

На правах рукописи

КАРАСЕВ ЮРИЙ АНАТОЛЬЕВИЧ

**ПОВЫШЕНИЕ РЕСУРСА ГУСЕНИЧНЫХ ЛЕСНЫХ МАШИН ЗА
СЧЕТ УЛУЧШЕНИЯ ТРИБОТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК
СМАЗОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ В ДВИЖИТЕЛЕ**

Специальность 4.3.4. – Технологии, машины и оборудование для лесного
хозяйства и переработки древесины

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2026

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна» (ФГБОУ ВО СПбГУПТД).

Научный руководитель:

Марков Виктор Александрович – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры машин автоматизированных систем ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна»

Официальные оппоненты:

Пилюшина Галина Анатольевна – доктор технических наук, профессор кафедры машиностроения и материаловедения ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет»

Руденко Иван Иванович – кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры технического сервиса машин и оборудования ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет - МСХА имени К.А. Тимирязева»

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Арктический государственный агротехнологический университет"

Защита диссертации состоится «09» апреля 2026 г. в 11 часов 00 минут на заседании Диссертационного Совета 24.2.385.02 при ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна» по адресу: 198095, г. Санкт-Петербург, ул. Ивана Черных, д. 4, зал заседаний Учёного совета, А-233.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте www.studt.ru ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна».

Автореферат разослан «___» 2026 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



доктор технических наук, проф.
Махотина Людмила Герцевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования. Одним из приоритетных направлений единого плана по достижению национальных целей развития РФ на период до 2024 г. и плановый период до 2030 г, является развитие Арктической зоны. Актуальность проблемы лесных и транспортно-технологических работ арктической зоне обусловлена особыми трудностями, связанными с суровым климатом и уникальностью лесных ресурсов, которые необходимо сохранить для будущих поколений. Здесь особое значение приобретает не только получение экономической выгоды от древесных материалов, но и бережное отношение к окружающей среде, поддержание баланса экосистем и сохранение биологического разнообразия.

Для проведения лесозаготовки в арктической зоне необходимо учитывать местные климатические условия, чтобы минимизировать негативное воздействие на окружающую среду. Кроме того, важно использовать специальные технологии и оборудование, а также проводить контроль за соблюдением экологических стандартов.

Особое внимание уделяется также вопросам лесохозяйственного планирования, чтобы обеспечить устойчивое использование лесных ресурсов в арктической зоне. Важно разрабатывать программы по восстановлению лесов после заготовки и обеспечивать контроль за их выполнением.

Таким образом, лесозаготовка в арктической зоне требует особого подхода и учета специфики этого региона для обеспечения устойчивого использования лесных ресурсов и сохранения природы.

В арктической зоне, где условия эксплуатации техники очень тяжелые из-за низких температур, снегопадов и льдов, требуются специальные тракторы, способные работать в таких условиях. Ранее для работы в таких условиях применялась в основном зарубежная гусеничная техники, однако в последние годы, в связи с уходом зарубежных производителей из РФ, недоступностью запасных частей и сложностью обслуживания иностранной техники, совершен разворот в сторону отечественных производителей. Для лесных работ стали применять трактора Онежец-300, МСН-10 и даже давно забытые классические трактора ЛХТ-100, ТДТ-100 и ТТ-4.

На предприятии ОП "Онежский трактор", которое является приемником "Онежского тракторного завода" (ОТЗ) налажен мелкосерийный выпуск тракторов ТДТ-55, ЛХТ-100, ТЛТ-100, Онежец-300 и ряда других моделей лесных гусеничных машин. В планах предприятия повышение серийности выпуска из-за высокой востребованности данной техники у потребителей. Цены на трактора начинаются от 6 млн. рублей, что значительно ниже, чем у зарубежных конкурентов.

При эксплуатации вышеперечисленной техники используются устаревшие смазочные материалы, не способные в необходимой мере защитить детали ходовой части и трансмиссии тракторов от повышенных износов, возникающих при работе в низкотемпературных условиях. Для решения данной проблемы предлагается применение современных присадочных материалов, способных повысить триботехнические характеристики подвижных узлов лесной техники.

Степень разработанности темы. Вопросами повышения надежности трансмиссий и ходовой части лесных машин занимались российские ученые из СПБГЛТУ, МГТУ, ПетрГУ, АГАТУ, БГТУ, такие как Балихин В.В., Быков В.В., Прохоров В.Ю., Питухин А.В., Шамарин Ю.А., Пилюшина Г.А., Руденко И.И. и многие другие. Также данная проблема была освещена зарубежными учеными из США и Европы (преимущественно Финляндия и Швеция), такими как Han S., Kovak J, Tavoda P., Filippo G., Sebastian M, Thilo W, Francesco S, Agren AM, Lidberg W, Strömgren M, Ogilvie J, Ala-Ilomäki J, Lamminen S, Sirén M, Väätäinen K, Asikainen A и другие.

Не смотря широкое освещение проблемы в научных статьях, актуальность исследований в данной отрасли продолжает находиться на высоком уровне.

Цель работы: Повышение эффективности лесозаготовительных и лесохозяйственных работ в арктической климатической зоне за счет увеличения износостойкости узлов ходовой части гусеничных лесных машин современными присадочными материалами.

Для достижения поставленной цели решались следующие **задачи**:

1. Сравнительный анализ колесной и гусеничной лесной техники, применяемой для лесозаготовительных работ в арктических климатических условиях с выявлением эксплуатационных особенностей;
2. Исследование зависимости эксплуатационных факторов и концентрации присадочных материалов в трансмиссионном масле на износостойкость балансира гусеничного трактора;
3. Определение математической зависимости скорости изнашивания от эксплуатационных факторов движения трактора и концентрации присадочных материалов в трансмиссионном масле;
4. Обоснование применения аэрогеля и серпентинита в качестве присадочных материалов к трансмиссионному маслу для гусеничных лесных машин с корректировкой периодичности ТО для тракторов ОТЗ.

Объект исследования. Объектом исследований являются детали балансиров тракторов ОТЗ.

Предмет исследования. Предметом исследования является влияние присадочных материалов (аэрогеля и серпентинита) на снижение интенсивности износа балансиров тракторов.

Методологическая, теоретическая и эмпирическая база исследований. При проведении исследований основой послужили работы признанных ученых в области ремонта и эксплуатации лесных машин, а также триботехники, в частности сотрудников международного научно-образовательного центра «BaltTribоКомпьютерикс». В теоретической части исследования использовались основы теории трения и износа. Для планирования эксперимента, обработки полученных данных и их оптимизации применялись общепринятые методики, а также методы статистической обработки данных. **Методами исследования являются** – математическое моделирование, регрессионной анализ, компьютерное моделирование, математическая статистика, системный анализ.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Проведен сравнительный анализ экологического воздействия колесных и гусеничных машин при работе в лесах арктической климатической зоны, в результате которого было установлена предпочтительность гусеничной техники.
2. Определены оптимальные параметры концентрации присадочных материалов к трансмиссионному маслу Тсп-10, повышающие ресурс основных узлов трансмиссии спецтехники.
3. Определены математические зависимости скорости изнашивания балансиров гусеничной техники от режимов эксплуатации и концентрации специальных добавок в трансмиссионном масле, позволяющая точно предсказывать их ресурс.
4. Установлены регламент применения серпентинита в качестве присадки к трансмиссионным маслам, снижающей затраты на обслуживание техники и продлевающей срок службы механизмов.

Теоретическая значимость работы состоит в определении математической зависимости скорости изнашивания элементов трансмиссий гусеничной техники от режимов эксплуатации и концентрации специальных добавок в трансмиссионном масле, позволявшая прогнозировать износ и отказы узлов.

Практическая значимость работы заключается определении оптимальной концентрации присадочных материалов (аэрогеля и серпентинита), обеспечивающей повышение износостойкости деталей балансира тракторов ОТЗ на 40-42%.

Научные положения, выносимые на защиту:

- В природно-производственных условиях лесного фонда арктической зоны предпочтительно применять специальные лесные машины с гусеничным движителем.
- Параметры концентрации присадочных материалов (серпентинита и аэрогеля) к трансмиссионному маслу Тсп-10, способные повысить долговечность испытуемых узлов.
- Математические зависимости скорости изнашивания подвижных соединений балансиров гусеничного движителя от эксплуатационных факторов движения трактора и концентрации присадочных материалов в трансмиссионном масле.
- Оптимизация регламента применения серпентинита в качестве присадочного материала к трансмиссионным маслам и корректировка периодичности ТО для гусеничных тракторов ОТЗ.

Личный вклад соискателя состоит в непосредственном участии во всех этапах работы: обзор научной, патентной и технической литературы, научная постановка задач, разработка математических моделей для определения оптимальной износостойкости узлов, выбор методов исследований, обработка результатов исследований, подготовка публикаций, формирование выводов и рекомендаций.

Достоверность результатов диссертационной работы подтверждена сходимостью эксплуатационных и экспериментальных данных с теоретическими положениями теории трения и сказки, применением современных вычислительных

средств и лицензионного программного обеспечения при проведении теоретических исследований и обработке экспериментальных данных.

Апробация работы. Материалы диссертации докладывались на научно-технической конференции Института технологических машин и транспорта леса СПбГЛТУ (СПб, 2023), VI Лесопромышленного форума Республики Саха (Якутия, 2024), всероссийской научно-практической конференции «Перспективные технологии реверс-инжиниринга и быстрого прототипирования» (Севастополь, 2024), VI всероссийской научно-практической конференции «Научный потенциал молодежи и технический прогресс» (Санкт-Петербург, 2024), IX всероссийской научно-технической конференции «Леса России: политика, промышленность, наука, образование» (Санкт-Петербург, 2024), всероссийской отраслевой научно-практической конференции «Инновационные решения в развитии целлюлозно-бумажной отрасли и лесопромышленного комплекса» (Санкт-Петербург, 2024).

Публикации. По результатам исследований опубликовано 12 печатных работ, в том числе 5 статей в журналах, рекомендованных ВАК РФ (из них 2 по научной специальности 4.3.4.), получен 1 патент РФ.

Структура и объём работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав основного текста, общих выводов и рекомендаций, библиографического списка из 210 наименований. Основные материалы диссертации изложены на 167 страницах машинописного текста, содержит 69 рисунков, 17 таблиц и 1 приложение.

Соответствие паспорту специальности. Диссертация соответствует паспорту специальности 4.3.4. «Технологии, машины и оборудование для лесного хозяйства и переработки древесины». Работа соответствует следующим направлениям исследования по паспорту специальности:

3. Теория и методы воздействия техники и технологий на лесную среду в процессе лесовыращивания, заготовки и переработки древесного сырья;

5. Компоновка, типы, параметры и режимы работы машин лесохозяйственных и лесопромышленных производств.

10. Эргономика, надежность, безопасность машин и технологического оборудования в лесном хозяйстве и лесной промышленности.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** изложено содержание диссертационной работы, обоснованы актуальность и научная новизна выполненных исследований, их практическая значимость, результаты внедрения, а также сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** проведен сравнительный анализ гусеничных и колесных движителей лесной техники, рассмотрены конструкции наиболее распространенных лесных машин, а также определены особенности их работы в условиях арктической зоны. Установлено что гусеничная техника оказывает более щадящее воздействие на почвогрунт, чем колесная. Определен предмет исследования - балансир тракторов Онежского тракторного завода (ОТЗ). Для данного узла определена вероятность

безотказной работы в зависимости от нормы выработки. В завершающем разделе главы определены направления исследований и сформулированы задачи.

Во второй главе проведено исследование триботехнических свойств смазочных композитов с добавками метилтриметоксисилана (МТМС) аэрогеля и серпентинита для балансира лесного гусеничного трактора.

В качестве базового смазочного материала использовали масло марки ТСп-10, применяемое для смазки балансира гусеничного трактора.

В качестве дисперсных добавок использовали:

- 1) порошкообразный аэрогель ($\text{SiO}_{1,5}\text{CH}_3$)_n [138], с размерами частиц ≈ 10 мкм.
- 2) порошкообразный серпентинит $\text{Mg}_6[\text{Si}_4\text{O}_{10}](\text{OH})_8$, со средним размером частиц 0,6 мкм.

Стоит отметить, что серпентинит является природным материалом, отходом горнодобывающей промышленности, и на различных месторождениях возможны отличия физико-механических свойств данного материала. Отсутствуют ГОСТы и ТУ для его обработки. Размол серпентинита происходит в несколько этапов (чаще всего в 2): размельчение на щековой дробилке и шаровой мельнице. После измельчения, очистка также проводится в два этапа. На первом этапе применяют магнитный сепаратор, для очистки от металлических примесей с помощью магнитного поля, а на втором применяют флотатор для удаления других вредных примесей (в том числе абразивного характера). После проведения вышеуказанных операций различия между свойствами серпентинитов из разных месторождений становятся минимальными и не значительными для проведения исследований.

Технологический процесс производства порошкового серпентинита включает в себя только механическую обработку, без применения химического воздействия, что делает данный материал экологически безопасным для хрупкой природы арктической зоны.

Дисперсные добавки вводили в смазочное масло марки ТСп-10 в следующих концентрациях по массе: 0, 1, 2 и 4%. Исследование в условиях трения скольжения по четырёхшариковой схеме осуществляли на машине трения ПБД-40 в соответствии с ГОСТ 9490-75. Испытательное оборудование и схема испытания представлены на рисунке 1.

Данная установка используется для оценки способности смазочных материалов уменьшать износ пар трения и энергетические потери на трение. В этой лабораторной установке стандартный шарикоподшипниковый шарик из стали ШХ-15 диаметром 12,7 мм зажат в шпинделе машины, вращающемся с частотой вращения 1500 об/мин.

Зависимости силы трения от времени при испытании базового смазочного масла ТСп-10 показаны на рисунке 2.

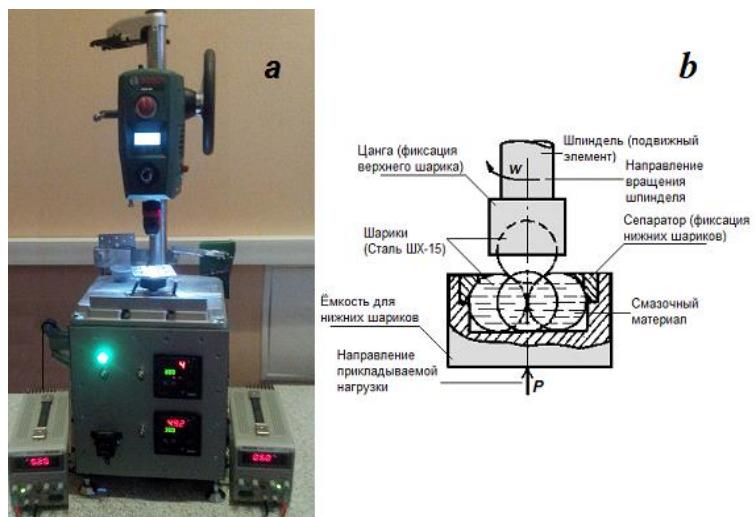


Рисунок 1 - Испытательное оборудование: а – машина трения ПБД-40; б – схема испытаний.

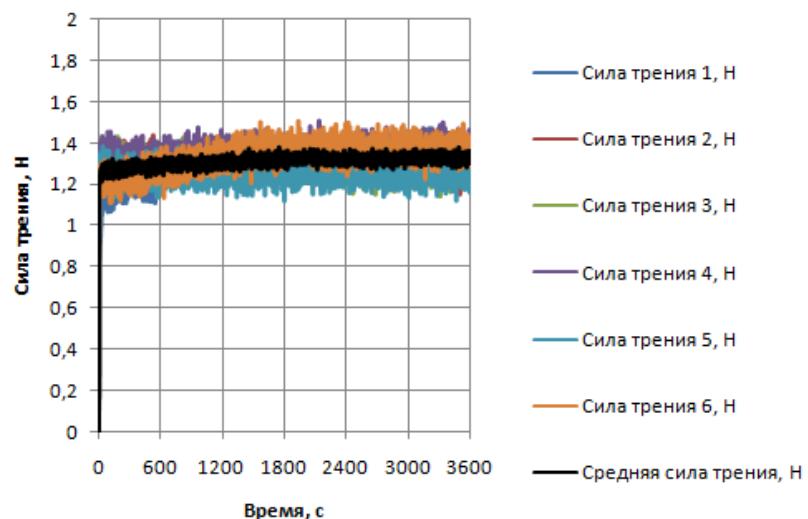


Рисунок 2 - Зависимость силы трения от времени для базового масла ТСп-10

Аналогичные графики были построены для 1, 2 и 4% концентраций аэрогеля МТМС и серпентинита в базовом трансмиссионном масле ТСп-10.

Графики зависимости средней силы трения и среднего диаметра лунки износа в зависимости от концентрации аэрогеля в базовом смазочном масле приведены на рисунке 3.

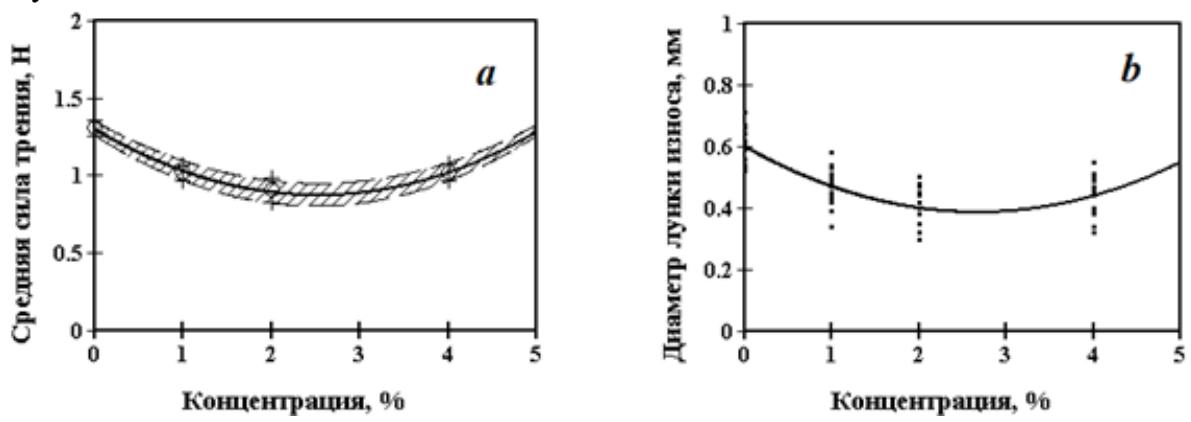


Рисунок 3 - Графики зависимости от концентрации аэрогеля: а – средней силы трения, б – среднего диаметра лунки износа

На рисунке 3а пунктирумыми линиями показаны границы доверительного интервала. Зависимость средней силы трения от концентрации аэрогеля имеет следующий вид:

$$F_f(C) = 0.067C^2 - 0.338C + 1.3. \quad (1)$$

Коэффициент детерминации для (2.1) равен $R^2 = 0,996$.

Исследование функции (1) показывает, что для базового смазочного масла средняя сила трения составляет 1,3 Н, а минимальное её значение приблизительно равно 0,874 при концентрации аэрогеля около 2,5%.

Зависимость среднего диаметра лунки износа от концентрации аэрогеля имеет следующий вид:

$$d_w(C) = 0.03C^2 - 0.16C + 0.6. \quad (2)$$

Коэффициент детерминации для (2) равен $R^2 = 0,81$.

Исследование функции (2) показывает, что для базового смазочного масла средний диаметр лунки износа составляет 0,6 мм, а минимальное значение среднего диаметра приблизительно равно 0,387 при концентрации аэрогеля около 2,67%.

Графики зависимости средней силы трения и среднего диаметра лунки износа в зависимости от концентрации серпентинита в базовом смазочном масле приведены на рисунке 4.

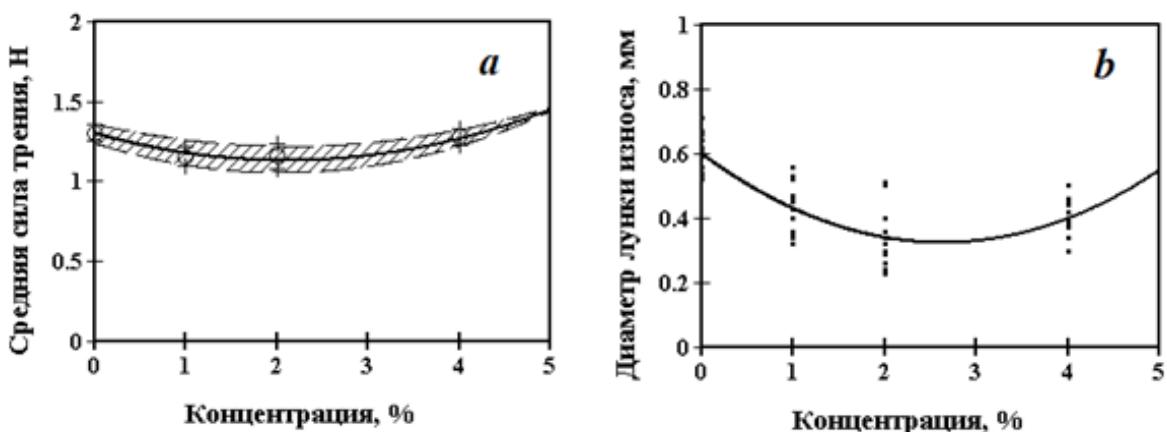


Рисунок 4 - График зависимости от концентрации серпентинита:
а – средней силы трения, б – среднего диаметра лунки износа

На рисунке 4 а пунктирумыми линиями показаны границы доверительного интервала. Зависимость средней силы трения от концентрации серпентинита имеет следующий вид:

$$F_f(C) = 0.038C^2 - 0.16C + 1.3. \quad (3)$$

Коэффициент детерминации для (2.3) равен $R^2 = 0,94$.

Исследование функции (2.3) показывает, что для базового смазочного масла средняя сила трения составляет 1,3 Н, а минимальное её значение приблизительно равно 1,13 Н при концентрации серпентинита около 2,1%.

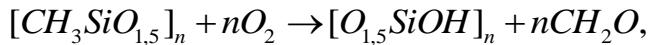
Зависимость среднего диаметра лунки износа от концентрации серпентинита имеет следующий вид:

$$d_w(C) = 0.04C^2 - 0.21C + 0.6. \quad (4)$$

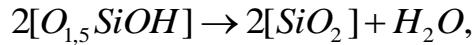
Коэффициент детерминации для (2.4) равен $R^2 = 0,89$.

Исследование функции (2.4) показывает, что для базового смазочного масла средний диаметр лунки износа составляет 0,6 мм, а минимальное значение среднего диаметра приблизительно равно 0,324 мм при концентрации серпентинита около 2,63%.

Известно, что аэрогель МТМС в интервале температур 550-6500С окисляется по схеме:



дополнительно имеют место следующие превращения:



а при температуре 800⁰С реализуется реакция:



Серпентин, в интервале температур 400-6000С разлагается следующим образом:



Из приведённых уравнений реакций видно, что как в случае серпентина, так и в случае аэрогеля имеет место образование диоксида кремния, образующего противоизносные защитные плёнки на поверхностях и способствующего снижению трения и износа. Непрореагировавшая с поверхностями трения часть диоксида кремния оказывает на них абразивное воздействие, повышая трение и износ. Соответственно, как серпентинитом, так и аэрогелем на поверхностях трения инициируются конкурентные процессы защиты и разрушения, зависящие от их концентрации в смазочном слое.

Третья глава посвящена исследованию влияния нагрузки, скорости скольжения и концентрации дисперсных добавок на ресурс сопряжений в гусеничном движителе лесных машин. Ресурс и долговечность — два взаимосвязанных, но разных термина, используемых преимущественно в технических науках и экономике. Ресурс отражает пределы работоспособности конкретной единицы (детали, компонента), тогда как долговечность показывает общий срок существования изделия в нормальных условиях эксплуатации. Так как в диссертации объектом исследований являются детали балансиров тракторов ОТЗ, а не машин в целом, и арктические условия далеки от нормальных, то в нашем случае корректнее говорить о ресурсе, чем о долговечности.

Для проведения испытаний использован стенд «Машина Г» (рисунок 5), в котором применялись близкие к реальным условия эксплуатации узла. Так, в данном случае, помимо нагрузки $P=15\text{kN}$, устанавливаемой динамометром ДОСМ-5-1, ТУ25.06.629-74, строго соблюдены следующие условия: характер движения — вращательный, максимальная скорость скольжения в паре трения $V_{\max} = 0,095 \text{ м/сек}$ при выходной частоте вращения вала $n=38 \text{ мин}^{-1}$, передающего крутящий момент на рычажный механизм.

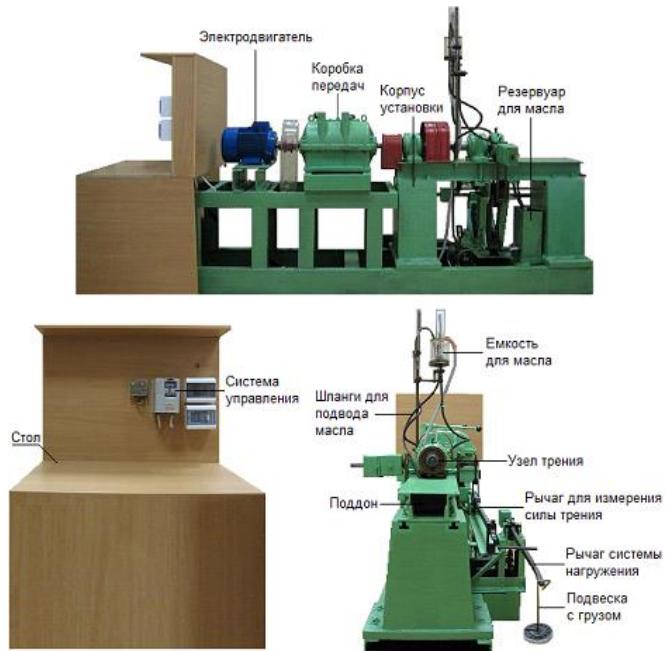


Рисунок 5 - Установка для проведения стендовых испытаний «Машина Г»

Пары трения испытывались, согласно общепринятой методике, давление варьировалось в диапазоне от 25 до 75 МПа на каждой втулке, причем каждому этапу соответствовала приработка трущихся пар в объеме 1700 циклов в том числе, 1000 циклов при нагрузке $P=2500\text{Н}$ и 700 циклов при нагрузке $P=5000\text{Н}$. Образцы для проведения испытаний представлены на рисунке 6.



Рисунок 6 - Образцы для испытаний

Для оценки влияния давления, скорости скольжения и концентрации наполнителя на скорость изнашивания в целом сопряжения был проведен трёхфакторный эксперимент, что позволяет оценить не только влияние каждого из факторов по отдельности на процесс изнашивания, но также и их сочетания. В качестве факторов варьирования были выбраны - давление на сопряжение деталей, скорость вращения вала и концентрация присадочных материалов (аэрогеля и серпентинита). Согласно плану эксперимента рассчитывается $N = 10$ опытов по $r = 3$ параллельных испытания в каждом. Обработка экспериментальных данных проводилась с помощью программы PlanExp B-D13.

Экстремум функции отклика находится в пределах варьирования переменных факторов. Ему соответствуют значения факторов: $x_1 = -0,667$ (33,325 МПа) и $x_3 = 0,3$ ($\approx 2,5\%$) при $x_2 = 0,19$ (0,05855 м/с). Для оценки однородности параллельных опытов

применялся критерий Кохрена, значимость коэффициентов оценивалась по критерию Стьюдента, а адекватность уравнения оценивалась по критерию Фишера.

В результате обработки экспериментальных данных и перехода из кодированного вида к натуральному, получаем следующее уравнение регрессии:

$$I_t = 0,006239 + 0,005219 \cdot \frac{p - 50}{25} + 0,001556 \cdot \frac{v - 0,05}{0,045} - 0,002019 \cdot \frac{C - 2}{2} + 0,004218 \cdot \left(\frac{p - 50}{25} \right)^2 + 0,004088 \cdot \left(\frac{C - 2}{2} \right)^2. \quad (5)$$

Упрощая выражение (5), получим следующее уравнение:

$$I_t = 0,0346v + 6,75 \times 10^{-6} p^2 - 4,66 \times 10^{-4} p + 1,02 \times 10^{-3} C^2 - 5,1 \times 10^{-3} C + 0,0171 \quad (6)$$

Зависимости скорости изнашивания от концентрации аэрогеля при скорости скольжения 0,005 м/с и различных значениях номинального давления приведены на рисунке 7, а зависимости скорости изнашивания от концентрации аэрогеля при номинальном давлении 33,325 МПа и различных значениях скорости скольжения приведены на рисунок 8.

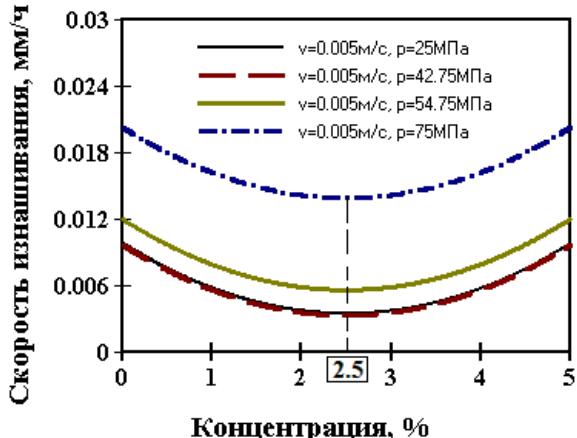


Рисунок 7 - Зависимости скорости изнашивания от концентрации аэрогеля при скорости скольжения 0,005 м/с и различных значениях номинального давления

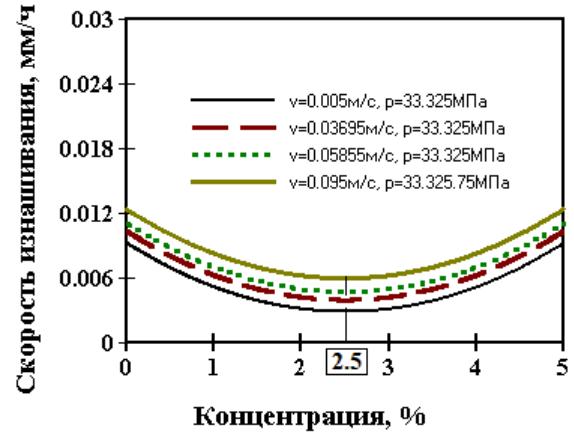


Рисунок 8 - Зависимости скорости изнашивания от концентрации аэрогеля при номинальном давлении 33,325 МПа и различных значениях скорости скольжения

Из математического анализа полученных зависимостей при переменном номинальном давлении следует, что оптимальной концентрацией аэрогеля в смазочном слое является $C=2,5\%$. Скорость изнашивания пары трения при максимальных в данном исследовании давлении и скорости 75 МПа и 0,095 м/с при нулевой концентрации аэрогеля в смазочном слое составляет:

$$I_{t6} = 2,34 \times 10^{-2} \text{ мм/ч} \quad (7)$$

Минимальное значение скорости изнашивания при данных наиболее жёстких условиях равно 0,017 мм/ч при концентрации аэрогеля в масле 2,5% по массе. На основании этих данных можно подсчитать коэффициент повышения износостойкости смазанного узла трения:

$$K_I = \frac{I_{t6}}{I_{t,min}} = \frac{2,34 \times 10^{-2} \text{ мм/ч}}{1,7 \times 10^{-2} \text{ мм/ч}} \cong 1,4 \quad (8)$$

Таким образом, при оптимальной концентрации аэрогеля в смазочном слое, равной 2,5% достигнуто повышение износостойкости смазанного узла трения в 1,4 раза.

Экстремум функции отклика находится в пределах варьирования переменных факторов. Значение экстремума составляет $\hat{y}_{x_2=1}^{min} = 0,006$ мм/час. Экстремуму функции отклика соответствуют значения факторов: $x_1 = -0,667$ (33,325 МПа) и $x_3 = 0,333$ (2,67%) при $x_2 = 1$ (0,095 м/с).

В результате обработки экспериментальных данных и перехода из кодированного вида к натуральному, получаем следующее уравнение регрессии:

$$I_t = 3,34 \times 10^{-2}v + 6.5 \times 10^{-6} p^2 - 4.5 \times 10^{-4} p + 1,02 \times 10^{-3} C^2 - 5,23 \times 10^{-3} C + 1,69 \times 10^{-2} \quad (9)$$

Зависимости скорости изнашивания от концентрации серпентинита при скорости скольжения 0,028 м/с и различных значениях номинального давления приведены на рисунок 9, а зависимости скорости изнашивания от концентрации серпентинита при номинальном давлении 33,325 МПа и различных значениях скорости скольжения приведены на рисунке 10.

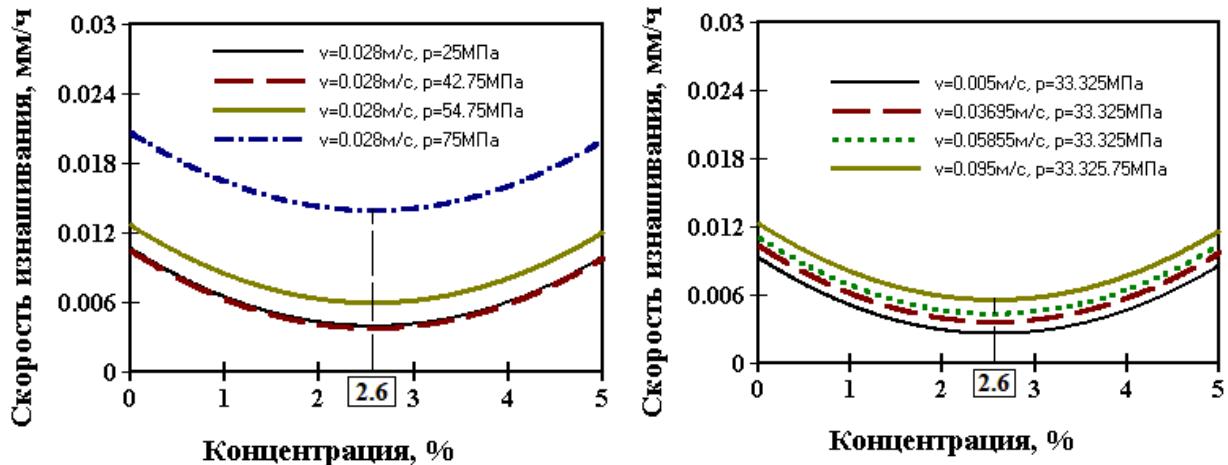


Рисунок 9 - Зависимости скорости изнашивания от концентрации серпентинита при скорости скольжения 0,028 м/с и различных значениях номинального давления

Рисунок 10 - Зависимости скорости изнашивания от концентрации серпентинита при номинальном давлении 33,325 МПа и различных значениях скорости скольжения

Минимальное значение скорости изнашивания при данных наиболее жёстких условиях равно 0,01618 мм/ч при концентрации серпентинита в масле 2,6% по массе. На основании этих данных можно подсчитать коэффициент повышения износостойкости смазанного узла трения:

$$K_I = \frac{I_{t6}}{I_{t,min}} = \frac{0,023\text{мм/ч}}{0,01618\text{мм/ч}} \cong 1,42 \quad (10)$$

Таким образом, при оптимальной концентрации серпентинита в смазочном слое, равной 2,6% достигнуто повышение износостойкости смазанного узла трения в 1,42 раза.

Учитывая в нашем случае прямую зависимость ресурса балансира от коэффициента повышения износостойкости его деталей, можно утверждать, повышение этого показателя на 40% для аэрогеля и на 42% для серпентинита, по сравнению с базовым вариантом (масло ТСп-10).

В четвертой главе рассмотрена возможность и целесообразность использования результатов исследования для гусеничных лесных машин в условиях лесов на вечной мерзлоте. Приведены ссылки на нормативные акты и законы, регулирующие лесосечные и лесовосстановительные работы многолетне-мерзлотных почвах.

Для уменьшения возможного ущерба от лесных пожаров, ежегодно в лесах криолитозоны прокладываются тысячи километров минерализованных противопожарных полос. Для выполнения этой операции, практически в 100% случаев, используют гусеничные тракторы. А при работе на лесных пожарах, от системы смазки ходовой части гусеничного движителя требуется не допустить попадания абразивных частиц к сопряженным трущимся деталям.

Для повышения долговечности балансиров гусеничных тракторов, контроль зазоров его соединений необходимо проводить на ТО-2, то есть через каждые 300 моточасов работы. Наличие абразивных частиц в трансмиссионном масле также может указать на высокую интенсивность изнашивания.

При проведении замены и долива трансмиссионного масла, в качестве присадочной добавки предлагается серпентинит в концентрации 2,5% от общего объема масла. При лабораторных исследованиях было установлено, что применение данной присадки способно снизить интенсивность изнашивания рассматриваемого узла на 42%, а ходе эксплуатационных испытаний интенсивность изнашивания снизилась на 35% (подтверждено актом промышленной апробации).

Эксплуатационные испытания проводились природно-производственные условия лесов на вечной мерзлоте в Архангельской области. Испытания проводились в зимний период (температура опускалась до -40°C). Порошковый серпентинит, подобно губке впитывает в себя трансмиссионное масло, и попадая в зону трения, начинает его выделять. Масляная пленка с серпентинитом удерживается на поверхностях трения более длительный период, чем при использовании масла в чистом виде. При воздействии низких температур, серпентинит, напитанный маслом, удерживается в зоне трения, подобно пластичной смазке (литол, солидол, графитин, циатим и др.), которую невозможно добавить в соединение посредством масленки, без разбора узла. Промышленная апробация проводилась на предприятии ООО «Инженерная геология».

Также в данной главе проведена экономическая оценка принятых решений.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

Выводы:

1. Проведя анализ работы техники в лесах арктической зоны, и характеристики почвогрунтовых покрытий, установлено что наиболее целесообразным для данных климатических условий будет применение гусеничных лесных машин.
2. Аэрогель МТМС и серпентинит при концентрации их в трансмиссионном масле в 2-2,5%, способны снижать силу трения в подвижных соединениях ходовой части движителя до 33% и повышать ресурс балансиров гусеничных тракторов до 42%.

3. Применяя математические зависимости прогнозирование износов деталей балансиров гусеничных тракторов, появляется возможность предотвратить отказы техники, проводя своевременно необходимые плановые техническое обслуживание.

4. Для повышения долговечности балансиров гусеничных тракторов, контроль зазоров его соединений необходимо проводить на ТО-2, то есть через каждые 300 моточасов работы. Данную операцию, возможно, проводить при съеме масленки, визуальном осмотре и качении опорного катка, выявляя тем самым возможный люфт в соединении. Наличие абразивных частиц в трансмиссионном масле также может указать на высокую интенсивность изнашивания. При проведении замены и долива трансмиссионного масла, в качестве присадочной добавки предлагается серпентинит в концентрации 2,5% от общего объема масла. За счет практического использования предложений данной диссертационной работы, экономия для лесозаготовительного предприятия с объемом заготовки леса в 100 т.м³, при повышении ресурса техники на 35% и снижении количества отказов, составит 10,3 млн. рублей в год рублей.

Рекомендации:

Рекомендуется в суровых природно-производственных условиях лесов криолитозоны применять присадочные материалы для трансмиссионных масел. Этому требованию наилучшим образом отвечает природный серпентинит, который подобно гидрогелю впитывает в себя трансмиссионное масло, и, попадая в зону трения, начинает его выделять. Масляная пленка с серпентинитом удерживается на поверхностях трения более длительный период, чем при использовании масла в чистом виде. При воздействии низких температур, серпентинит, напитанный маслом, удерживается в зоне трения, подобно пластичной смазке, которую невозможно добавить в соединение посредством масленки, без разбора узла.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ

Статьи в рецензируемых журналах, входящих в "Перечень ВАК РФ" по специальности 4.3.4. – Технологии, машины и оборудование для лесного хозяйства и переработки древесины

1. Карасев Ю.А., Марков В.А., Дмитриев А.С. Перспективность дальнейших исследований по совершенствованию гусеничных лесных машин // Resources and Technology. – 2023. – Т. 20, № 1. – С. 42-86.
2. Карасев Ю.А., Марков В.А., Бреки А.Д. Триботехнические свойства смазочных композиций с добавками МТМС аэрогеля и серпентинита для балансира лесозаготовительного трактора // Системы. Методы. Технологии. – 2024. – № 3(63). – С. 122-130.

Объекты интеллектуальной собственности

3. Патент № 2749433 С1 Российская Федерация, МПК G01M 17/007. Устройство для испытания транспортной техники: № 2020140231: заявл. 07.12.2020: опубл. 10.06.2021 / А.В. Болдырев, А.В. Березкин, А.Н. Викторов, Ю.А. Карасев [и др.]; заявитель Федеральное государственное казенное учреждение "12 Центральный научно-исследовательский институт" Министерства обороны Российской Федерации.

Публикации в прочих изданиях

4. Марков В.А., Куницкая О.А., Карасев Ю.А. Определение оценочных показателей технологического процесса восстановления деталей лесных машин электроконтактным методом // Ремонт. Восстановление. Модернизация. – 2024. – № 3. – С. 30-34.
5. Бреки А.Д., Карасев Ю.А., Марков В.А. Влияние микрочастиц гидросиликата магния на триботехнические свойства трансмиссионного масла ТСп-10 // Деформация и разрушение материалов. – 2024. – № 9. – С. 31-40.
6. Бреки А.Д., Карасев Ю.А., Марков В.А., Колмакова А.А., Иванов В.К., Колмаков А.Г., Ганин С.В., Седакова Е.Б., Скотникова М.А. Закономерности изменения триботехнических свойств смазочного слоя в зависимости от содержания в нём микрочастиц МТМС аэрогеля // Материаловедение. – 2024. – № 11. – С. 19-28. DOI: 10.31044/1684-579X-2024-0-11-19-28.
7. Tribological Properties of Lubricating Layer as a Function of the MTMS Aerogel Microparticle Content / A. D. Breki, Yu. A. Karasyov, V. A. Markov [et al.] // Inorganic Materials: Applied Research. – 2025. – Vol. 16, No. 4. – P. 1080-1088. – DOI 10.1134/S2075113325701059.
8. Марков В.А., Карасев Ю.А., Попова Д.А. Определение вероятности безотказной работы балансира гусеничного трактора // Сборник статей по материалам научно-технической конференции института технологических машин и транспорта леса по итогам научно-исследовательских работ 2022 года, Санкт-Петербург, 06–10 февраля 2023 года. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова, 2023. – С. 190-195.
9. Карасев Ю.А., Марков В.А. Повышение триботехнических характеристик трансмиссионных масел для лесной техники // Леса России: политика, промышленность, наука, образование: Материалы IX Всероссийской научно-технической конференции, Санкт-Петербург, 22–24 мая 2024 года. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С.М. Кирова, 2024. – С. 321-322.
10. Марков В.А., Карасев Ю.А., Гаузе А.А. Серпентинит, как минеральная альтернатива синтетическим присадкам // Научный потенциал молодежи и технический прогресс: материалы VII Всероссийской научно-практической конференции. – Санкт-Петербург: НИЦ МС, 2024. – С. 63-65.
11. Марков В.А., Карасев Ю.А. Реверс-инжиниринг в лесном машиностроении // Перспективные технологии реверс-инжиниринга и быстрого прототипирования: Сборник статей всероссийской научно-практической конференции, Севастополь, 13–15 мая 2024 года. – Севастополь: Севастопольский государственный университет, 2024. – С. 86-88.
12. Карасев Ю.А., Дьяченко В.М., Марков В.А. Особенности эксплуатации гусеничных лесных машин в криолитозоне и пути повышения ее эффективности // Безопасность и охрана труда в лесозаготовительном и деревообрабатывающем производстве. – 2024. – № 3(15). – С. 32-45.