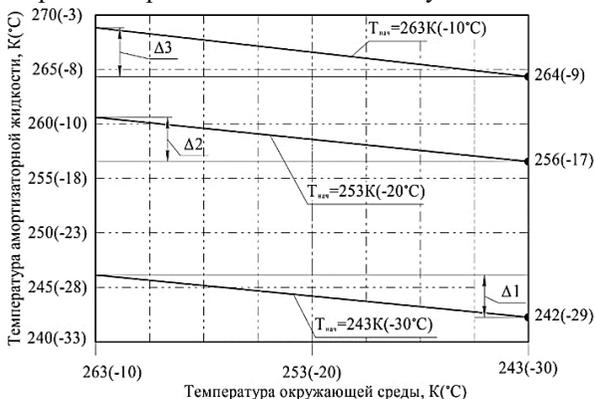
$M$  – масса амортизаторной жидкости и деталей амортизатора, участвующих в теплообмене.

Однако существующие модели расчета параметров гидравлических амортизаторов не позволяют определить температуру амортизаторной жидкости при установившемся режиме движения автомобиля. При совместном

решении выражений (19), (20) и (21) получаем уравнение теплообмена гидравлического амортизатора при его работе на установившемся режиме, которое позволит определить среднединамическую температуру амортизаторной жидкости:

$$T_{ам.ж} = T_{обд.п} + \frac{(k_{отб} + k_{сж}) \cdot v_{пор}}{2(\alpha \cdot F_{пов} \cdot t + c \cdot M)}, K \quad (21)$$

На основании представленной модели, описанной выражением (20), построена теоретическая зависимость установившейся температуры амортизаторной



жидкости от температуры окружающей среды (рисунок 3).

Изменение температуры амортизаторной жидкости происходит несущественно, при начальных температурах  $T_{нач} = 243$  K (-30 °C) она увеличивается на 4 K, а при  $T_{нач} = 253$  K (-20 °C) и  $T_{нач} = 263$  K (-10 °C) всего на 5 K.

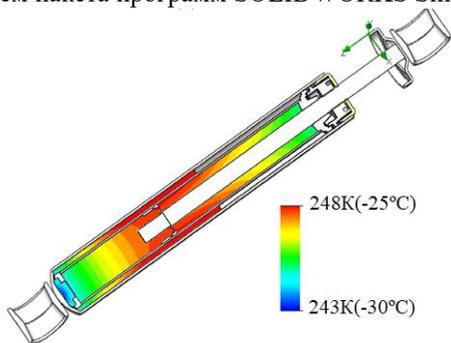
Рисунок 3 – Зависимость установившейся температуры амортизаторной жидкости от температуры окружающей среды

При понижении внешней температуры до 243 K (-30 °C) температура амортизаторной жидкости снижается практически до начальных температур, что свидетельствует о значительном теплообмене поверхностью амортизатора с окружающей средой.

### 3. Модель функционирования гидравлического амортизатора.

Для определения параметров функционирования амортизатора, а также для проверки адекватности предложенной математической модели, произведен комбинированный расчет гидравлического амортизатора с использованием пакета программ SOLIDWORKS Simulation. Моделирование процессов

функционирования проводили методом конечных элементов и виртуального тестирования CAD-модели. При моделировании гидравлических и теплообменных процессов программный комплекс использует стандартный алгоритм расчета, дополненный частными производными. Функциональная модель гидравлического амортизатора,



обработанного в программном комплексе представлена на рисунке 4. При исследовании процесса прогнозирования поведения модели гидравлического амортизатора в условиях силового нагружения и низких температур эксплуатации установлено, что наиболее значимыми факторами являются температура окружающей среды, а также скорость и величина перемещения штока.

Рисунок 4 – Графическое изображение моделирования температуры рабочей жидкости в амортизаторе при его функционировании.

Другие факторы оказывали наименьшее влияние либо не соответствовали предъявляемым требованиям.

В третьей главе «Методика экспериментальных исследований закономерностей изменения сил сопротивления гидравлических амортизаторов грузовых автомобилей в условиях низких температур» изложена программа и методика их проведения. Программа исследований предусматривает решение следующих вопросов: выявить зависимости изменения сил сопротивления гидравлических амортизаторов при эксплуатации в условиях низких температур; собрать необходимые данные для расчета теоретической модели функционирования гидравлического амортизатора и подтвердить ее адекватность; используя теоретические предпосылки, разработать способ обеспечения функционирования гидравлического амортизатора при низких температурах эксплуатации; найти уравнение связи между выбранным параметром функционирования и температурой амортизаторной жидкости. Исходя из поставленных задач, разработана и реализована следующая программа экспериментальных исследований:

1. Эксплуатационные испытания на грузовом автомобиле: установление зависимости установившейся температуры амортизаторов от скорости передвижения автомобиля; эксплуатационные испытания амортизаторов с модифицированной амортизаторной жидкостью.

Для проведения эксплуатационных испытания функционирования гидравлических автомобилей смонтирован измерительный комплекс (рисунок 4).

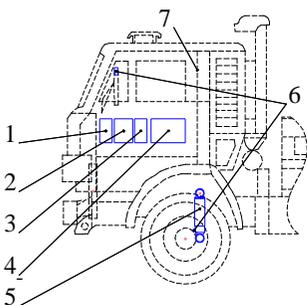
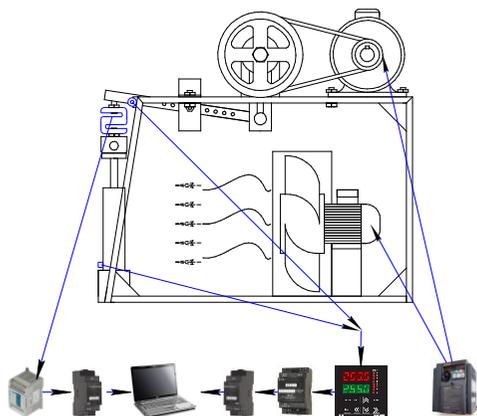


Рисунок 4 – Структура измерительного комплекса для регистрации температуры экспериментальной установки №1: 1 – устройство контроля температуры УКТ 38 Щ 4-ТП; 2 – преобразователь интерфейсов ОВЕН АС-2М; 3 – преобразователь интерфейсов

ОВЕН АС-4; 4 – персональный компьютер; 5 – гидравлический амортизатор; 6 – термопреобразователи различных модификаций.

2. Стендовые испытания гидравлических амортизаторов на лабораторной установке: определение установившейся температуры амортизаторной жидкости в зависимости от температуры окружающей среды, от скорости и величины перемещения штока; измерение значений сил сопротивления от различных факторов; предварительные испытания модифицированной жидкости.



Структура измерительного комплекса лабораторной установки №2 представлена на рисунке 5. В качестве физического объекта исследований был выбран гидравлический амортизатор типа П40.3.2905005. Выбор автомобиля КАМАЗ обусловлен большой представленностью этой марки в общей структуре парка грузовых автомобилей и перспективностью ее для страны.

Рисунок 5 – Экспериментальная установка №2

В результате исследований параметров функционирования амортизаторов и проведения анализа литературы были определены основные значимые факторы, влияющие на функцию отклика – силу сопротивления на отбой и сжатие (таблица).

Уровни и интервалы варьирования факторов

Факторы	Условные обозначения	Код	Уровни факторов			Интервал варьирования
			-1	0	+1	
Температура окружающего воздуха, °С	$T$	$X_1$	-30	-20	-10	10
Скорость перемещения штока, м/с	$V_{шт}$	$X_2$	0,26	0,39	0,52	0,13
Величина перемещения штока, мм	$L_{шт}$	$X_3$	20	50	80	30

Выбран композиционный симметричный трехуровневый план № 34, планом предусмотрено проведение 14 опытов с варьированием выбранных факторов. Обработка опытных данных, полученных в результате эксперимента, проводилась посредством регрессионного анализа.

В четвертой главе «Результаты экспериментальных исследований» приведены результаты выполненных экспериментальных исследований и проведен их анализ. Установлено, что температура амортизаторной жидкости в режиме реальной эксплуатации при низких температурах изменяется в диапазоне от 1 до 4 К. Увеличение скорости движения грузового автомобиля с 20 до 60 км/ч сопровождалось снижением установившейся температуры амортизаторной жидкости, и она не превышала значений температуры окружающей среды в исследуемом диапазоне низких температур (рисунок 6).

Аналогично при скорости движения автомобиля до 20 км/ч и температуре окружающей среды 243 К (-30° С) нагрева амортизаторной жидкости также не происходило в связи с низкой эффективностью перемещения элементов подвески. При начальных температурах окружающей среды 243 и 253 К величины нагрева ( $\Delta 3$ ,  $\Delta 2$  и  $\Delta 1$ ) температуры амортизаторной жидкости составили 3, 3,5 и 4 К за промежутков в среднем около 30 мин, что является показателем низкой эффективности функционирования амортизаторов.

Для подтверждения теоретических положений и обоснования значимости факторов, влияющих на процесс функционирования амортизаторов, был проведен ряд экспериментов с использованием лабораторной установки №2.

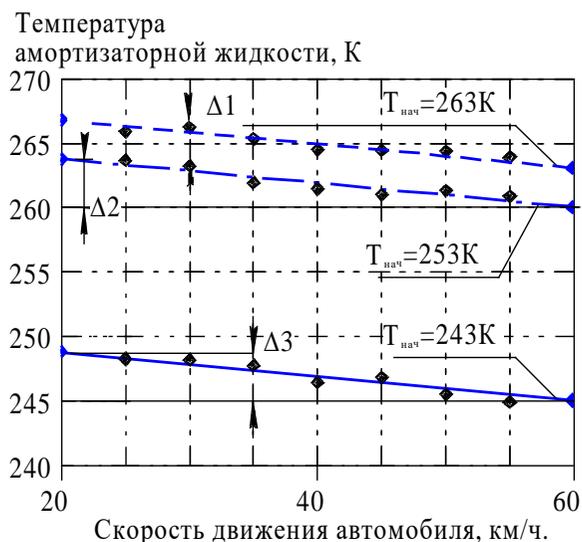


Рисунок 6 – Зависимость установившейся температуры амортизаторной жидкости от скорости передвижения автомобиля.

Результаты экспериментальных исследований позволили установить, что при увеличении скорости перемещения штока от 0,26 до 0,52 м/с происходит наиболее интенсивное возрастание температуры амортизаторной жидкости (рисунок 7).

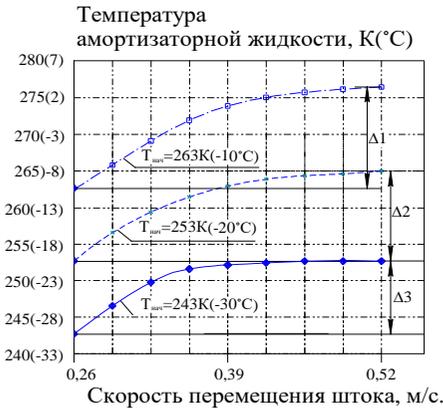


Рисунок 7 – Зависимость установившейся температуры амортизаторной жидкости от скорости перемещения штока

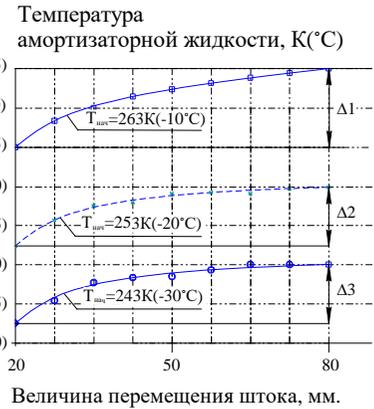


Рисунок 8 – Зависимость установившейся температуры амортизаторной жидкости от величины перемещения штока

Определено, что при  $T_{нач} = 243; 253$  и  $263$  К изменение температуры составило 10, 14 и 15 К соответственно. При этом дросселирование жидкости проходило в режиме непрерывного функционирования, без блокирования подвижных элементов. Изменение величины перемещения штока в диапазоне 20; 50 и 80 мм при аналогичных начальных температурах испытаний 243 К(-30°C); 253 К(-20°C) и 263 К(-10°C) приводит к нагреву амортизаторной жидкости на 7, 8 и 10 К соответственно (рисунок 8). Следовательно, оба этих фактора оказывают значительное влияние на процесс функционирования гидравлических амортизаторов.

Анализ данных по определению влияния низких температур на изменение сил сопротивления на отбой и сжатие позволил установить, что температура амортизаторной жидкости, при которой достигаются предельные значения сил сопротивления на отбой  $F_{отб} = 4022$  Н и на сжатие  $F_{сж} = 1226$  Н, составляет 246 К (-27 °C).

Значения сил сопротивления на отбой изменяются в диапазоне от 3230 до 4550 Н при максимальном допустимом значении 4022 Н. Силы сопротивления на сжатие находятся в диапазоне от 830 до 1410 Н при допустимом значении 1226 Н. Точкой  $F_{пред}$  также отмечено предельное состояние гидравлических амортизаторов, при котором происходит нарушение установленных пределов функционирования. Так как между силами сопротивления амортизаторов на отбой и сжатие и основными факторами, такими как скорость и величина перемещения штока, а также температурой окружающей среды существует функциональная связь, был реализован композиционный симметричный трехуровневый план для трех факторов. В результате исследований и

регрессионного анализа получено уравнение регрессии, представленное в раскодированном виде выражением

$$F_i = 3283,5 + 975,9T + 142,3v_{ам} - 19,1L_{шт} + 1,8T^2 - 25,2v_{ам}^2 + 0,13L_{шт}^2 - 151,2Tv_{ам} + 0,03TL_{шт} - 25,8v_{ам}L_{шт}, \quad (22)$$

где  $T$  – температура окружающей среды, К;

$v_{ам}$  – скорость перемещения штока гидравлических амортизаторов, м/с;

$L_{шт}$  – величина перемещения штока, мм.

Анализ представленных на рисунке 10 зависимостей доказывает, что наибольшее влияние на силу сопротивления оказывают температура окружающей среды и скорость перемещения штока.

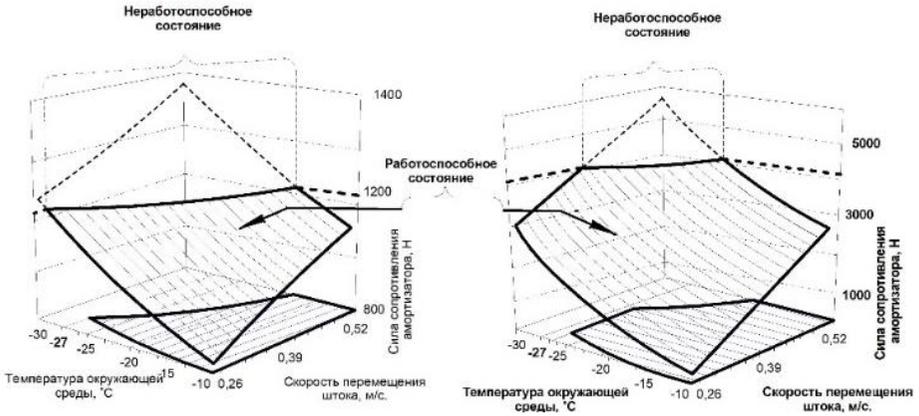


Рисунок 10 – Зависимость установившейся температуры амортизаторной жидкости от скорости передвижения автомобиля

Для обеспечения функционирования амортизаторов при саморазогреве разработан способ, обоснованы состав и условия применения модифицированной жидкости, обеспечивающие функционирование амортизатора при низких температурах в пределах, установленных конструкторской документацией. В основе модифицированной жидкости используется амортизаторная жидкость АЖ-12Т с добавлением модификатора ДТ-3-К5 от 5% и более от общего объема рабочей жидкости (рисунок 11). Анализ зависимости позволил установить, что добавление модификатора в диапазоне от 5 до 20 % позволяет значительно снизить силы сопротивления на отбой и сжатие.

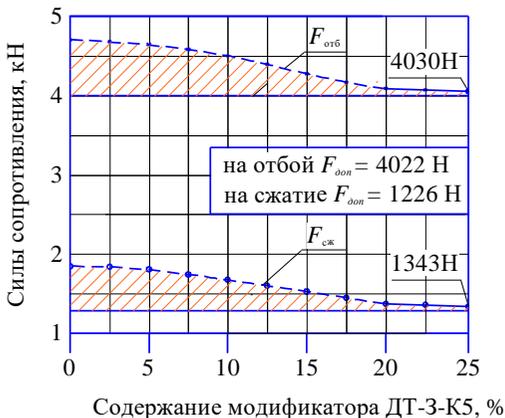


Рисунок 11 – Зависимость изменения сил сопротивления на отбой ( $F_{отб}$ ) и сжатие ( $F_{сж}$ ) гидравлических амортизаторов при различном содержании модификатора ДТ-3-К5 при температуре эксплуатации 243 К (-30 °С)

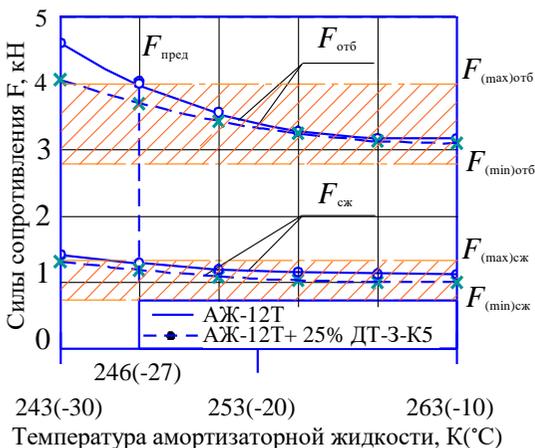


Рисунок 12 – Зависимость изменения сил сопротивления на отбой ( $F_{отб}$ ) и сжатие ( $F_{сж}$ ) гидравлических амортизаторов при использовании рабочей жидкости АЖ-12Т и с добавлением 25% модификатора ДТ-3-К5 при низких температурах эксплуатации.

Исследования предложенной жидкости с добавлением 25% модификатора ДТ-3-К5 в соответствии с ресурсными испытаниями, регламентируемыми разделом 5.9 ГОСТ 34339-2017, показали, что отклонения значений сил сопротивления от эталонных не превышали 4% за 2 млн циклов, что свидетельствовало о нормальном функционировании амортизаторов.

Однако для достижения требуемых результатов требуется увеличение содержания дизельного топлива до 25%. Использование модифицированной жидкости в пропорции 75% АЖ-12 и 25% ДТ-3-К5 позволяет уменьшить силы сопротивления на отбой и сжатие практически до предельных допустимых значений, составляющих  $F_{отб} = 4030$  и  $F_{сж} = 1343$  Н.

Как показано на рисунке 12, при использовании модифицированной рабочей жидкости в сравнении со стандартной АЖ-12Т удалось сохранить параметры функционирования гидравлических амортизаторов в указанном диапазоне низких температур.

Для реализации выполненных исследований по обеспечению функционирования гидравлических амортизаторов грузовых автомобилей, используемых в сельском хозяйстве при низких температурах, разработана и внедрена технологическая карта технического обслуживания гидравлических амортизаторов, приведенная в диссертационной работе. Целесообразным решением также является внедрение дополнительных операций при проведении сезонного технического обслуживания, выполняемых по регламенту с такими агрегатами, как ходовая часть, подвеска, рама и т.д.

Результаты полученных данных по обоснованию состава и условий применения амортизаторной жидкости для автомобилей, используемых в сельском хозяйстве при низких температурах, позволили увеличить среднюю техническую скорость на 21% и производительность на 18%. Годовой экономический эффект от внедрения результатов выполненных исследований в условиях сельскохозяйственных предприятий может составить до 23000 руб. на один автомобиль.

### **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

1. Эффективность функционирования гидравлических амортизаторов при эксплуатации грузовых автомобилей в условиях низких температур определяется тепловым режимом их работы. Нарушение теплового режима гидравлических амортизаторов приводит к существенному увеличению вязкости рабочей жидкости и ухудшению эксплуатационных свойств. Адаптация амортизаторов для условий низких температур окружающей среды возможна за счет обоснования состава и условий применения рабочей жидкости гидравлических амортизаторов.

2. В качестве технического критерия функционирования гидравлических амортизаторов в условиях низких температур использовались силы сопротивления на отбой и сжатие. Получены зависимости изменения сил сопротивления при температурах окружающей среды от 243 К (-30° С) до 263 К (-10° С), которые изменяются на отбой от 3900 до 4800 Н и на сжатие от 800 до 1420 Н. Установлено, что значения сил сопротивления гидравлических амортизаторов на отбой и сжатие превышают нормативные значения при температурах ниже 246 К (-27°С).

3. Разработана математическая модель процесса функционирования гидравлического амортизатора, учитывающая температуру окружающей среды. В качестве значимых факторов также выбраны величина и скорость перемещения штока гидравлического амортизатора. Установлено, что в зависимости от выбранных факторов в рассматриваемых условиях температура амортизаторной жидкости может изменяться на 4...14 К.

4. Разработаны и обоснованы состав и условия применения модифицированной жидкости гидравлических амортизаторов для низких температур окружающей среды. Для условий Новосибирской области при низких температурах обоснован состав модифицированной жидкости в соотношении 25%

модификатора ДТ-3-К5 и 75 % АЖ-12Т. Максимальные значения сил сопротивления при испытании амортизаторов с модифицированной жидкостью не превышали 4030 Н на отбой и 1343 Н на сжатие. Проведены ресурсные испытания гидравлического амортизатора с модифицированной жидкостью, по результатам которых установлено, что отклонения значений сил сопротивления от эталонных не превышали 4%;

5. Обоснованы и реализованы технология и техническое средство для сезонного технического обслуживания подвески автомобилей. Производственная проверка результатов исследований гидравлических амортизаторов выполнялась в условиях предприятий ЗАО «Крутишинское», ООО «Соколово» и ООО «Сибирская Нива», по результатам которых дана их технико-экономическая оценка. Внедрение результатов выполненных исследований позволит увеличить среднюю техническую скорость транспортировки грузов на 21%, а также производительность на 18%. Годовой экономический эффект от внедрения может составить до 23000 руб. на один автомобиль.

### **Рекомендации производству**

Результаты выполненных исследований рекомендуется использовать предприятиям при эксплуатации автомобилей в условиях низких температур в АПК и других сферах, при разработке технических средств и мероприятий по обеспечению эффективности эксплуатации автомобильного транспорта, научно-исследовательским институтам, занимающимся вопросами подготовки и адаптации транспортных средств к суровым условиям эксплуатации, а также в учебном процессе при подготовке и повышении квалификации технических специалистов в сфере АПК.

### **Перспективы дальнейшей разработки темы**

Перспективным направлением дальнейших научных исследований является использование модифицированной рабочей жидкости с добавлением современных стабилизирующих вязкость присадок. Требуется также изучение изменения функционирования гидравлических амортизаторов с применением модифицированной жидкости при высоких температурах эксплуатации.

### **Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:**

*Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК:*

1. Домнышев Д.А. Исследование теплового режима работы агрегатов трансмиссии и подвески автомобиля в зимних условиях / А.А. Долгушин, А.Ф. Курносков, М.В. Вакуленко // Достижения науки и техники АПК. – 2015. Т.29. №7, С. 82-84.

2. Домнышев Д.А. Применимость гидравлических амортизаторов автомобилей в условиях отрицательных температур / А.А. Долгушин, Д.М. Воронин, А.Ф. Курносов, Д.В. Баранов // Сибирский вестник сельскохозяйственной науки №4, – 2016 С. 79-85.

3. Домнышев Д.А. Результаты эксплуатационных испытаний модифицированной амортизаторной жидкости / А.А. Долгушин, А.Ф. Курносов, В.В. Тихоновский // Известия Оренбургского государственного аграрного университета №6 (74), – 2018 С. 89-91.

4. Домнышев Д.А. Контроль эксплуатационных характеристик амортизаторов транспортных средств сельскохозяйственного назначения / Ю.А. Гуськов, А.Ф. Курносов, // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2019. № 2 (76). С. 133-137.

*Публикации в изданиях, индексируемых в международных базах цитирования:*

Domnyshev D.A. Performance assurance of hydraulic shock-absorbers at sub-zero temperatures / A.A. Dolgushin, D.M. Voronin, Yu.N. Blynsky, A.F. Kurnosov // Journal of Engineering and Applied Sciences.2019.Т. 14, № 24.С. 9608-9612.

*Патенты РФ:*

1. Патент № 142785 РФ. Гидравлический амортизатор с теплоаккумулятором / Ю.А. Гуськов, М.Л. Вертей, А.А. Долгушин, Д.А. Домнышев № 2014106686/11; заявл. 21.02.2014, опубл. 10.07.2014 Бюл. № 19.

2. Патент № 167373 РФ. Стенд для определения эксплуатационных характеристик гидравлических амортизаторов / Д.А. Домнышев, А.А. Долгушин, А.Ф. Курносов, Д.В. Баранов; № 2016114402; заявл. 13.04.2016, опубл. 10.01.2017 Бюл. № 1.

*Публикации в других изданиях:*

1. Домнышев Д.А. Влияние климатических условий на работу автомобильных трансмиссий / А.А. Долгушин, А.Ф. Курносов / Материалы ежегодной научно-практической конференции студентов и аспирантов Инженерного института (Новосибирск, 12 апреля 2011 г.): в 2 ч. / Новосиб. гос. аграр. ун-т. Инженер. ин-т. – Новосибирск, 2009. – Ч.1. –с. 10-13.

2. Домнышев Д.А. Обоснование способа подогрева элементов ходовой части автомобилей / А.А. Долгушин // Материалы ежегодной научно-практической конференции студентов и аспирантов Инженерного института (Новосибирск, 11 ноября 2014 г.): в 2 ч. / Новосиб. гос. аграр. ун-т. Инженер. ин-т. – Новосибирск, 2014. с. 25-28.

3. Домнышев Д.А. Анализ причин снятия с эксплуатации амортизаторов автомобилей с эксплуатации в условиях НСО / А.А. Долгушин, Д.В. Баранов // Материалы ежегодной научно-практической конференции студентов и аспирантов Инженерного института (Новосибирск, 10-11 ноября 2015 г.): в 1 ч. / Новосиб. гос. аграр. ун-т. Инженер. ин-т. – Новосибирск, 2015. с. 31-34.

4. Домнышев Д.А. Обоснование применимости гидравлических амортизаторов автомобилей в условиях отрицательных температур / А.А. Долгушин,

Д.М. Воронин, А.Ф. Курносов, Д.В. Баранов // Материалы ежегодной научно-практической конференции студентов и аспирантов Инженерного института (Новосибирск, 10-11 ноября 2015 г.): в 1 ч. / Новосибир. гос. аграр. ун-т. Инженер. ин-т. – Новосибирск, 2016. с. 187-191.

5. Домнышев Д.А. Проблемы эксплуатации гидравлических амортизаторов автомобиля в условиях отрицательных температур / А.А. Долгушин, Д.В. Баранов // Сборник научных трудов Международной научно-технической конференции студентов и молодых ученых в 4-х ч. 18-20 апреля 2017 г. с. 6-10.

6. Домнышев Д.А. Влияние эксплуатационных режимов работы гидравлических амортизаторов в условиях отрицательных температур на температуру амортизаторной жидкости А.А. Долгушин // Сборник научных трудов Международной научно-технической конференции студентов и молодых ученых в 4-х ч. 18-20 апреля 2017 г. с.–25-28.

7. Домнышев Д.А. Исследование интенсивности теплообразования при работе гидравлических амортизаторов автомобилей / А.А. Долгушин, А.Ф. Курносов, Д.М. Воронин // В сборнике: Проблемы развития технологий создания, сервисного обслуживания и использования технических средств в агропромышленном комплексе. Материалы международной научно-практической конференции. Под общей редакцией Н. И. Бухтоярова, В. И. Оробинского. 2017. С. 28-35.

---

Выход в свет 19.10.2021 г. Формат 60 × 84 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>  
Объем 1,0 печ. л. Тираж 100 экз. Заказ №173

---

Отпечатано в Сибирском федеральном  
научном центре агrobiотехнологий Российской академии наук  
630501, р.п. Краснообск, Новосибирский район,  
Новосибирская область, здание СФНЦА РАН, а/я 463