

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ПРОМЫШЛЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И ДИЗАЙНА»  
ВЫСШАЯ ШКОЛА ТЕХНОЛОГИИ И ЭНЕРГЕТИКИ

На правах рукописи



**КАРАСЕВ ЮРИЙ АНАТОЛЬЕВИЧ**

**Повышение ресурса гусеничных лесных  
машин за счет улучшения  
триботехнических характеристик  
смазочных материалов в двигателе**

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

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель – кандидат  
технических наук, доцент  
Марков Виктор Александрович

Санкт-Петербург

2025

## СОДЕРЖАНИЕ:

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ .....	10
1.1. Общие замечания .....	10
1.2. Анализ конструкций и области применения наиболее распространенных и перспективных в лесозаготовительном производстве и в лесном хозяйстве Российской Федерации лесных машин.....	14
1.3. Сравнительный анализ гусеничных и колесных лесных машин .....	25
1.4. Виды гусеничных движителей лесных машин .....	37
1.5. Особенности работы лесных машин в арктической зоне .....	40
1.6. Определение вероятности безотказной работы балансира гусеничного трактора.....	42
1.7. Выводы по главе 1 и формулирование задач исследования.....	46
2. ИССЛЕДОВАНИЕ ТРИБОТЕХНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СМАЗОЧНЫХ КОМПОЗИЦИЙ С ДОБАВКАМИ МЕТИЛТРИМЕТОКСИСИЛАНА (МТМС) АЭРОГЕЛЯ И СЕРПЕНТИНИТА ДЛЯ БАЛАНСИРА ЛЕСНОГО ГУСЕНИЧНОГО ТРАКТОРА .....	48
2.1. Применение противоизносных и антифрикционных дисперсных добавок.....	48
2.2. Материалы и методики исследования .....	51
2.3. Результаты исследования.....	53
2.4. Выводы по главе 2 .....	60
3. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НАГРУЗКИ, СКОРОСТИ СКОЛЬЖЕНИЯ И КОНЦЕНТРАЦИИ ДИСПЕРСНЫХ ДОБАВОК НА СКОРОСТЬ ИЗНАШИВАНИЯ И РЕСУРС СОПРЯЖЕНИЙ В ГУСЕНЕЧНОМ ДВИЖИТЕЛЕ ЛЕСНЫХ МАШИН.....	62
3.1. Методика исследования .....	62
3.2. Исследование влияния нагрузки, скорости скольжения и концентрации аэрогеля на скорость изнашивания сопряжений .....	74

3.3. Исследование влияния нагрузки, скорости скольжения и концентрации серпентинита на скорость изнашивания сопряжений.....	96
3.4. Выводы по главе 3 .....	113
4.      ОБОСНОВАНИЕ      РЕКОМЕНДАЦИЙ      ПО      РЕЗУЛЬТАТАМ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	114
4.1.  Возможность  и  целесообразность  использования  результатов исследования для гусеничных лесных машин в условиях лесов на вечной мерзлоте .....	115
4.2.  Рекомендации  по  технической  применимости  предложенных решений.....	124
4.3.  Экономическая  обоснованность  использования  результатов исследования для гусеничных лесных машин в условиях лесов на вечной мерзлоте .....	126
4.1. Выводы по главе 4 .....	134
ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ: .....	134
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	137
ПРИЛОЖЕНИЕ 1.....	169

## ВВЕДЕНИЕ

**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" 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 триботехнических 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 Бакихин 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, Väättäinen K, Asikainen A и другие.

Не смотря на обильное 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.

**Задачи исследования:**

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 сотрудники международного научно-

образовательного центра «BaltTribo-Polytechnic». В основе 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, регрессионный анализ, компьютерное моделирование, математическая статистика, системный анализ.

#### **Научная новизна:**

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 в определении оптимальной концентрации присадочных материалов (аэрогеля и

серпентинита), обеспечивающей повышение износостойкости деталей балансира тракторов ОТЗ на 40-42%.

**Апробация работы.** Материалы диссертации докладывались и обсуждались 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 всероссийская 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.** Основное содержание работы опубликовано в 5 статьях из перечня журналов, рекомендованных ВАК РФ (из них 2 по научной специальности 4.3.4), получен 1 патент РФ. Число публикаций по теме работы составляет 12, общим объемом 6,64 п.л., (авторских 3,73 п.л.). Результаты исследований также отражены в отчете НИР.

**Соответствие научной 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. Компонировка, типы, параметры и режимы работы машин лесохозяйственных и лесопромышленных производств.



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

**На защиту выносятся следующие положения:**

- В природно-производственных условиях лесного фонда арктической зоны предпочтительно применять специальные лесные машины с гусеничным двигателем.
- Параметры концентрации присадочных материалов (серпентинита и аэрогеля) к трансмиссионному маслу Тсп-10, способные повысить долговечность испытываемых узлов.
- Математические зависимости скорости изнашивания подвижных соединений балансиров гусеничного двигателя 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.

# **1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ**

## **1.1 Общие замечания**

До октября 2022 г. в Российской Федерации действовало 3 лесотехнические специальности – 05.21.01 «Технология и машины лесозаготовок и лесного хозяйства»; 05.21.03 «Технология и оборудование химической переработки биомассы дерева; химия древесины»; 05.21.05 «Древесиноведение, технология и оборудование деревопереработки».

С октября 2022 г., согласно Приказу Министерства науки и высшего образования РФ от 24.02.2021 г № 118 «Об утверждении номенклатуры научных специальностей, по которым присуждаются ученые степени, и внесении изменения в Положение о совете по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук, утвержденное приказом Министерства образования и науки Российской Федерации от 10 ноября 2017 г. № 1093», они объединены в одну научную специальность 4.3.4 «Технологии, машины и оборудование для лесного хозяйства и переработки древесины».

Как видно, из названия специальности 4.3.4 выбыл термин «лесозаготовки». В принципе, если ориентироваться на европейскую практику, это нормально, поскольку в Европе лесозаготовки и лесное хозяйство объединены единым термином «Forestry» [1].

Согласно действующему Лесному кодексу Российской Федерации, лесопользователи, заготавливающие древесину по договорам аренды участков лесного фонда (которые заключаются на срок от 10 до 49 лет), обязаны проводить также лесовосстановительные работы, работы по уходу за лесами, а также работы, связанные с охраной и защитой леса, включая противопожарные мероприятия. То есть, такие лесопользователи проводят полный комплекс лесозаготовительных и лесохозяйственных работ, который

и подразумевает термин «Forestry» [2]. Иначе говоря, современное лесозаготовительное производство в нашей стране, включающее 4 основных этапа – лесосечные работы, транспорт леса, лесоскладские работы, лесовосстановительные работы, является несколько расширенным термином «Forestry», поскольку лесоскладские работы являются переходным этапом между лесозаготовкой и деревопереработкой [3].

Достаточно распространенным видом пользования лесом в Российской Федерации, особенно в Сибири и на Дальнем Востоке, является рубка линейных объектов под линии электропередач, различные трубопроводы [4]. Согласно Федеральному закону «О внесении изменений в Лесной кодекс Российской Федерации и отдельные законодательные акты Российской Федерации в части совершенствования воспроизводства лесов и лесоразведения» от 19.07.2018 г. № 212-ФЗ, такие лесопользователи обязаны проводить работы по лесовосстановлению (лесоразведению) на участках лесного фонда (не находящихся в аренде) на такой же площади, что и выведена под линейный объект, в пределах субъекта Российской Федерации, на территории которого находится этот объект. То есть, при строительстве линейных объектов на землях лесного фонда также выполняются лесосечные и лесовосстановительные работы [5].

Вышесказанное позволяет утверждать, что технологические процессы, машины и оборудование рубок лесных насаждений в полной мере относятся к понятию «лесное хозяйство», указанному в названии научной специальности 4.3.4.

В данном разделе также целесообразно обратить внимание на следующие моменты:

Во-первых, достаточно часто для выполнения лесосечных, лесовосстановительных и других лесохозяйственных работ на лесопромышленных предприятиях задействуются одни и те же машины [6-10]. Исходя из принципа модульности построения систем машин,

энергетические и транспортные модули могут задействоваться на различных операциях [11, 12]. И таких примеров можно привести достаточно много: противопожарный форвардер, представляющий собой форвардер, временно оснащенный емкостью для воды, системами ее набора и распыления на месте пожара [13]; подборщики порубочных остатков – трелевочные тракторы, оснащенные грабельным собирающим устройством, или кузовом для сбора и вывозки порубочных остатков; машины для подготовки почвы на вырубках и гарях – трелевочные тракторы, оснащенные плугом, или почвенными фрезами; мульчеры; ротоваторы; и т.д. [14-16]. Такому разноплановому использованию базовых лесных машин способствует сезонность проведения рубок леса, лесовосстановительных и других лесохозяйственных работ [17-19]. Ведь, по очевидным причинам, лесовосстановительные, и многие другие (хотя и не все) лесохозяйственные работы проводятся в теплый период года, а рубки леса, особенно в лесных массивах со сложными почвенно-грунтовыми условиями, предпочтительно проводить в зимний период, когда почвогрунты замерзнут [20, 21].

Во-вторых. В связи с постепенной деградацией российской глубинки (оттоком работоспособного населения, особенно молодежи, в крупные города, а также резким снижением притока в отрасль сезонных работников из стран ближнего зарубежья), в лесозаготовительном производстве и в лесном хозяйстве Российской Федерации, все меньше доля ручного труда, и все больший объем работ выполняется различными машинными комплексами, на базе специальных колесных и гусеничных тракторов, которые принято называть общим термином «лесные машины» [22-24].

В этой связи необходимо уточнить терминологический аппарат, используемый в дальнейшей работе.

Согласно [25, 26], лесными машинами называются любые специальные тракторы, конструктивно предназначенные для работы в сложных условиях лесного фонда. Прежде всего, ряд таких машин, особенно для лесосечных

работ, должны быть оснащены специальными конструкциями, обеспечивающими безопасность оператора [27, 28]. Это, например, специальные стекла на лесозаготовительных машинах (харвестерах, и т.д.) защищающие оператора от отстрела пильной цепи, конструктивные укрепления кабины, защищающие оператора при перевороте машины, или падении на кабину ствола дерева- ROPS (roll-over protective structure), и т.д. [29, 30] Пригодность машины для работы в лесу часто подтверждается специальными сертификатами безопасности [31]. Конечно, нельзя не признать, что на лесосечных работах в нашей стране, особенно на предприятиях, проводящих малообъемные лесозаготовки, часто встречаются и обычные сельскохозяйственные тракторы (чаще всего МТЗ), обычно на трелевке, иногда погрузке, оснащенные специальным технологическим оборудованием [32]. Но такой вариант нельзя признать удовлетворительной практикой, поскольку во главу угла в любой производственной сфере должны ставиться жизнь и здоровье персонала, а лесозаготовительная отрасль отнюдь не является безопасной, согласно статистике несчастных случаев [33-35].

Среди лесных машин выделяют класс лесозаготовительных машин [36]. К которым относят лесные машины конструктивно предназначенные для валки деревьев, и, обычно, выполнения ряда последующих операций – валочные машины (ВМ), валочно-пакетирующие машины (ВПМ), валочно-трелевочные машины (ВТМ), валочно-сучкорезные машины (ВСМ), валочно-сучкорезно-раскряжевочные машины (ВСРМ, или, обычно - харвестеры), валочно-сучкорезно-раскряжевочно-трелевочные машины (ВСРТМ - харвардеры и форвестеры), валочно-трелевочно-процессорные машины (ВТПМ) [37-40]. То есть к лесозаготовительным машинам относят такие лесные машины, которые, прежде всего, могут валить деревья. Такое выделение связано, во-первых, с тем, что операция валки деревьев является первой во всех технологических процессах лесосечных работ. Во-вторых, с

тем, что это, в подавляющем большинстве случаев, это машины узкоспециализированные, которые не задействуют на других операциях лесосечных, лесовосстановительных, или других лесохозяйственных работ. В виде исключения можно отметить форвестер, который может быть временно переоснащен в лесопожарный форвардер, или машину для подготовки почвы на вырубках и гарях, или манипуляторную машину для сбора порубочных остатков, а также широкозахватную ВПМ, или гусеничный харвестер (на базе экскаватора) – которые возможно переоснастить в полноповоротный погрузчик, или в посадочную машину для сеянцев (саженцев) с закрытой корневой системой (ЗКС) [41].

Кроме лесозаготовительных, к наиболее узко специализированным лесным машинам можно отнести погрузчики и процессоры (сучкорезно-раскряжевочные машины, используемые при канадском варианте сортиментной технологии лесосечных работ) [42].

Наиболее универсальными по применению являются трелевочные машины [43].

Исходя из поставленных в работе задач, следует провести дальнейший анализ конструкций, области применения, достоинств и недостатков, наиболее распространенных и перспективных в лесозаготовительном производстве и в лесном хозяйстве Российской Федерации лесных машин.

## **1.2 Анализ конструкций и области применения наиболее распространенных и перспективных в лесозаготовительном производстве и в лесном хозяйстве Российской Федерации лесных машин**

В качестве преамбулы к данному подразделу отметим, что в настоящее время в лесозаготовительном производстве Российской Федерации преобладают импортные лесные машины, в основном, произведенные в

недружественных странах. Многократные предупреждения ученых и специалистов лесной отрасли о большой опасности такой ситуации так и не привели к удовлетворительным результатам в области отечественного лесного машиностроения, которое так и осталось в практически полностью разгромленном состоянии к началу Специальной военной операции, и последовавшей за ней санкционной войне, объявленной нашей стране недружественными странами. Основными производителями широко используемых в нашей стране лесных машин были Финляндия, Швеция, Австрия, США, Япония, то есть страны, объявившие России санкции. Пятый пакет этих санкций напрямую затронул лесную отрасль, как лесозаготовки с лесным хозяйством, так и деревоперерабатывающие предприятия. Это привело к значительным проблемам в области закупки новых машин, обеспечения их оригинальными запасными частями и расходными материалами. Широко используемый для решения возникшей проблемы параллельный импорт через дружественные страны удлинняет и удорожает логистику доставки, а значит и конечную себестоимость выполняемых этими машинами работ.

О гибели российского лесного машиностроения и его последствия сказано и написано достаточно много. Останавливаться на этом вопросе сейчас нет смысла. В современной ситуации необходимо искать наиболее оптимальные выходы по цене - срокам - качеству. В связи с этим, в заголовок данного раздела включен термин «перспективные лесные машины», поскольку, по очевидным причинам, наиболее распространенные сейчас импортные лесные машины из недружественных стран не могут считаться также и перспективными, со всеми вытекающими отсюда последствиями.

Также отметим, что любая лесная машина представляет собой базовое шасси, агрегатированное тем или иным технологическим оборудованием, для выполнения различных технологических операций [44].

Как было отмечено в предыдущем разделе, лесные машины можно подразделить по универсальности их применения на операциях лесосечных, лесовосстановительных, или других лесохозяйственных работ на узкоспециализированные и универсальные. Но это достаточно условное деление. В литературе принято подразделять лесные машины по следующим признакам:

**По виду движителя.** По этому конструктивному признаку, традиционно, лесные машины подразделяются на гусеничные и колесные. Но помимо этих двух, классических, вариантов известны также шагающие машины (рисунок 1.1), разработанные финской компанией Timberjack (до ее продажи американской компании John Deere). Эти машины были выпущены малой – опытной партией (всего 7 шт.), но в широкую серию так и не пошли, вероятно, в связи со сменой собственников бизнеса. Кроме этого, есть широко распространенный в практике лесозаготовителей вариант оснащения колесных лесных машин колесными гусеницами различных конструкций (рисунок 1.2), для повышения проходимости (при таком варианте машины часто называют колесно-гусеничными) [45-50]. А также менее распространенный, но встречаемый в практике, вариант частичного использования гусеничного хода, частично колесного – полугусеничные машины (рисунок 1.3).





Рисунок 1.1. Харвестер с шагающим движителем, компании Timberjack

Отметим, что колесные гусеницы выпускаются не только зарубежными странами. Есть достаточно неплохие примеры аналогичной отечественной продукции, произведенной на основании собственных результатов интеллектуальной деятельности, например, компании «Timbertrack & ПКФ Форвардер».

Вид колёсных гусениц	Предназначение
	Колёсные гусеницы Baltic предназначены для мягких почвогрунтов. Защищают почву от повреждений.
	Колёсные гусеницы Combi-track для проходимости в труднодоступной местности. Обеспечивают хорошую сцепляемость с вязким и мягким почвогрунтом.
	Колёсные гусеницы OF предназначены для крутых, скалистых местностей. Обладают повышенной способностью к очистке.
	Колёсные гусеницы ECO-Track один из самых универсальных типов гусениц. Подходят для большинства типов машин и имеют хорошее сцепление с почвогрунтом.
	ECO-Wheel обладают широкой площадью контакта, обеспечивают хорошее сцепление, улучшают устойчивость машины и увеличивают проходимость, а также защищают резину от боковых порезов.

Рисунок 1.2. Колёсные гусеницы компании Olofsfors

Также отметим, что вариант полугусеничного хода, представленный на рисунке 1.3. свойственен для лесозаготовительных предприятий, производящих малообъемные лесозаготовки [51, 52]. Но таких предприятий, имеющих в ОКВЭД заготовку древесины – в России большинство (различные ИП и т.д.).



Рисунок 1.3. Форвардер на полугусеничном ходу

Споры между сторонниками колесных и гусеничных движителей для лесных машин ведутся с середины XX века [53]. Для отечественного лесного машиностроения традиционна гусеничная модель, начиная с первого в мире специализированного трелевочного трактора КТ-12.

Онежский и Алтайский тракторные заводы – флагманские машиностроительные предприятия лесной отрасли СССР выпускали именно гусеничные машины, известные под марками ТТ, ТДТ, ЛХТ, Онежец. В определенной степени это было связано с тем, что на момент разработки их концептов колесное тракторостроение в нашей стране было еще достаточно слабо развито. Сейчас этих заводов не существует. Как было отмечено выше, в российских лесах доминируют колесные импортные тракторы. Но это отнюдь не значит, что эпоха гусеничных лесных машин в нашей стране прошла. Наоборот, можно сказать, что у нее наступает ренессанс. Тенденции



развития лесного машиностроения в Российской Федерации будут рассмотрены ниже.

**По виду выполняемых технологических операций.** В предыдущем разделе работы уже были отмечены различные виды лесозаготовительных машин (ВМ, ВТМ, ВПМ, и др.), а также погрузчики, процессоры, трелевочные тракторы, мульчеры, ротоваторы, лесопосадочные машины, подборщики порубочных остатков, машины для подготовки почвы на вырубках и гарях, лесопожарные тракторы [54]. В принципе, это весь основной набор лесных машин, которые могут быть узкоспециализированными, или компоноваться по модульному принципу. Причем это касается даже машин одного и того же назначения. К примеру, на рисунке 1.4 представлен узкоспециализированный гусеничный лесопожарный трактор ТЛП-4М-031, производства ООО «Сибирь-Техника» (РФ), а на рисунке 1.5 представлен лесопожарный колесный форвардер, производства компании Ponsse (Финляндия) [41].



Рисунок 1.4. Гусеничный лесопожарный трактор ТЛП-4М-031

ТЛП-4М-031 больше конструктивно приспособлен для борьбы с лесными пожарами, но в непожароопасный период просто занимает место в гараже и связывает оборотные средства предприятия. Колесный лесопожарный форвардер не может прокладывать минерализованный

полосы, имеет несколько худшую проходимость в заболоченной и переувлажненной местности, зато в непожароопасный период, после демонтажа пожарного оборудования, может быть задействован на лесосечных работах по скандинавскому варианту сортиментной технологии заготовки древесины.



Рисунок 1.5. Лесопожарный колесный форвардер

**По направлению зоны обслуживания относительно хода машины.**

Первоначально этот классификационный признак применяли к лесозаготовительным машинам, однако с развитием лесной техники, увеличением количества и видов машин, агрегируемых по модульному принципу, этот признак классификации стали применять ко всем лесным машинам [55]. По данному признаку лесные машины подразделяются на: фронтальные – имеют технологическое оборудование, работающее с предметом труда перед машиной, или за кормой машины (рисунок 1.6.); фланговые - имеют технологическое оборудование, работающее с предметом труда с одного, или с двух бортов машины (рисунок 1.7); поворотные (полноповоротные) - имеют технологическое оборудование, работающее с



предметом труда с флангов и спереди машины, иногда и за кормой машины (рисунок 1.8).



Лесопосадочная машина



Мульчер

Рисунок 1.6. Фронтальные лесные машины



ВТМ – ВМ 4А



ВМ – ВМ-55

Рисунок 1.7. Фланговые лесные машины

Отметим, что многие полноповоротные лесные машины агрегатируются на базе гусеничных экскаваторов [44].



Полноповоротная ВПМ



Мульчер

Рисунок 1.8. Полноповоротные лесные машины

**По ширине обрабатываемой ленты леса.** Как и предыдущий, этот классификационный признак, изначально, был присущ лесозаготовительным машинам, но, впоследствии, стал использоваться в специальной литературе применительно к другим лесным машинам. Согласно терминам и определениям лесозаготовительного производства, лента – часть пасеки, обрабатываемая вальщиком или лесозаготовительной машиной за один проход [56]. Если технологическое оборудование непосредственно крепится к корпусу лесной машины, то она будет вынуждена подъезжать отдельно к каждому предмету труда (месту выполнения дискретной операции). Тогда обрабатываемая лента будет узкой, и такие машины принято называть узкозахватными. Если технологическое оборудование у машины крепится к гидроманипулятору, позволяющему за счет своего вылета существенно увеличивать площадь, обрабатываемую машиной с одной технологической стоянки, то лента получается широкой, и такие машины принято называть широкозахватными. То есть внешним признаком узкозахватных и широкозахватных машин является наличие, или отсутствие гидроманипулятора. На рисунках 1.6 и 1.7 представлены узкозахватные лесные машины, а на рисунке 1.8 – широкозахватные.

**По принадлежности к виду работ (группе технологических процессов).** В современной ситуации это достаточно условное деление, поскольку, как было показано выше, некоторые машины для лесосечных работ вполне могут быть, без больших трудозатрат, переоборудованы в машины для лесовосстановительных, и других лесохозяйственных работ. Некоторые машины не могут быть переоборудованы под другие операции (см. рисунки 1.4 и 1.5). В этой связи, на наш взгляд, более целесообразно подразделять по принципу: узкоспециализированные машины для лесосечных работ (например, процессоры), узкоспециализированные машины для лесохозяйственных работ (например, гусеничные лесопожарные тракторы), а также универсальные машины [57].

Деление машин для лесосечных работ по группам технологических процессов – на хлыстовые и сортиментные, также в определенной мере условно. Если харвестеры, харвардеры, и форвестеры – это машины только для сортиментной заготовки по скандинавскому варианту, то ВПМ, ВТМ, ВТПМ, вполне могут быть задействованы как в хлыстовой заготовке, так и в сортиментной (по канадскому варианту). То же можно сказать и о трелевочных тракторах: форвардеры (сортиментоподборщики) – для сортиментной скандинавской заготовки; чокерные, бесчокерные, с пачковым захватом (скиддеры) – для хлыстовой заготовки, или для сортиментной (по канадскому варианту сортиментной технологии заготовки древесины).

Погрузчики являются более специализированной техникой, замыкающей технологические процессы лесосечных работ: перекидные – только для хлыстовой заготовки; манипуляторные (полноповоротные) – могут использоваться и при хлыстовой, и при сортиментной заготовке, но при хлыстовой заготовке на них устанавливаются специальные захваты, а при погрузке сортиментов – обычные грейферные.



В полной мере деление лесных машин на узкоспециализированные и универсальные относится и к проведению лесовосстановительных и других лесохозяйственных работ [58].

### **1.3 Сравнительный анализ гусеничных и колесных лесных машин**

Как было отмечено выше, споры между сторонниками колесных и гусеничных движителей для лесных машин продолжаются уже достаточно давно. Очевидно, что у любого технического решения есть свои достоинства и недостатки. Отечественные лесопромышленные и лесохозяйственные тракторы были, в основном, гусеничными. Базовые шасси для них выпускались на Алтайском тракторном (г. Рубцовск, Алтайский край) и Онежском тракторном (г. Петрозаводск, Республика Карелия) заводах. Несмотря на разницу в двигателях, трансмиссиях, кабинах, тракторы этих заводов (ТТ, ТДТ, ЛХТ, Онежец) служили базой для самых разных лесных машин: погрузчиков (ПЛ-1Г и ЛТ-65 Б), сучкорезных (ЛП-30 Г и ЛП-33), чокерных трелевочных (ТДТ-55 А и ТТ-4 М), бесчокерных трелевочных (ТБ-1 М и ЛП-18), трелевочных с пачковым захватом (ЛТ-230 и ЛТ-187), ВТМ (ЛП-17 и ЛП-49), и т.д. С точки зрения их эффективной эксплуатации была одна принципиальная рекомендация – машины на базе тракторов Алтайского тракторного (ТТ) завода рекомендовалось использовать в насаждениях со средним объемом хлыста более  $0,4 \text{ м}^3$ , а машины на базе тракторов Онежского тракторного (ТДТ, Онежец) завода рекомендовалось использовать в насаждениях со средним объемом хлыста до  $0,4 \text{ м}^3$ .

В конце своего существования Онежский тракторный завод разработал и подготовил к серийному выпуску серию колесных лесных тракторов под маркой ТЛК [48], но в широкую серию они так и не пошли. Были попытки мелкосерийного выпуска колесных лесных машин (ЛТ-154) на базе мощных тракторов Кировского тракторного завода (г. Санкт-Петербург). НПО

«Силава» в Латвийской ССР была разработана серия легких колесных лесохозяйственных тракторов на базе машин Липецкого тракторного завода.

С тех пор прошло уже достаточно много лет, Онежского, Алтайского, Липецкого тракторных заводов не существует, но ходовые части специальных гусеничных лесных тракторов до сих пор визуально узнаваемы по использованию технического решения, предложенного создателями уже упомянутого первого в мире специального трелевочного трактора КТ-12 – высоко поднятому переднему катку и задней ведущей звездочке гусениц. Благодаря такому решению лесные гусеничные тракторы легко преодолевают специфические препятствия на лесосеке (кочки, пни, поваленные стволы, камни), не встречающиеся на сельхозугодьях или на строительных площадках. Неудачный опыт эксплуатации машин Ковровского машиностроительного завода, линейки МЛ, показал, что гусеничный движитель обычной строительной машины плохо справляется с лесными препятствиями. На рисунке 1.9 хорошо видно различие ходовой части лесного трактора и строительного.



Рисунок 1.9. Визуальное сравнение ходовой части лесного и строительного тракторов

Первейшим достоинством гусеничного движителя перед колесным всегда называют проходимость. При равном весе машин, у гусеничной значительно больше площадь пятна контакта с поверхностью почвогрунта

лесосеки, и, соответственно, меньше давление и больше сила тяги, при равных мощностях двигателей и КПД трансмиссии [59-65].

Благодаря низкому давлению на почвогрунты лесосек гусеничные лесные машины, при прочих равных условиях, показывают лучшую экологическую совместимость с лесной средой [49]. Исходя из того, что более чем на половине земель лесного фонда Российской Федерации преобладают почвогрунты III и IV категории, т.е. со слабой несущей способностью, а также постепенного, но отчетливо выраженного потепления климата (с 1980 по 2020 гг. период устойчивой зимней вывозки древесины с лесосек сократился на три недели [66]), гусеничные лесные машины достаточно часто более предпочтительны, чем колесные.

Исходя из сказанного выше о том, что согласно действующему лесному законодательству лесопользователи обязаны заниматься вопросами лесовосстановления, значит того факта, что себестоимость восстановительных работ входит в общую стоимость продукции лесозаготовительного производства, более средоохраняющее воздействие гусеничных лесных машин, по сравнению с колесными (при прочих равных условиях), способствует повышению не только экологической, но и экономической эффективности заготовки и восстановления лесных ресурсов [67, 68].

Безусловно, при плохих почвенно-грунтовых условиях, при глубоком снеге, колесные лесные машины можно оснастить упомянутыми выше колесными гусеницами, но их приобретение требует дополнительных, и не малых, финансовых затрат. Причем, как показано на рисунке 1.2, для различных условий эксплуатации, на каждую колесную лесную машину требуется приобретение нескольких различных комплектов таких колесных гусениц. На начало 2023 года средняя стоимость комплекта гусениц на колесную лесную машину 8×8 составляет 2520 тыс. руб. То есть, если на одну колесную лесную машину потребуется приобрести минимально

разумный комплект из болотоходных и снегоходных гусениц [69], то затраты составят более 5 млн. руб.

Без колесных гусениц тяжелые колесные лесные машины наносят очень ощутимый вред лесной среде, заключающийся в переуплотнении почвы, которое приводит к снижению ее аэрации, ухудшению гидрологического режима, а также к колееобразованию, которое в дальнейшем зачастую служит очагом развития водной, а иногда и ветровой эрозии [70-75].

На рисунке 1.10 показана глубокая колея, оставленная колесной лесной машиной за один проход. Если учитывать, что наиболее нагруженными (с самым большим весом) являются трелевочные системы, и что для трелевки заготовленных на пасеке лесоматериалов приходится сделать по одному волоку не один десяток рейсов, то становится очевидным, что после работы колесной лесной машины в таких условиях, лесной среде будет нанесен практически невосполнимый ущерб. Причем этот ущерб будет пролонгирован на очень длительный срок. Помимо снижения экологических функций лесного насаждения на долги годы, будут существенно увеличены сроки лесовосстановления и снижено его качество, как по приросту, так и по товарной ценности следующей сукцессии насаждения [76-78].

Судя по результатам целенаправленного информационного поиска, ведущие позиции в вопросах экологической и эксплуатационной эффективности лесных машин сейчас занимает научная школа «Инновационные разработки в области лесозаготовительной промышленности и лесного хозяйства», базирующаяся в настоящее время в Арктическом государственном агротехнологическом университете (г. Якутск). Многочисленные научные публикации участников данной научной школы позволяют сделать однозначный вывод о том, что без использования дополнительных технических средств и/или технологических решений у

гусеничного движителя (при прочих равных условиях) экологическая совместимость заметно выше, по сравнению с колесным [79-81].



Рисунок 1.10. Глубокая колея, оставленная колесной лесной машиной за один проход (Ленинградская обл. Выборгский р-н, 2022 г.)

Обратим внимание на то, что корневая система деревьев состоит из двух основных типов корней: якорных – которые обеспечивают крепление дерева в почвогрунте как консольной балки; сосущие – обеспечивающие питание дерева растворенными в воде минеральными веществами из

почвогрунта. При проведении выборочных рубок леса повреждение или угнетение (за счет переуплотнения окружающего почвогрунта) сосущих корней крайне негативно сказывается на последующем росте оставляемых на доращивание деревьев, подроста и молодняка. При этом сосущие корни, в основном, располагаются в верхнем почвенном слое почвогрунта [82, 83], толщина которого в бореальных лесах, особенно в лесах, расположенных на вечной мерзлоте крайне невелика [84, 85]. На рисунках 1.11-1.16 представлены эпюры нагрузок и зависимости динамики колесобразования колесных и гусеничных лесных машин, из которых видно подтверждение факта большей экологической совместимости гусеничных движителей с лесной средой [86-89].

Также отметим, что в Лесоводственных требованиях к технологическим процессам лесосечных работ, утвержденных Приказом Федеральной службы лесного хозяйства России от 29.11.1993 г., № 314 было регламентировано: «В целях предотвращения развития эрозионных процессов, ухудшения водно-физических свойств почвы и ее плодородия, ..., необходимо использовать на лесосечных работах машины, ..., с давлением в рабочем режиме не более 70 кПа для гусеничных и 150 кПа для колесных движителей». К сожалению, в действующих Правилах заготовки древесины и особенностей заготовки древесины в лесничествах, указанных в статье 23 Лесного кодекса Российской Федерации, утвержденных Приказом Министерство природных ресурсов и экологии Российской Федерации от 01.12.2020 г, № 993, нет никакой конкретики ни по допускаемому давлению движителей лесных машин на почвогрунты, ни, что было бы более рациональным, по допускаемой глубине колеи.

Для оценки воздействия техники на почвогрунты применялось запатентованное устройство [90].

Следует также иметь ввиду, что уплотнение почвогрунта происходит не только непосредственно под движителем, но и на определенном



расстоянии вбок от трелевочного волокна, или технологического коридора [91-92].

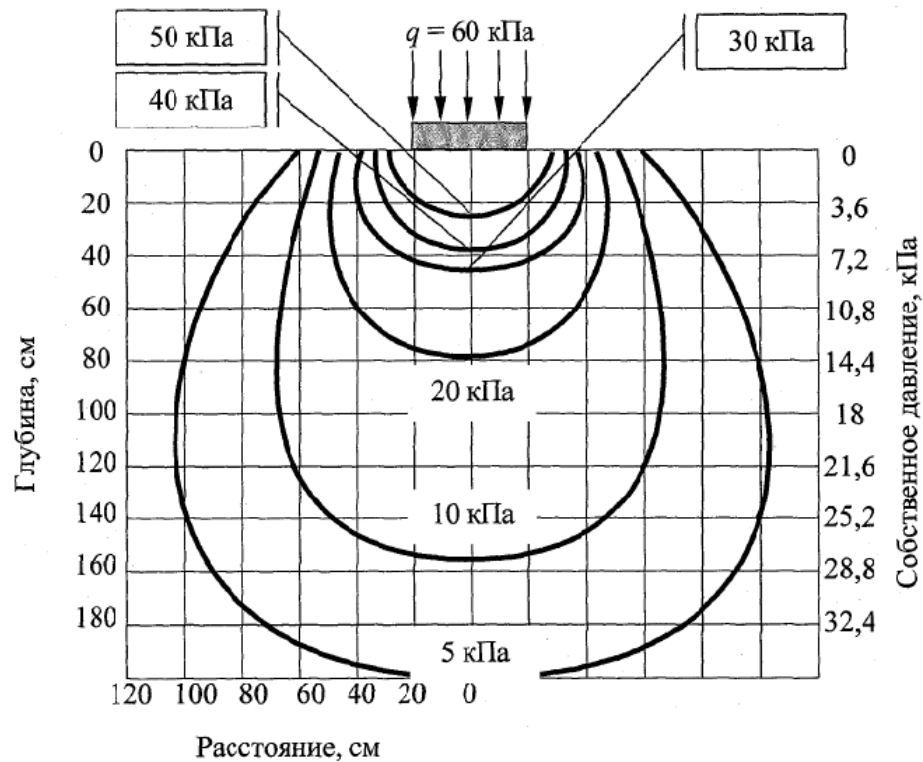


Рисунок 1.11. Эпюры дополнительных напряжений в идеальном почвогрунте и его собственное давление при плотности  $1,8 \text{ г/см}^3$

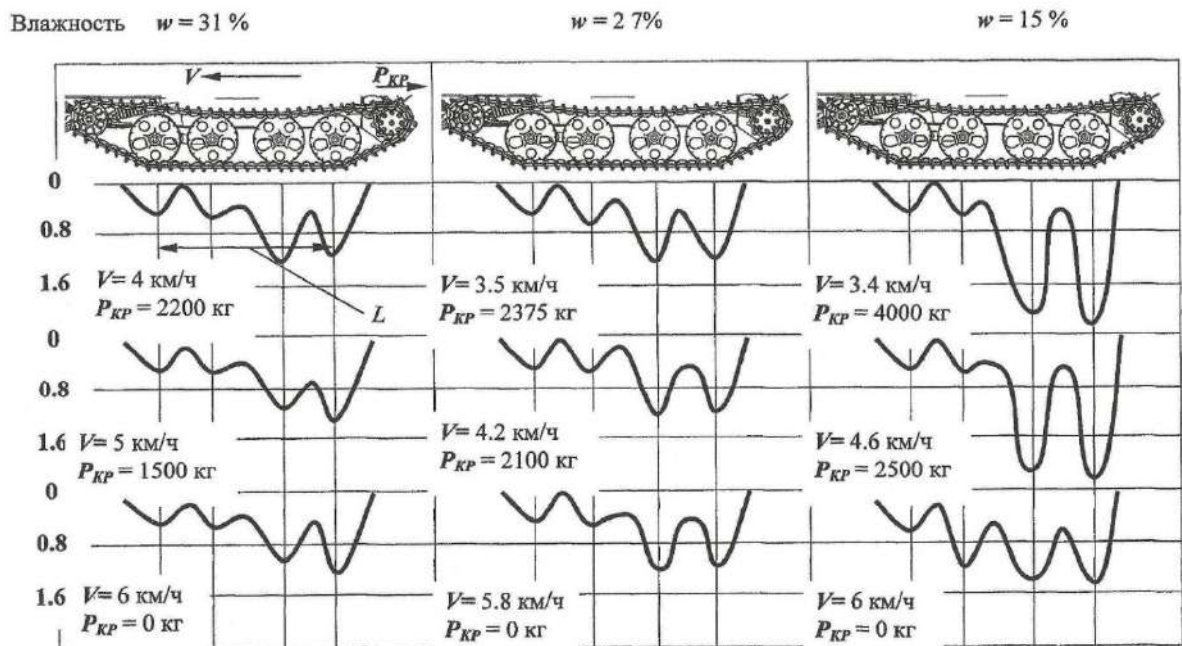


Рисунок 1.12. Распределение давления на почвогрунт по длине опорной поверхности в зависимости от влажности, скорости движения и тягового усилия гусеничного трактора

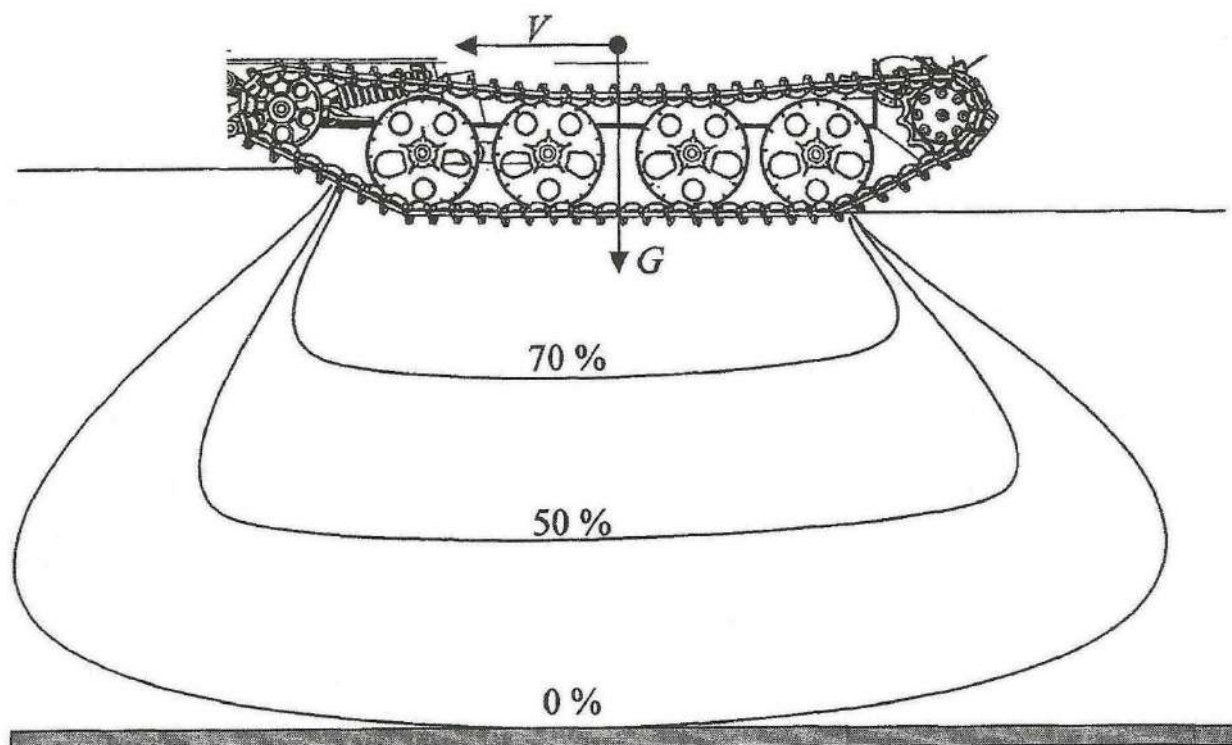


Рисунок 1.13. Эпюра напряжений в почвогрунте под гусеницами

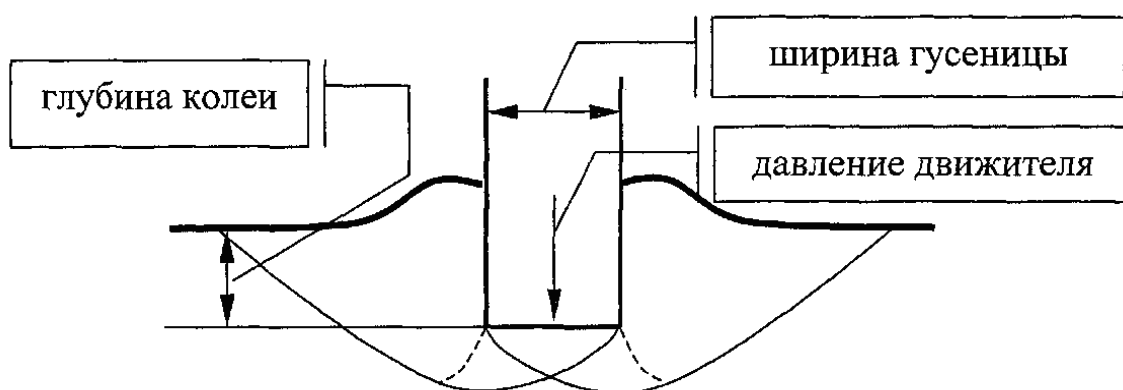


Рисунок 1.14. Схема колееобразования под воздействием движителя



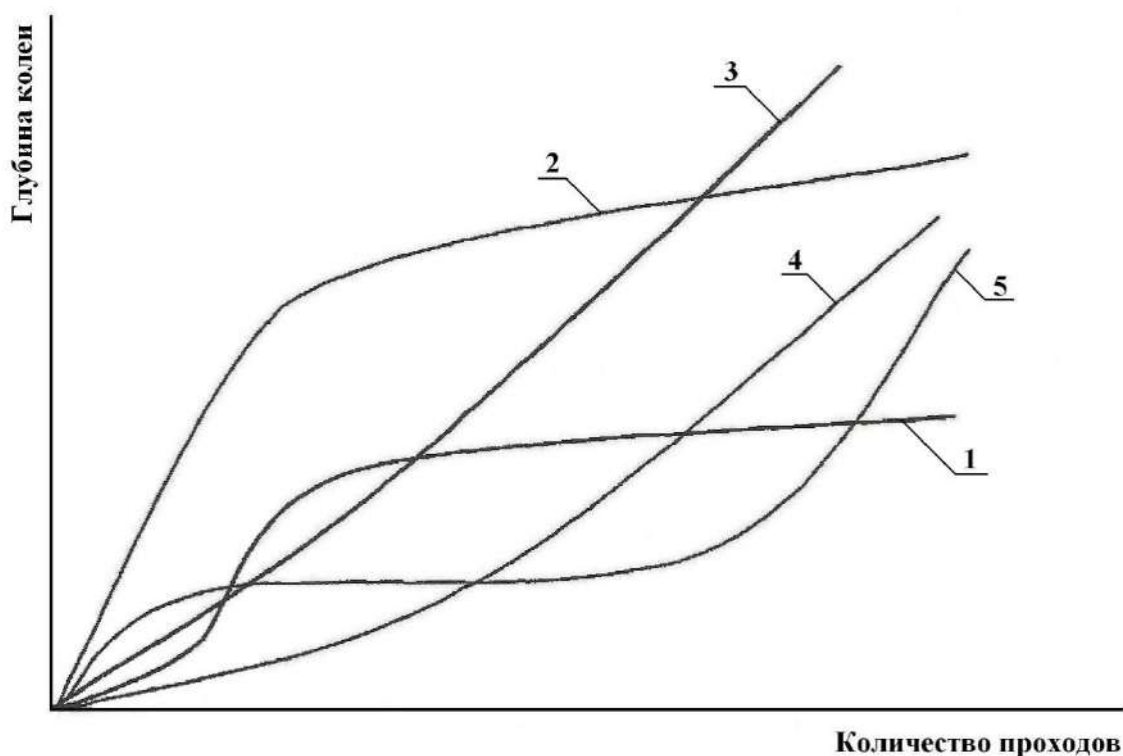


Рисунок 1.15. Типовые варианты динамики колееобразования

Как показано на рисунке 1.15, динамика колееобразования может быть разной [94-96]. На прочных почвогрунтах за первые проходы движитель проминает верхний слой почвогрунта, после чего колея практически не увеличивается, динамика похожа на логарифмический закон (вариант 1, рисунка 1.15). Во втором варианте рисунка 1.15 закон изменения динамики колеи, в принципе, тот же, только глубина проминаемого верхнего слоя почвогрунта больше. На слабых почвогрунтах (вариант 3, рисунка 1.15) процесс колееобразования не стабилизируется, глубина колеи постоянно растет, пока ездовая возможность волока не будет исчерпана, т.е. глубина колеи сравняется с клиренсом лесной машины. Интенсивность такого процесса может быть разной, что показывает разница между кривыми 3 и 4 на рисунке 1.15. При многократных проходах и большом давлении на почвогрунт, что характерно для колесных машин, несущая способность прочного подстилающего слоя почвогрунта, в определенный момент,

оказывается исчерпанной, после чего идет резкий рост глубины колеи (вариант 5, рисунка 1.15), и машина может начать «тонуть» (рисунок 1.17).

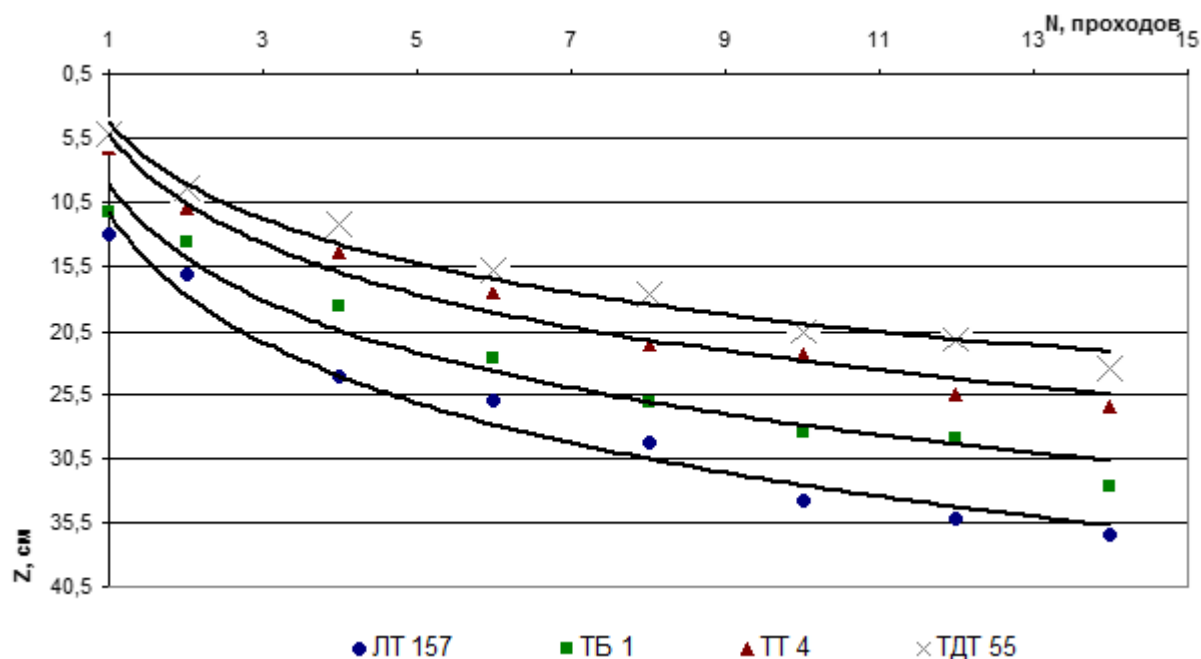


Рисунок 1.16. Динамика колееобразования гусеничных и колесного трелёвочных тракторов в зависимости от количества проходов

Как видно из рисунка 1.16 тяжелый колесный лесопромышленный трактор ЛТ-157 значительно интенсивнее образует колею (в равных условиях эксплуатации), нежели гусеничные тракторы.

Представленный на рисунке 1.17 производственный случай далеко не редкость при эксплуатации колесных лесных машин, и достаточно редок для гусеничных. При этом, после подобного «затопления» колесного трактора его придется везти в теплый бокс, мыть, прочищать манжеты, сальники, и т.д. [36]. В то время, как для гусеничного трактора, даже если он попадет в подобную неприятную ситуацию, такого большого количества работ по обслуживанию выполнять не придется.



Рисунок 1.17. «Затопление» колесного форвардера при плохих почвенно-грунтовых условиях

Для снижения давления на почвогрунты лесосек (увеличения площади контакта с ездовой поверхностью), повышения проходимости, на современные гусеничные лесозаготовительные машины (харвестеры на базе экскаваторов) устанавливают уширенную гусеничную ленту, с уменьшенным числом грунтозацепов [97] (рисунок 1.18).



Заводской трак экскаватора - 600 мм, 3 грунтозацепа



Лесной трак гусеничного харвестера - 700 мм, 2 грунтозацепа

Рисунок 1.18. Экскаваторный и харвестерный траки

По сравнению с современными колесными лесными машинами, у гусеничных значительно проще в устройстве и обслуживании трансмиссия,

она менее требовательна к качеству и соблюдению сроков технического обслуживания [98], что в условиях лесозаготовительных предприятий России, особенно мелких, часто сложно обеспечить [99, 100].

При эксплуатации в условиях значительных отрицательных температур колесные лесные машины предпочтительно не глушить, поскольку большое количество резиновых уплотнителей и сальников в трансмиссии современного колесного лесного трактора существенно снижает ее надежность при пуске машины в мороз [101].

Кроме этого, в сильный мороз у колесных машин падает давление в шинах, резина становится менее эластичной, что может привести к быстрому выходу колеса из строя [102, 103]. Ярким тому примером служат застревающие на трассах зимой в Якутии грузовики из-за лопнувших на морозе шин. А стоимость одного колеса (шины) современного лесопромышленного трактора составляет на начало 2023 года 200-280 тыс. руб. У гусеничных лесных машин таких проблем нет. Комплект гусениц на лесной трактор, типа ТТ, стоит (на начало 2023 года) около 200-250 тыс. руб. При этом, как уже было упомянуто, только 1 комплект колесных гусениц стоит в 10 раз дороже. А на одну колесную лесную машину желательно иметь два комплекта.

Безусловно, у гусеничных лесных машин, по сравнению с колесными, есть и ряд существенных недостатков. Прежде всего, это повышенный расход топлива (до 40%, при прочих равных условиях), и значительно меньшие скорости движения (при хороших почвенно-грунтовых условиях, неглубоком снеге), что существенно снижает производительность, особенно на транспортных операциях (прежде всего трелевке) [48].

При сильно дефрагментированном лесосечном фонде приходится часто и на большие расстояния перевозить комплексы лесных машин (с лесосеки на лесосеку, или с одного участка лесовосстановления/проведения других видов лесохозяйственных работ на другой) [104]. Колесные лесные машины,

в принципе, могут перемещаться при этом своим ходом, а гусеничные приходится перевозить только на трале, задействуя при этом дополнительную технику – тягачи. При этом еще и не по любой лесной дороге трал сможет пройти. Перемещение гусеничных машин своим ходом по дорогам может привести к разрушению дорожного покрытия, особенно твердого. Поэтому, в отличие от колесных, гусеничные машины не могут своим ходом перемещаться по дорогам общего пользования. Правда нельзя забывать о том, что конструкция гидравлической трансмиссии колесных лесных машин не предназначена для перемещения на длинные дистанции – она начинает перегреваться. Разве что форвардер Ponsse-Bison конструктивно предназначен для переездов на длинные расстояния [36].

У гусеничного движителя лесной машины очень большие динамические (ударные) нагрузки во время движения, особенно у трелевочных тракторов, которые должны на возможно больших скоростях совершать холостые рейсы – к месту набора пачки, и грузовые рейсы – к верхнему складу. При наездах на различные препятствия и съездах с них, гусеничная лента то натягивается, то провисает, соединительные пальцы бьются в своих посадочных гнездах, иногда работая как насос, который засасывает в соединение жидкую грязь. Это приводит к быстрому износу.

Достаточно большой проблемой современного лесного машиностроения в России является очень низкое качество металла, из которого изготавливаются гусеницы для лесных машин [105].

#### **1.4 Виды гусеничных движителей лесных машин**

Исходя из приведенного выше понятия «лесные машины» и «лесозаготовительные машины», следует уделить внимание вопросу, какие виды гусениц на них используют.

Обратим внимание на то, что лесные машины разного назначения совершают на лесосеке различное количество перемещений, что сказывается не только на конструкции технологического оборудования и движителя, но даже на емкости топливного бака. К примеру, емкость топливного бака харвестера или ВПМ значительно больше, чем у трелевочных тракторов [106]. Это связано с тем, что лесозаготовительные машины должны валить деревья, перемещаясь между технологическими стоянками. Большой топливный бак им нужен, чтобы как можно реже им приходилось перемещаться к площадке верхнего склада (или погрузочного пункта) для дозаправки. В то время, как трелевочные тракторы регулярно доставляют на верхний склад (погрузочный пункт) лесоматериалы, и им проще лишний раз заправиться, чем возить на себе большой объем топлива, увеличивая тем самым коэффициент тары трактора, со всеми вытекающими из этого негативными последствиями.

В принципе, можно подразделять лесные машины на транспортные и технологические. Транспортные лесные машины, прежде всего трелевочные тракторы, в меньшей степени погрузчики, совершают большое количество перемещений (грузовой работы), технологические машины перемещаются меньше и выполняют рабочие или смешанные операции – лесозаготовительные машины, процессоры, сучкорезные, и т.д. Есть правда транспортно-технологические машины – харвардеры, ВТПМ [107], но в российском лесозаготовительном производстве, в настоящее время, они не используются.

Гусеничные лесозаготовительные машины (ВПМ, харвестеры), а также лесные машины - процессоры и погрузчики делаются на базе строительных манипуляторных машин – экскаваторов [108].

Как было отмечено выше, для трелевочных тракторов желательно иметь меньший вес, для снижения удельной энергоемкости первичного перемещения заготовленных лесоматериалов. В связи с этим гусеничные

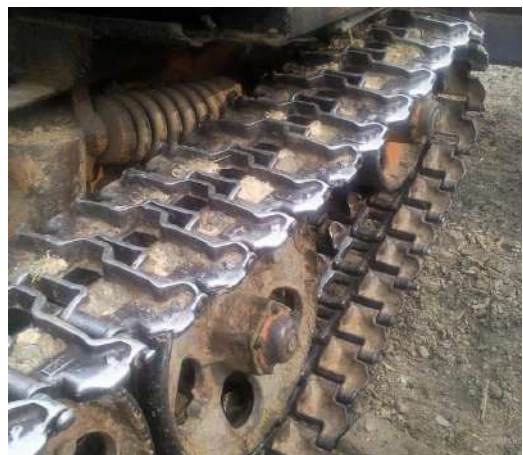
трелевочные тракторы оснащаются самыми простыми и легкими гусеницами с одноцевочным зацеплением, у которых последовательными шарнирами являются трак и палец, представляющие собой отливки. И все это собирается с минимальными требованиями к точности, никаких уплотнений со смазкой в таких гусеницах нет. Такая гусеница стоит значительно дешевле, чем гусеницы для строительных машин, но срок ее службы достаточно мал. И в связи с уже упомянутым выше существенным снижением качества чугуна, из которого эти гусеницы изготавливаются, срок службы этих гусениц еще более снижается.

Гусеница на строительных тракторах представляет собой цепь с закрытыми звеньями, с уплотнениями, в которые закладывается консистентная смазка, и к этой цепи на болты крепятся траки. Такие гусеницы стоят достаточно дорого, но имеют длительный срок эксплуатации. Благодаря смазке интенсивность их износа снижается достаточно существенно, до 20%.

На рисунке 1.19 приведено визуальное сравнение экскаваторной гусеницы и гусеницы трелевочного трактора.



Гусеница от экскаватора



Гусеница трелевочного трактора

Рисунок 1.19. Визуальное сравнение экскаваторной гусеницы и гусеницы трелевочного трактора



По вариантам смазки шарниров также гусеницы подразделяют [109]:

- сухие (с открытым металлическим шарниром);
- закрытые (смазка закладывается в шарнир сразу на весь срок эксплуатации);
- с жидкой смазкой (в которых имеются уплотнения, обеспечивающие герметичность шарнира для сохранения смазки);
- с резино-металлическим шарниром (между пальцем и звеном гусеницы устанавливается резиновая втулка);
- с игольчато-подшипниковым шарниром.

При установке на трактор металлических гусениц ведущие колеса имеют форму звездочки, зубья которой входят в зацепление с гусеничной лентой. Если же на трактор устанавливают резино-металлические гусеницы, то они, обычно имеют гладкую поверхность контакта с гладким колесом, и у них передача крутящего момента осуществляется трением.

### **1.5 Особенности работы лесных машин в арктической зоне**

В настоящее время Правительство Российской Федерации уделяет большое внимание развитию арктических регионов. Корпорация развития Дальнего Востока и Арктики определяет арктическую зону как крупнейшую особую экономическую зону в мире, на которой инвесторы пользуются специальными режимами налогового и административного регулирования.

В арктическую зону входят 9 регионов России (4 относятся к ней полностью, 5 – частично). Площадь арктических территорий составляет 4,8 млн. км<sup>2</sup> (28% территории России). Ряд арктических регионов России имеет очень большой лесной потенциал: Архангельская область, Республика Саха (Якутия), Республика Карелия.



С экономической точки зрения арктические территории России представляют собой пояс, ориентированный на Северный морской путь – очень активно развиваемый сейчас Россией транспортный коридор.

С климатической точки зрения, достаточно часто, к арктическим территориям относят леса криолитозоны, являющиеся особо экологически ранимыми и выполняющие крайне важную экологическую функцию – депонирования больших запасов углерода [110]. Проведение лесосечных работ в лесах на вечной мерзлоте (а на них приходится более 50% всей площади лесного фонда Российской Федерации) очень желательно приурочивать к зимнему периоду, чтобы избежать повреждений мерзлотных почвогрунтов [111-116].

Но криолитозона известна своим резко континентальным климатом, длительными сильными морозами и коротким жарким летом.

При работе в сильный мороз у любых машин возникают проблемы, связанные с морозной хрупкостью «Охрупчиванием» (Embrittlement) металлов, резины, других используемых в их конструкциях материалов. Ведущие производители лесных машин рекомендуют прекращать их эксплуатацию при морозе более  $-40^{\circ}\text{C}$ .

Да, сейчас не сложно приобрести специальную жидкость для гидравлической системы, которая не замерзнет и при  $-50^{\circ}\text{C}$ , но металлическая конструкция лесных машин «сдается» значительно раньше.

Совершенно своеобразные условия эксплуатации лесных машин создает снежный покров, который, в определенных случаях, создает столь же неудобные условия работы, как слабые почвогрунты в теплый период года. Также приходится использовать схемы транспортного освоения лесосек с большей густотой трелевочных волоков и технологических коридоров. С одной стороны, снежный покров укрывает различные единичные препятствия, в виде бревен, пней, кочек, камней, и т.д. С другой стороны, он увеличивает коэффициент сопротивления перемещению машины, при

поворотах гусеничной машины снег норовит забиться в гусеницы, и при этом полезно помнить, что большую часть ездового времени гусеничный трелевочный трактор движется в режиме поворота [117].

### **1.6 Определение вероятности безотказной работы балансира гусеничного трактора**

В качестве предмета исследования выбран балансир лесного гусеничного трактора. Балансиры имеют различные конфигурации и конструктивные особенности, в зависимости от завода изготовителя и модели трактора, однако выполняют схожие функции. Для тракторов ОТЗ данный механизм является универсальным и используется в любых гусеничных, ранее производимых заводом, например Онежец-300, ЛХТ-100, ТДТ-55 и др. Механизм балансира гусеничного трактора ОТЗ состоит из рычага, оси каретки и двух осей катка. Отказы данного узла происходят из-за износа и последующего абразивного трения в соединениях «ось-подшипник». Когда зазор в подвижном соединении становится значительным, из него уходят смазочные материалы, а также происходит воздействие загрязняющих абразивных элементов и влаги на поверхности трения. Исходя из общей теории трения в подвижных соединениях, любой процесс износа можно разделить на три основные фазы: приработка, нормальный износ и критический износ [118]. Для каждого конкретного подвижного соединения критическое значение износа, и соответственно зазора определяется индивидуально. Это значение зависит от диаметра деталей и поверхности их трения, нагрузки в узле, а также от качества и количества смазочного материала. Балансиры наиболее распространенных на территории РФ тракторов представлены на рисунке 1.20.

Установлено, что средняя наработка до отказа у балансира тракторов ОТЗ составляет 2700 моточасов [119].

Анализом отказов балансиров тракторов ОТЗ занимался проф. Питухин

А.В., им было установлено, что 80% наработка до отказа составляет 2000 моточасов, при нормативном значении в 6000. Критический износ после 2000 моточасов вызван хрупким изломом (при однократной критической нагрузке) и зазором в соединении деталей, в который активно попадает абразив [119].

Эмпирическая кривая вероятности безотказной работы балансира представлена на рисунке 1.21.



Балансир тракторов Онежского тракторного завода



Балансир тракторов Алтайского тракторного завода

Рисунок 1.20 Балансиры трелевочных тракторов

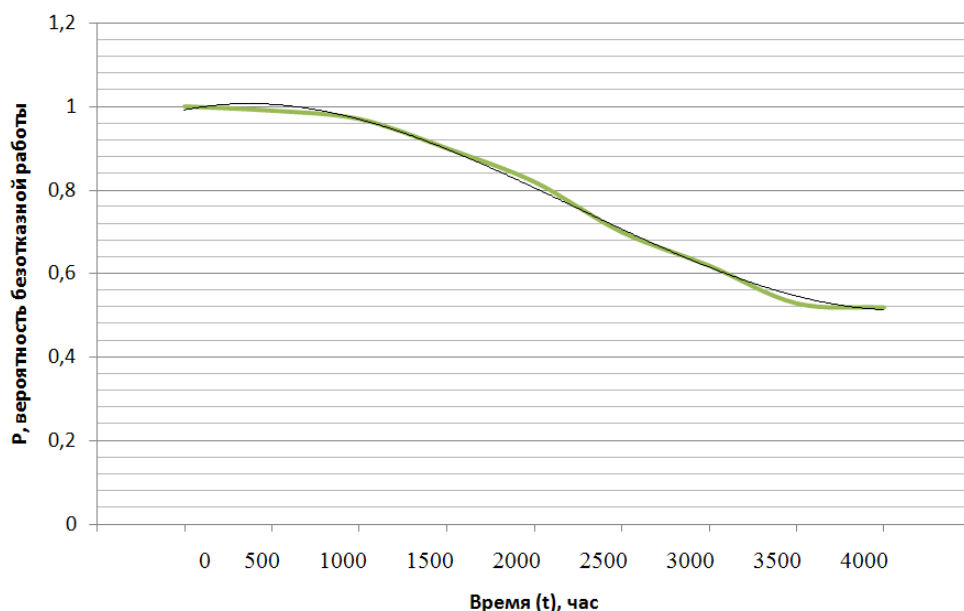


Рисунок 1.21. Экспериментальные данные (эмпирическая и полиномиальная кривая) вероятности безотказной работы

Для проведения адекватной аппроксимации кривой, необходимо показатель по оси X (время) принимать в тысячах часов. Результаты аппроксимации представлены на рисунке 1.22.

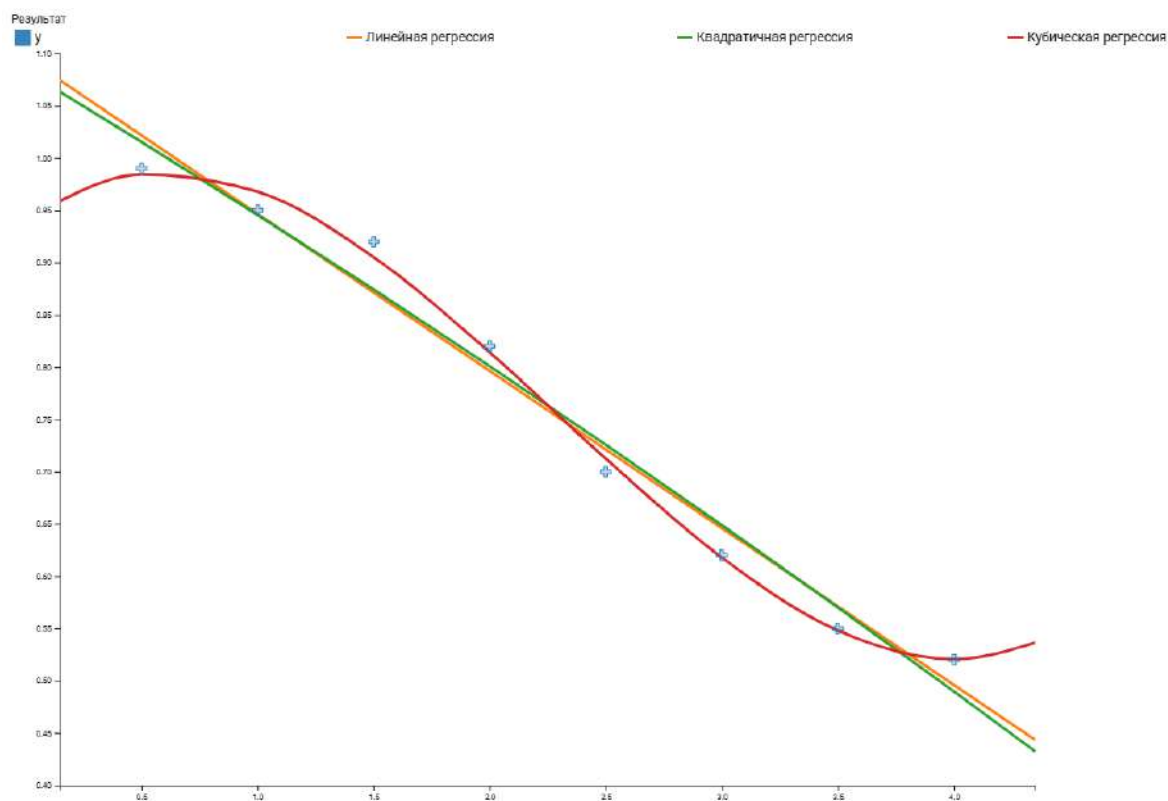


Рисунок 1.22. Аппроксимация зависимости вероятности безотказной работы от времени

Проведя аппроксимацию графика, были определены линейная, квадратичная, кубическая, степенная, показательная, логарифмическая, гиперболическая и экспоненциальная зависимости. Наиболее высокими коэффициентами детерминации обладали линейная, квадратичная и кубическая зависимости, показатели составили от 0,97 до 0,99. Средняя ошибка аппроксимации составила от 0,92 до 3,5%. Оценивая полученные данные, приходим к выводу, что кубическая зависимость наиболее точно и адекватно отражает исследуемую зависимость. При данном виде аппроксимации средняя ошибка не превышает 0,92%, при коэффициенте корреляции 0,9984 [119].

$$P = 0,0236t^3 - 0,1631t^2 + 0,1702t + 0,9371 \quad (1.1)$$

при коэффициенте корреляции  $R^2 = 0,9984$

Как было сказано ранее, выход из строя балансиров обусловлен двумя основными причинами: хрупким изломом вследствие однократной критической нагрузки и износом поверхностей трения осей каретки и катков трактора. Для минимизации хрупких изломов необходимы технологические изменения, такие как применение прогрессивных материалов и изменения конструкции корпусов рычагов балансиров. Для уменьшения износа и повышения триботехнических характеристик осей возможно применение композиционных покрытий и современных специализированных смазочных материалов [120].

Детали «ось каретки» и «ось катка» относятся к классу «ступенчатые оси» и имеют три и пять ступеней соответственно. Обе детали имеют не сложную конфигурацию. Наиболее подвержены износу резьбы и посадочные места под подшипники. Шероховатость поверхности на посадочных местах под подшипник Ra 2,5. Материал деталей - сталь 40Х. Закалка поверхностей деталей применялась Онежским тракторным заводом начиная с 2000-х годов.

На рисунке 1.23 мы видим схему соединения детали ось катка с подшипником. Для обеспечения подвижности соединения и возможности нанесения смазочных материалов, применена посадка с зазором (обе поверхности изготовлены по 6 качеству точности).

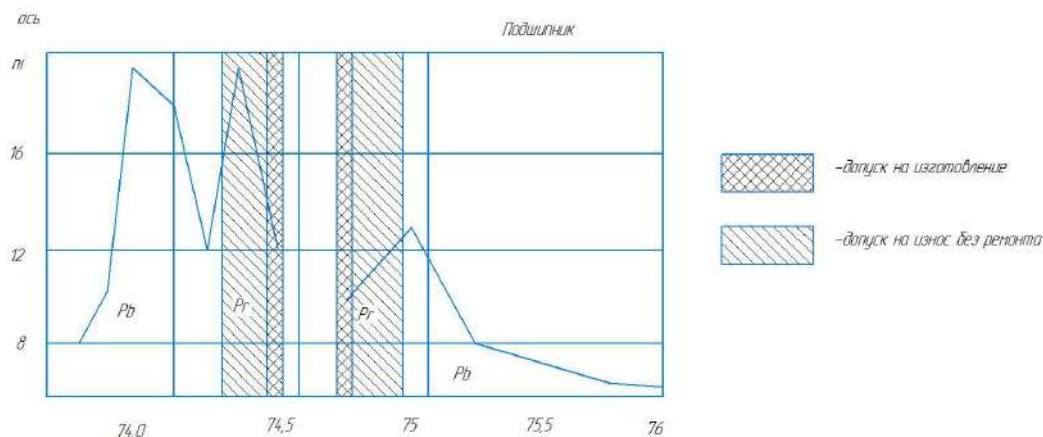


Рисунок 1.23. Соединение ось катка – подшипник.

Допустимый без ремонта размер шейки оси составляет 74,96 мм, а подшипника 75,2 мм. Проанализировав данное соединение можно прийти к выводу, что при критическом зазоре, превышающем 0,24 мм., из зоны контакта деталей активно начинает вытекать смазочный материал, замещаемый абразивными частицами из внешней среды (почва, песок). Возникает сухое абразивное трение, которое приводит к еще более интенсивному износу деталей и впоследствии отказу узла в целом [121].

Согласно картам дефектации, при износе осей балансира их необходимо выпрессовать, направить и проточить до номинального размера, после чего собрать балансир заново.

Существенно повысить долговечность балансиров лесных гусеничных тракторов поможет применение смазочных материалов, с учетом материалов деталей, их нагруженности, критического износа, а также климатической зоны, в которой будет работать трактор. При выборе смазочных материалов стоит обратить внимание на вязкость при различных температурных режимах, плотность, наличие присадочных элементов, и ряд других факторов [119].

## **1.7 Выводы по главе 1 и формулирование задач исследования**

Проведя анализ лесозаготовительных и лесовосстановительных работ, проводимых в арктической зоне, а также характеристики почвогрунтовых покрытий, наиболее целесообразным для данных климатических условий будет применение гусеничной лесной техники.

Для смазки элементов трансмиссии и ходовой части отечественных гусеничных лесных машин с 50-х годов XX века применяются устаревшие трансмиссионные масла ТСП-10 и ТСП-15. При низкотемпературных условиях работы, данные смазочные материалы могут терять свои свойства, что приведет к повышенному трению, и соответственно, высокой

интенсивности изнашивания подвижных соединений. Данную проблему могут решить современные присадочные материалы, которые необходимо добавлять в определенной пропорции к трансмиссионным маслам, повышая тем самым износостойкость.

Исходя из вышеперечисленного можно обозначить основные задачи исследовательской части работы:

1. Анализ современных присадок для смазочных материалов;
2. Исследование перспективности применения аэрогеля и серпентинита для снижения интенсивности изнашивания деталей балансиров гусеничных лесных машин;
3. Исследование зависимости эксплуатационных факторов и концентрации присадочных материалов в трансмиссионном масле на износостойкость балансира гусеничного трактора;
4. Испытание эффективности присадочных материалов в арктических условиях;
5. Экономическое обоснование применения аэрогеля и серпентинита в качестве присадочных материалов к трансмиссионному маслу для гусеничных лесных машин.

## **2 ИССЛЕДОВАНИЕ ТРИБОТЕХНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СМАЗОЧНЫХ КОМПОЗИЦИЙ С ДОБАВКАМИ МЕТИЛТРИМЕТОКСИСИЛАНА (МТМС) АЭРОГЕЛЯ И СЕРПЕНТИНИТА ДЛЯ БАЛАНСИРА ЛЕСНОГО ГУСЕНИЧНОГО ТРАКТОРА**

### **2.1 Применение противоизносных и антифрикционных дисперсных добавок**

Отказы деталей трущихся узлов ходовой части гусеничных лесных машин происходят в основном из-за сильного износа поверхностей трения, и в дальнейшем попадания в зону контакта деталей абразивных частиц еще усиливающих этот процесс [122].

Исходя из общей теории трения в подвижных соединениях, любой процесс износа можно разделить на три основные фазы: приработка, нормальный износ и критический износ [118,119]. Для каждого конкретного подвижного соединения критическое значение износа, и соответственно зазора определяется индивидуально. Одним из способов увеличения долговечности балансира гусеничного трактора является использование противоизносных и антифрикционных дисперсных добавок в смазочное масло. Для снижения энергетических потерь на трение в подшипниках, смазываемых маслами, наряду с жидкими присадками используются высокодисперсные добавки твёрдых смазочных веществ. Хорошими добавками для уменьшения энергетических потерь на трение, являются такие вещества, как графит, дисульфид молибдена, тетраборат натрия, хлорид кадмия, нитрид бора, иодид свинца, хлорид кобальта, сульфат серебра и стеарат цинка. Также хорошо используются сульфиды тяжёлых металлов, селениды и теллуриды [123,124]:  $\text{MoS}_2$ ,  $\text{WSe}_2$ ,  $\text{WS}_2$ ,  $\text{NbS}_2$ ,  $\text{NbSe}_2$ ,  $\text{TaS}_2$ ,  $\text{TaSe}_2$ . В большинстве случаев они имеют слоистую гексагональную структуру,



хорошие антиокислительную и химическую стабильность и электропроводность и применяются в виде порошков, суспензий, золь и антифрикционных лаковых покрытий. Данные высокоанизотропные материалы обладают различной прочностью на срез в разных направлениях кристаллической решётки. Известно, что коллоидные дисперсии твёрдых смазочных материалов проявляют противозадирные, противоизносные, антифрикционные и антипиттинговые свойства [125,126].

Наряду с перечисленными, перспективными дисперсными добавками являются также такие модификаторы трения как полиметилсилсесквиоксан (MTMC) [7-9]  $(\text{SiO}_{1,5}\text{CH}_3)_n$ , в том числе в форме аэрогеля и серпентинит [10,11]  $\text{Mg}_6[\text{Si}_4\text{O}_{10}](\text{OH})_8$ . В частности, добавление частиц гидросиликата магния в жидкие и пластичные смазки заметно улучшало триботехнические свойства при трении скольжения пар «сталь-сталь» и «сталь-бронза» [132-134]. Серпентинит является более изученной дисперсной добавкой по сравнению с высокодисперсными аэрогелями, поэтому представляется целесообразным совместное исследование и сравнение данных добавок в смазочном масле, используемом для смазки балансира гусеничного трактора. Полиметилсилсесквиоксанные аэрогели (MTMC) обладают высокой пористостью (87...88 %), достаточно низкими прочностью при сжатии (0,2...0,35 МПа) и твердостью, высокой гидрофобностью и эластичностью, химической устойчивостью к кислотам и органическим растворителям и очень высокими сорбционными свойствами по отношению к смазочным маслам и нефтепродуктам [135-139]. В связи с этим, частицы аэрогеля MTMC при добавке в смазочные среды могут служить эффективными накопителями жидкой смазки и при высоких давлениях между трущимися поверхностями, когда смазочная жидкая среда выдавливается из зазора, разрушаясь, способны выделять значительное количество смазки. Кроме того, частицы аэрогеля состоят из множества сфероидов диаметром 0,5...3

мкм [139], что при разрушении частиц порошка будет приводить к своеобразному эффекту «микрошарикоподшипника».

Для улучшения свойств смазочных материалов в них вводят 0,001—5% (иногда выше) так называемых присадок. Классификация присадочных материалов, применяемая институтом машиностроения, материалов и транспорта Санкт-Петербургского политехническим университетом представлена на рисунке 2.1.



Рисунок 2.1. Классификация наполнителей (присадочных материалов)

Проведя анализ вышеперечисленных присадочных материалов, наиболее целесообразно для пар трения лесных гусеничных машин применять порошковые материалы, способные впитывать в себя смазочные материалы, и в дальнейшем, по принципу "губки" поддерживать их концентрацию в зоне контакта деталей. Для данной цели подходят порошкообразный аэрогель и порошкообразный серпентинит. Данные материалы, даже в случае утечки смазочного материала через зазор или трещину смогут поддерживать работоспособное состояние лесной машины еще на протяжении определенного промежутка времени. Серпентинит является природным материалом, а аэрогель - синтетическим. Этим вызвана большая разница в цене между этими материалами, стоимость серпентинита -

500 р./кг, а аэрогеля - 3000 р./кг. Оба материала хорошо себя проявляют для снижения интенсивности изнашивания деталей в лабораторных условиях, однако ранее они не применялись для техники лесной отрасли [140].

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 пола, 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 обработки, без применения химического воздействия, что делает данный материал экологически безопасным для хрупкой природы арктической зоны.

## **2.2 Материалы и методики исследования**

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

В качестве дисперсных добавок в использовали:

- 1) порошкообразный аэрогель  $(\text{SiO}_{1,5}\text{CH}_3)_n$  [139], с размерами частиц  $\approx 10$  мкм.
- 2) порошкообразный серпентинит  $\text{Mg}_6[\text{Si}_4\text{O}_{10}](\text{OH})_8$ , со средним размером частиц 0,6 мкм.

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 (рисунок 2.2, а) в соответствии с ГОСТ 9490–75 [20].

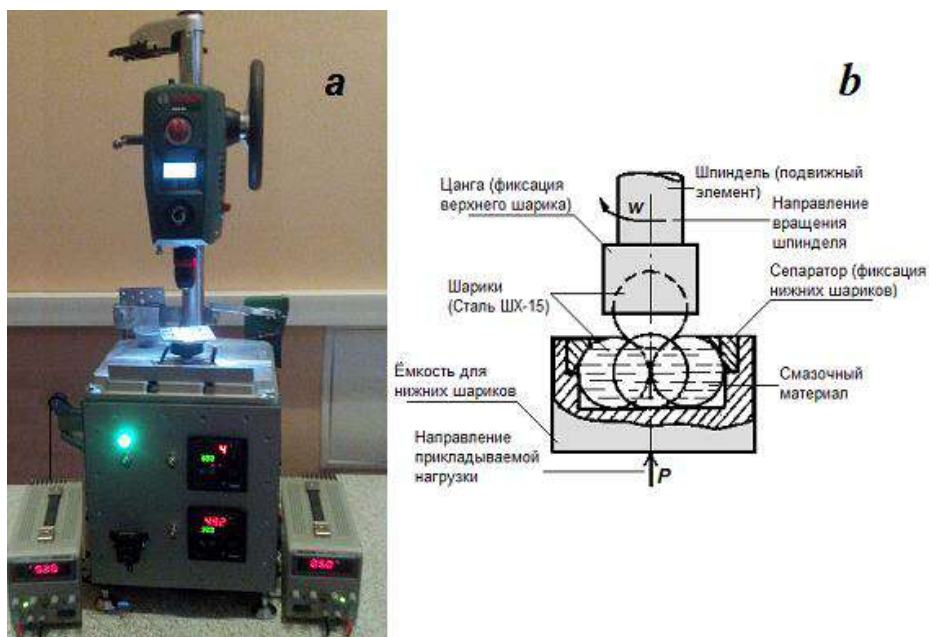


Рисунок 2.2. Испытательное оборудование:

*a* – машина трения ПБД-40; *b* – схема испытаний.

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.

К этому шарiku под нагрузкой 40 кгс (392 Н) прижимают три неподвижных шарика (рисунок 2.2, б), сложенные треугольником в плоскости, перпендикулярной оси шпинделя, и помещают в чашку с исследуемым смазочным материалом. Вращающийся шарик вытирает на контактирующих с ним участках рабочих поверхностей неподвижных шаров лунки (пятна износа), по средней величине которых судят о влиянии смазочного материала на износ шаров при данной нагрузке. Длительность

одного испытания составляла 60 мин. Каждый смазочный материала испытывали шестикратно. В каждом опыте замерялась сила трения.

### 2.3 Результаты исследования

Зависимости силы трения от времени при испытании базового смазочного масла ТСП-10 показаны на рисунке 2.3.

На рисунке 2.3 показана также зависимость средней силы трения по шести экспериментам, повторное усреднение силы трения по полученному массиву средних значений даёт величину 1,3 Н. Среднее значение дисперсии силы трения по шести экспериментам для базового смазочного масла составило  $0,0036 \text{ Н}^2$  [141].

Зависимости силы трения от времени при испытании смазочного материала ТСП-10+1% Аэрогель показаны на рисунке 2.4.

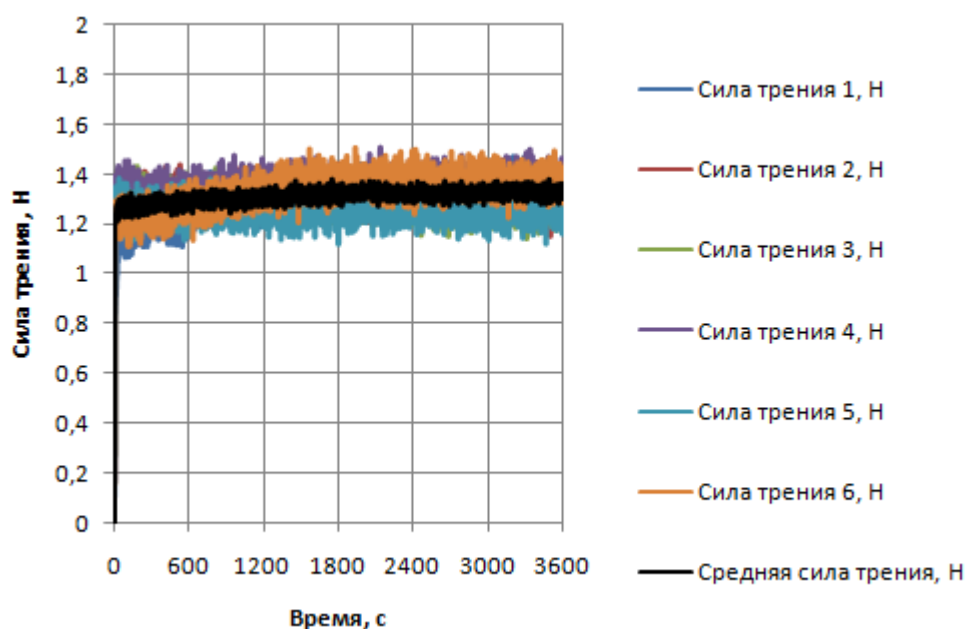


Рисунок 2.3. Зависимость силы трения от времени для базового смазочного масла ТСП-10

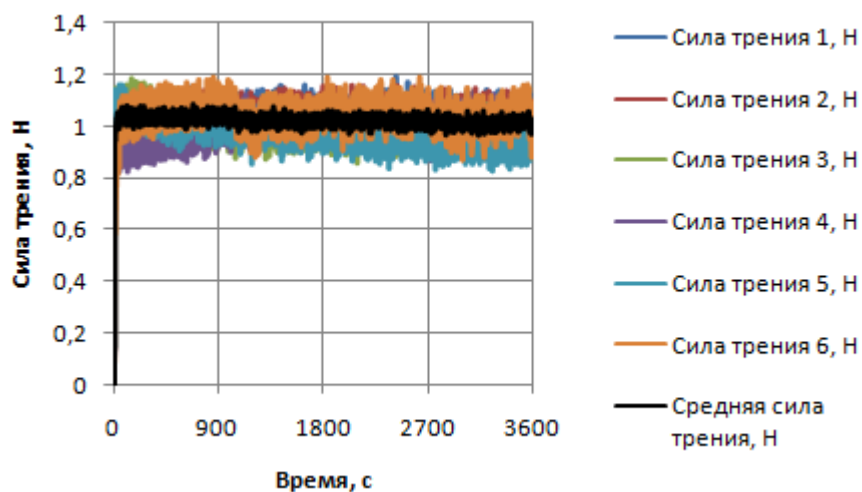


Рисунок 2.4. Зависимость силы трения от времени для смазочного материала ТСП-10+1% Аэрогель

На рисунке 2.4 показана зависимость средней силы трения по шести экспериментам, повторное усреднение силы трения даёт значение 1,02 Н.

Среднее значение дисперсии силы трения по шести экспериментам для смазочного материала ТСП-10+1% Аэрогель составило  $0,0035 \text{ Н}^2$ .

Зависимости силы трения от времени при испытании смазочного материала ТСП-10+2% Аэрогель показаны на рисунке 2.5.

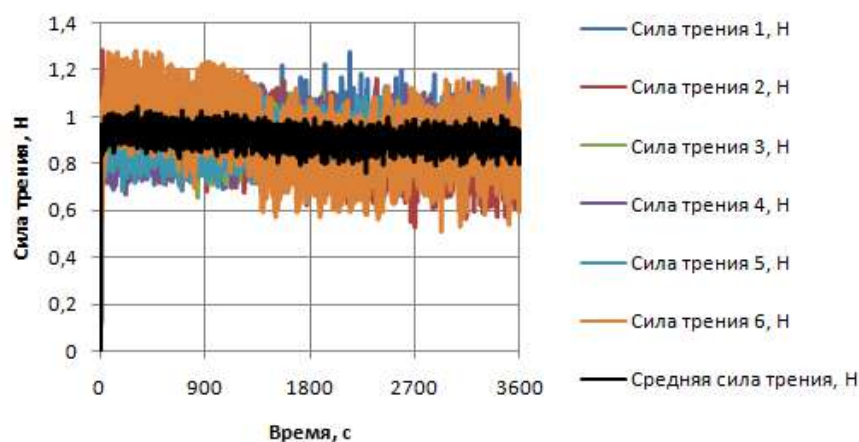


Рисунок 2.5. Зависимость силы трения от времени для смазочного материала ТСП-10+2% Аэрогель

На рисунке 2.5 показана зависимость средней силы трения по шести экспериментам, повторное усреднение силы трения даёт значение 0,9 Н. Среднее значение дисперсии силы трения по шести экспериментам для смазочного материала ТСП-10+2% Аэрогель составило 0,0097 Н<sup>2</sup>.

Зависимости силы трения от времени при испытании смазочного материала ТСП-10+4% Аэрогель показаны на рисунке 2.6.

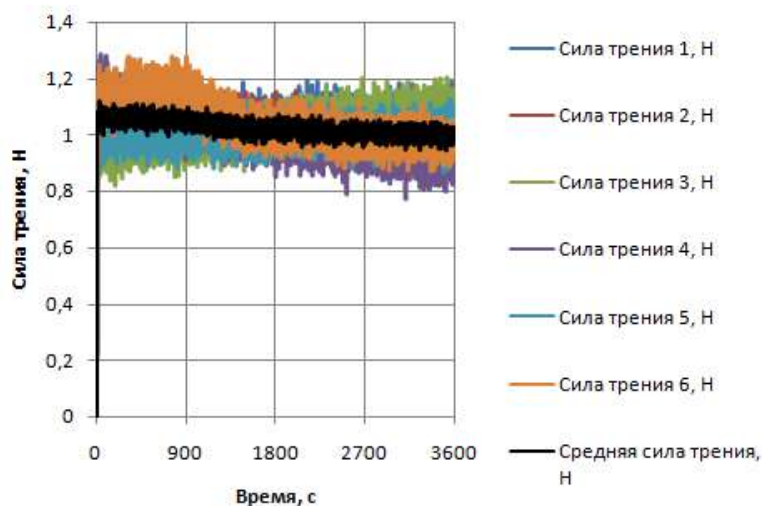


Рисунок 2.6. Зависимость силы трения от времени для смазочного материала ТСП-10+4% Аэрогель

На рисунке 2.6 показана зависимость средней силы трения по шести экспериментам, повторное усреднение силы трения даёт значение 1,02 Н. Среднее значение дисперсии силы трения по шести экспериментам для смазочного материала ТСП-10+4% Аэрогель составило 0,0044 Н<sup>2</sup>.

Графики зависимости средней силы трения и среднего диаметра лунки износа в зависимости от концентрации аэрогеля в базовом смазочном масле приведены на рисунке 2.7.

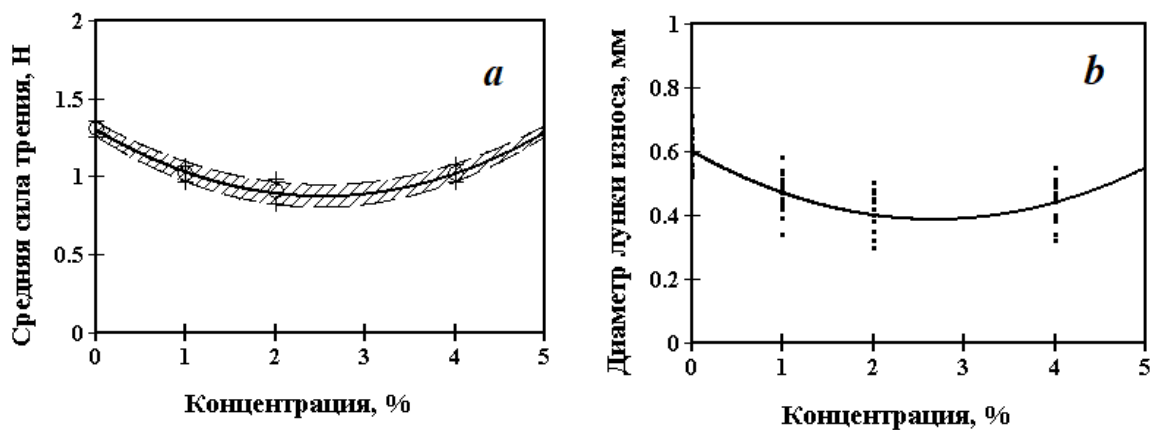


Рисунок 2.7. Графики зависимости от концентрации аэрогеля:

*a* – средней силы трения, *b* – среднего диаметра лунки износа

На рисунке 2.7 *a* пунктирными линиями показаны границы доверительного интервала. Зависимость средней силы трения от концентрации аэрогеля имеет следующий вид:

$$F_f(C) = 0.067C^2 - 0.338C + 1.3. \quad (2.1)$$

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

Исследование функции (2.1) 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:

$$d_w(C) = 0.03C^2 - 0.16C + 0.6. \quad (2.2)$$

Коэффициент детерминации для (2.2) равен  $R^2 = 0,81$ .

Исследование функции (2.2) 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%.

Зависимости силы трения от времени при испытании смазочного материала ТСП-10+1% серпентинит показаны на рисунке 2.8.



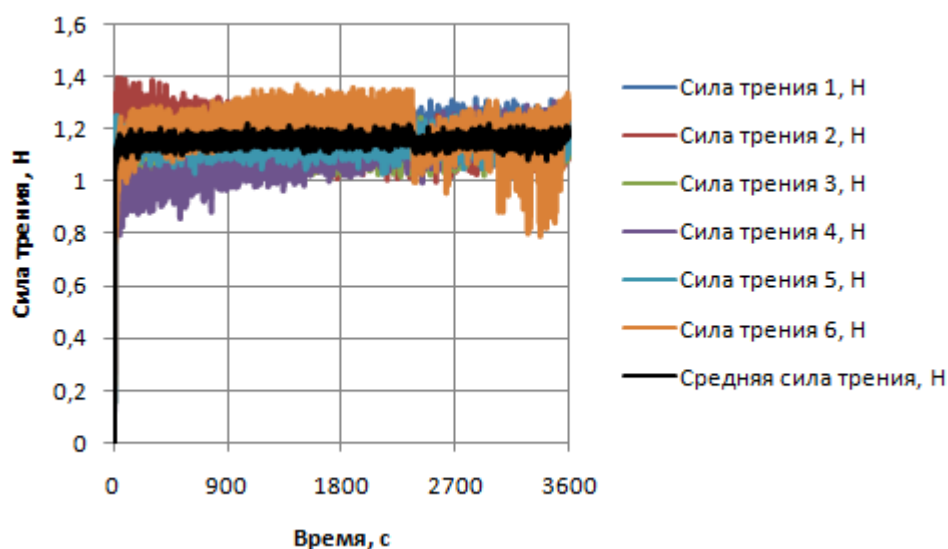


Рисунок 2.8. Зависимость силы трения от времени для смазочного материала ТСП-10+1% серпентинит

На рисунке 2.8 показана зависимость средней силы трения по шести экспериментам, повторное усреднение силы трения даёт значение 1,156 Н. Среднее значение дисперсии силы трения по шести экспериментам для смазочного материала ТСП-10+1% серпентинит составило 0,0056 Н<sup>2</sup>.

Зависимости силы трения от времени при испытании смазочного материала ТСП-10+2% серпентинит показаны на рисунке 2.9.

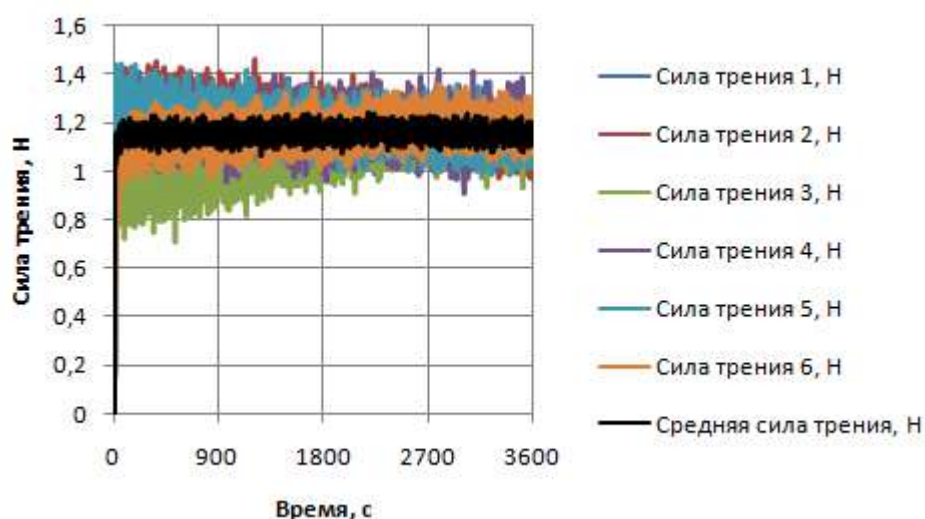


Рисунок 2.9. Зависимость силы трения от времени для смазочного материала ТСП-10+2% серпентинит

На рисунке 2.9 показана зависимость средней силы трения по шести экспериментам, повторное усреднение силы трения даёт значение 1,16 Н. Среднее значение дисперсии силы трения по шести экспериментам для смазочного материала ТСП-10+2% серпентинит составило 0,0097 Н<sup>2</sup>.

Зависимости силы трения от времени при испытании смазочного материала ТСП-10+4% серпентинит показаны на рисунке 2.10.

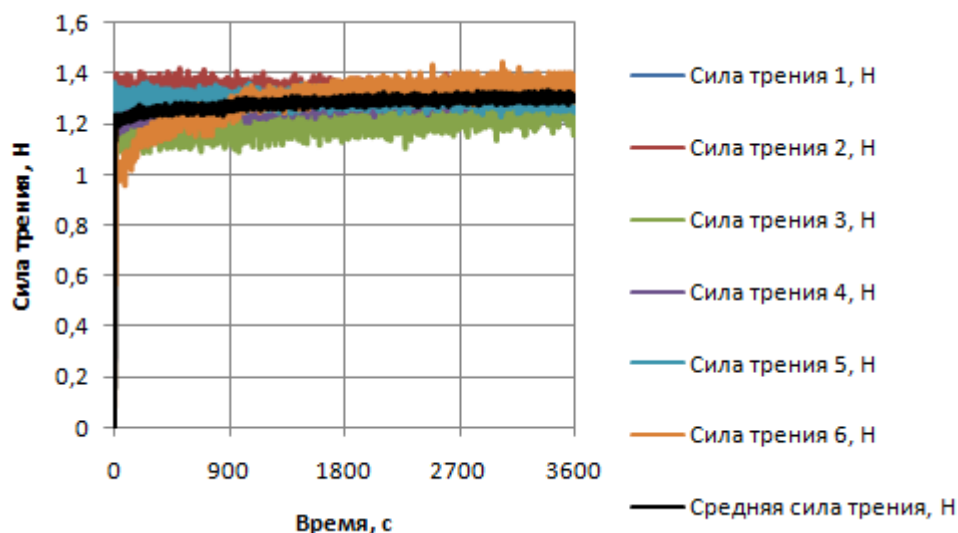


Рисунок 2.10. Зависимость силы трения от времени для смазочного материала ТСП-10+4% серпентинит

На рисунке 2.10 показана зависимость средней силы трения по шести экспериментам, повторное усреднение силы трения даёт значение 1,28 Н. Среднее значение дисперсии силы трения по шести экспериментам для смазочного материала ТСП-10+4% серпентинит составило 0,0036 Н<sup>2</sup>.

Графики зависимости средней силы трения и среднего диаметра лунки износа в зависимости от концентрации серпентинита в базовом смазочном масле приведены на рисунке 2.11.

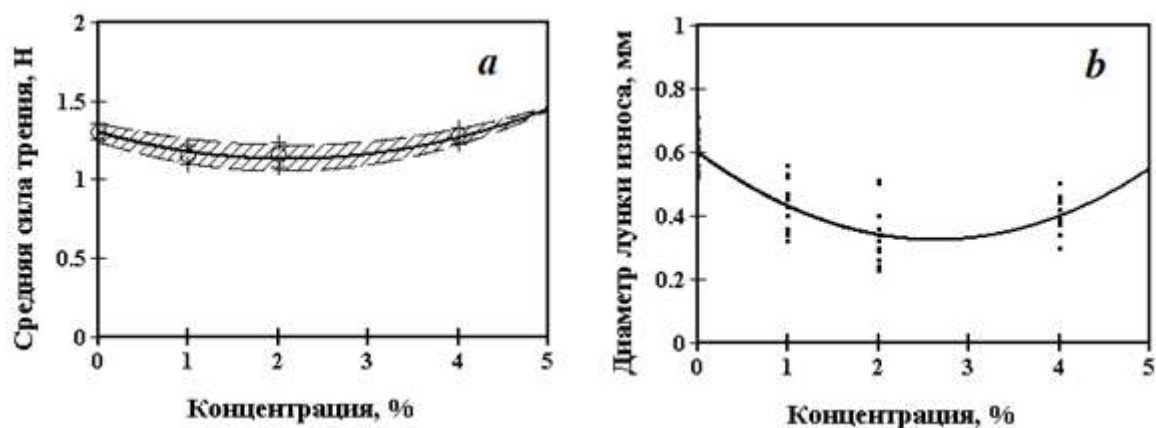


Рисунок 2.11. График зависимости от концентрации серпентинита:

*a* – средней силы трения, *b* – среднего диаметра лунки износа

На рисунке 2.11 *a* пунктирными линиями показаны границы доверительного интервала. Зависимость средней силы трения от концентрации серпентинита имеет следующий вид:

$$F_f(C) = 0.038C^2 - 0.16C + 1.3. \quad (2.3)$$

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%.

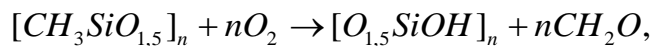
Зависимость среднего диаметра лунки износа от концентрации серпентинита имеет следующий вид:

$$d_w(C) = 0.04C^2 - 0.21C + 0.6. \quad (2.4)$$

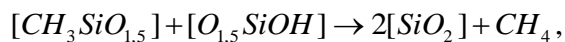
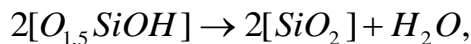
Коэффициент детерминации для (2.4) равен  $R^2 = 0,89$ .

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 550-650<sup>0</sup>С окисляется по схеме [6]:



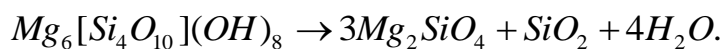
дополнительно имеют место следующие превращения [6]:



а при температуре 800<sup>0</sup>С реализуется реакция [6]:



Серпентин, в интервале температур 400-600<sup>0</sup>С разлагается следующим образом [21]:



Из приведённых уравнений реакций видно, что как в случае серпентина, так и в случае аэрогеля имеет место образование диоксида кремния, образующего противозносные 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. В случае разложения серпентинита образуется также форстерит, действующий на поверхности трения в качестве абразива. Соответственно, как серпентинитом, так и аэрогелем на поверхностях трения инициируются конкурентные процессы защиты и разрушения, зависящие от их концентрации в смазочном слое [141, 142].

## 2.4 Выводы по главе 2

На основании проведённого исследования можно сделать следующие основные выводы:

1. Аэрогель МТМС при его концентрации в смазочном слое около 2,5% способствует снижению силы трения на 33%, что, вероятно, связано как с антифрикционными свойствами самого аэрогеля, так и образованием

стекловидных плёнок, в результате взаимодействия продукта его окисления – диоксида кремния – с поверхностями трения. При концентрации частиц аэрогеля около 2,67% реализуется снижение износа на 35,5%, что связано с образованием защитных плёнок и дискретным экранированием поверхностей трения частицами аэрогеля.

2. Серпентинит при его концентрации в смазочном слое около 2,1% способствует снижению силы трения на 13%, на 20% меньше, чем аэрогель МТМС, что, вероятно, связано как с антифрикционными свойствами серпентинита, так и наличием абразивно воздействующего на поверхности трения продукта его разложения – форстерита. При концентрации серпентинита около 2,63% реализуется снижение износа на 46%, что связано с образованием защитных плёнок и дискретным экранированием поверхностей трения частицами серпентинита.

3. Последующее возрастание силы трения и износа после достижения их минимальных значений, вероятно, связано с увеличением концентрации на фрикционном контакте абразивных продуктов разложения аэрогеля МТМС и серпентинита [143].

### **3 ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НАГРУЗКИ, СКОРОСТИ СКОЛЬЖЕНИЯ И КОНЦЕНТРАЦИИ ДИСПЕРСНЫХ ДОБАВОК НА СКОРОСТЬ ИЗНАШИВАНИЯ И РЕСУРС СОПРЯЖЕНИЙ В ГУСЕНЕЧНОМ ДВИЖИТЕЛЕ ЛЕСНЫХ МАШИН**

#### **3.1 Методика исследования**

Ресурс и долговечность — два взаимосвязанных, но разных термина, используемых преимущественно в технических науках и экономике.

Под ресурсом понимают количественный показатель способности устройства, механизма или материала сохранять работоспособность на протяжении определенного срока эксплуатации. Например, двигатель трактора имеет определенный ресурс пробега в моточасах, после которого потребуются капитального ремонта либо его замена. Таким образом, ресурс определяет предел эксплуатационной возможности изделия. Ресурс измеряется в единицах времени, циклах, пробегах, нагрузках и может характеризовать отдельные компоненты системы (детали) или систему целиком (узел, агрегат или машину). Ограничение определяется износом, поломками, отказами или потерей свойств материалов.

Долговечностью называют временной интервал, в течение которого изделие сохраняет способность функционировать без потери качества характеристик. Это промежуток времени от начала эксплуатации до момента выхода машины или узла (агрегата) из строя или существенного ухудшения его функциональных возможностей. Этот термин больше ориентирован именно на продолжительность функционирования оборудования или конструкции в целом. Долговечность определяется временем непрерывной службы продукта. Чаще всего измеряется годами, месяцами или десятилетиями и включает весь период использования, включая возможные ремонты и замену компонентов.

Таким образом, 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 [143].

В работах [121, 147] подробно бы оценены условия эксплуатации, нагрузки и факторы, влияющие на ресурс подвижных соединений ходовой части тракторов. Наблюдения показали, что в реальных соединениях ось-втулка (ось-подшипник) балансиров тракторов ОТЗ, показатель выносливости в значительной мере ниже, чем показатель износостойкости и проявляется только при критических зазорах в соединениях, не допустимых требованиями эксплуатации. Следовательно, ресурс в данном случае полностью определяется коэффициентом износостойкости и численно равен ему.

Методика расчета сопряжений на долговечность наиболее полно разработана проф. А.С. Прониковым [144]. В качестве исходной физической закономерности (подобно закону Гука в прочности) им принят закон изнашивания, который связывает изнашивание с рядом параметров, включая фактор времени, и относится к материалам двух сопряженных поверхностей.

Согласно данной методике, общий износ соединения будет равен сумме износов двух деталей в паре трения, а направление износа перпендикулярно к поверхности трения. Факторами, определяющими интенсивность изнашивания будут являться скорость скольжения и давление на поверхность трения. Также стоит учитывать переменность указанных факторов, износ может быть неравномерным, а геометрическая форма деталей может изменяться.

По классификации, предложенной проф. А.С. Прониковым [144], трибосопряжения подразделяются на пять групп в зависимости от постоянства условий трения и износа поверхностей в расположенных на одной траектории точках сопряженных поверхностей с учетом коэффициента взаимного перекрытия и реального пути трения [145].

Исходя из предложенной классификации, выбранное для исследования соединение "ось катка - втулка" относится ко второй группе сопряжений, у которых условия изнашивания сохраняются только для точек одного тела, лежащих на данной траектории. Поэтому только одна поверхность имеет условия для равномерного изнашивания в данном сечении.

Смазка исследуемого соединения осуществляется из специальной масленки, находящейся непосредственно закрепленной на балансире трактора. Однако, в производственных условиях работы гусеничного лесного трактора, смазка зачастую заканчивается и соединение работает в условиях граничного трения, иногда с воздействием абразивных частиц (кварцевый песок, почва, минеральные отложения и т.д.) Такого рода взаимодействие усиливает процесс износа деталей соединения, что приводит к увеличению доли отказов (в основном размерный износ) основных узлов шасси гусеничного лесного трактора Онежец-300.

В качестве предмета исследования по известной методике выбрано сопряжение деталей "ось катка - втулка".

В качестве оценочного показателя износостойкости была выбрана скорость изнашивания сопряжения в целом.

Для оценки скорости изнашивания приняты следующие зависимости:

$$I = \frac{U}{N} \text{ или } I_t = \frac{U}{t}, \quad (3.1)$$

где  $U$  - износ сопрягаемых деталей, мм;

$N$  - количество циклов нагружения до наступления периода  
интенсивного изнашивания;

$t$  - время работ установки, час.



В качестве базового варианта для сравнения скорости изнашивания выбраны образцы, изготовленные на Онежском тракторном заводе по заводской технологии.

Стендовые испытания проведены согласно методики проведения испытаний пар трения типа "втулка-вал", изготовленных из различных материалов, с целью определения скорости их изнашивания на экспериментальной установке "Г" (рисунок 3.1.), согласно методике, разработанной на Онежском тракторном заводе:

1. Испытания пар трения производились на основе паспортизации реальных пар трения в условиях эксплуатации.
2. Для проведения испытаний из элементов пар трения собирались комплекты, состоящие из одного валика и четырех втулок.
3. На каждый комплект составлялся паспорт, в который вносились и исходные и окончательные данные, характеризующие испытываемые пары трения.
4. В местах измерений производилась маркировка черным маркером и серией пропилов на торцах втулки.
5. Сопряженные диаметры измерялись после разборки микрометром и нутромером с точностью до 0,001 мм в двух взаимоперпендикулярных плоскостях и в трех точках, в центре и по краям.
6. Зазор в паре определялся исходя из средних значений замеров сопрягаемых деталей [146, 147].

Коробка передач «Машины Г» позволяет работать в режимах 1:1; 10:1; 1:2, что позволяет проводить испытания в широком диапазоне частоты вращения вала. Сила, действующая на подшипник, создаётся грузом на подвеске с использованием системы из рычагов и тяг. Выбранное масло ТСП-10 с помощью насоса закачивается из резервуара в специальную ёмкость, из которой под действием силы тяжести подводится с использованием шланга к узлу трения, из которого стекает сначала в поддон, а затем вновь попадает в

резервуар. Концентрация аэрогеля и серпентинита варьировалась от 0 до 4% по массе.

Для проведения испытаний использован стенд «Машина Г», в котором применялись близкие к реальным условия эксплуатации узла. Так, в данном случае, помимо нагрузки  $P=15\text{кН}$ , 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 установки. Исследовались смазочные композиции на основе масла ТСП-10 с добавлением различных концентраций серпентинита и аэрогеля.

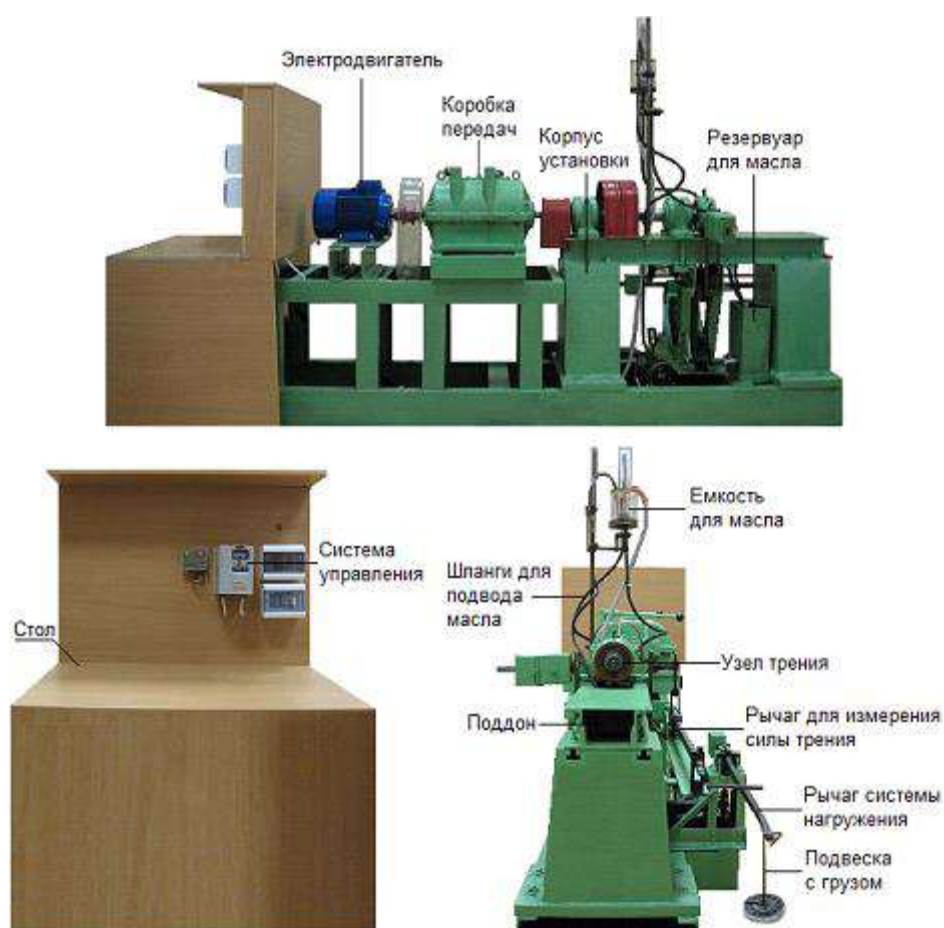


Рисунок 3.1. Установка для проведения стендовых испытаний «Машина Г»

Пары трения испытывались, согласно общепринятой методике [144], 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  $P=5000\text{Н}$ .

Во время испытания проводилась фиксация температуры при помощи термопары и ртутного термометра с ценой деления  $1^{\circ}\text{C}$  и диапазоном измерений  $0-200^{\circ}\text{C}$ , установленного в щекке кронштейна. При проведении испытания через каждые 500 циклов работы стенда производилась остановка стенда для снижения температуры до  $T=25...30^{\circ}\text{C}$  но не менее 20 минут с разгрузкой стенда. Критерием преждевременного окончания испытаний является резкое (за период 500 циклов) поднятие температуры до  $150^{\circ}\text{C}$ , в то время как на период нормального изнашивания, она выдерживается постоянно и составляет для данного вида испытаний,  $T=96...103^{\circ}\text{C}$  [148].

Учитывая тот факт, что исходный комплект деталей не позволяет дать качественной оценки определения износа весовым способом, для определения износа выполнялось микрометрирование деталей. При этом суммарная скорость изнашивания сопряжения определялась по выражению

$$I_t = I_v + I_{вт}, \quad (3.2)$$

где  $I_t$  - суммарная скорость изнашивания сопряжения, мм/час;

$I_v$  - скорость изнашивания вала, мм/час;

$I_{вт}$  - скорость изнашивания втулки, мм/час.



Рисунок 3.2. Образцы для проведения 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.

Граничные условия факторов выбраны с учетом заводских условий испытаний и представлены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 - Факторы и интервалы их варьирования

	Нижний уровень (-1)	Основной уровень (0)	Верхний уровень (+1)	Интервал варьирования	Наименован ие фактора
$x_1$ :	25	50	75	25	Давление, МПа
$x_2$ :	0,005	0,05	0,095	0,045	Скорость м/с
$x_3$ :	0	2	4	2	Концентрац ия, %

В расчете факторного плана значения уровней входных факторов принимаются в кодированном виде, при этом, основной уровень (центр плана) каждого фактора обозначается как «0», а нижний и верхний уровни –

«-1» и «+1» соответственно. Пересчет заданных натуральных значений факторов производится путем линейной интерполяции значений:

$$x_i = \frac{X_i - x_{0i}}{\Delta X_i}, \quad (3.3)$$

где  $x_i$  – значение  $i$ -го фактора в кодированном виде,  $X_i$  – значение  $i$ -го фактора в натуральном виде,  $x_{0i}$  – начальный (нулевой) уровень  $i$ -го фактора,  $\Delta X_i$  – интервал варьирования  $i$ -го фактора.

Соответственно для выбранных факторов имеют место соотношения:

$$x_1 = \frac{p - 50}{25}, x_2 = \frac{v - 0,05}{0,045}, x_3 = \frac{C - 2}{2}, \quad (3.4)$$

где  $p$  – давление,  $v$  – скорость скольжения,  $C$  – концентрация дисперсной добавки.

Для оценки влияния указанных факторов и математического описания процесса изнашивания использовали модель вида:

$$\hat{y} = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2 + b_{33}x_3^2 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3. \quad (3.5)$$

Для получения оценок коэффициентов уравнения (3.5) использовали трёхфакторный план эксперимента Бокса-Дрейпера [148].

Бокс и Дрейпер разработали метод построения насыщенных D-оптимальных планов на кубе. Эти планы состоят из множества точек, указанных в таблице 3.2 [148, 149].

Таблица 3.2. Способ построения насыщенных D-оптимальных планов

Номер множества	Точки множества	Число опытов множества
1	(-1; -1; ... -1)	1
2	(+1; -1; ... -1)	k
3	(λ; λ; -1; ... -1)	k(k-1)/2
4	(μ; +1; ... +1)	k

В границах данной работы использовали план Бокса-Дрейпера для трёхфакторной модели второго порядка (B-D13), схема которого приведена на рисунке 3.3 [147, 148].

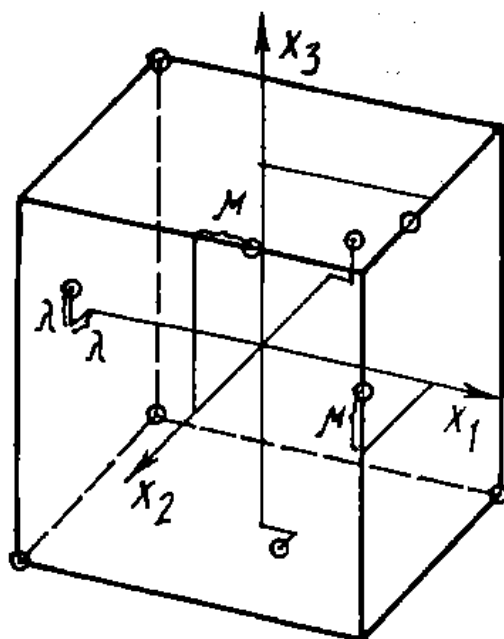


Рисунок 3.3. План Бокса-Дрейпера для трёхфакторной модели второго порядка [143]

Значения параметров  $\lambda$  и  $\mu$  для планов разных размерностей приведены в таблице 3.3 [149].

Таблица 3.3. Значения параметров  $\lambda$  и  $\mu$

k	$\lambda$	$\mu$
2	-0,1315	0,3944
<b>3</b>	<b>0,1925</b>	<b>-0,2912</b>
4	0,4114	-0,6502
5	0,5355	-0,8108
6	0,6183	-0,8854
7	0,6772	-0,4242

В нашем случае  $k=3$ , поэтому  $\lambda \approx 0,19$  и  $\mu \approx -0,29$ .

Матрица планирования трехфакторного эксперимента типа В-D13 приведена ниже в табличном виде (таблица 3.4).

Таблица 3.4. Матрица планирования трехфакторного эксперимента  
типа В-D13

(u)	Матрица планирования X									
	$x_0$	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_1 x_1$	$x_2 x_2$	$x_3 x_3$	$x_1 x_2$	$x_1 x_3$	$x_2 x_3$
1	1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	-1	-1	1	1	1	-1	-1	1
3	1	-1	1	-1	1	1	1	-1	1	-1
4	1	-1	-1	1	1	1	1	1	-1	-1
5	1	-1	0,19	0,19	1	0,0361	0,0361	-0,19	-0,19	0,0361
6	1	0,19	-1	0,19	0,0361	1	0,0361	-0,19	0,0361	-0,19
7	1	0,19	0,19	-1	0,0361	0,0361	1	0,0361	-0,19	-0,19
8	1	-0,29	1	1	0,0841	1	1	-0,29	-0,29	1
9	1	1	-0,29	1	1	0,0841	1	-0,29	1	-0,29
10	1	1	1	-0,29	1	1	0,0841	1	-0,29	-0,29

Вектор-столбец коэффициентов уравнения (3.5) определяется из следующего матричного соотношения [148, 149]:

$$XB = Y, \quad (3.6)$$

где  $X$  — матрица условий эксперимента, то есть план, в который включены все эффекты, указанные в модели

$$X = \begin{pmatrix} 1 & -1 & -1 & -1 & \dots & 1 \\ 1 & 1 & -1 & -1 & \dots & 1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 & \dots & -1 \\ 1 & -1 & -1 & 1 & \dots & -1 \\ 1 & -1 & 0,19 & 0,19 & \dots & 0,036 \\ 1 & 0,19 & -1 & 0,19 & \dots & -0,19 \\ 1 & 0,19 & 0,19 & -1 & \dots & -0,19 \\ 1 & -0,29 & 1 & 1 & \dots & 1 \\ 1 & 1 & -0,29 & 1 & \dots & -0,29 \\ 1 & 1 & 1 & -0,29 & \dots & -0,29 \end{pmatrix},$$

$B$  — матрица неизвестных коэффициентов,



$$\mathbf{B} = \begin{pmatrix} b_0 \\ b_1 \\ b_2 \\ b_3 \\ b_{11} \\ b_{22} \\ b_{33} \\ b_{12} \\ b_{13} \\ b_{23} \end{pmatrix},$$

$\mathbf{Y}$  – матрица средних значений (функции отклика) результатов экспериментов по параллельным опытам

$$\mathbf{Y} = \begin{pmatrix} \bar{y}_1 \\ \bar{y}_2 \\ \bar{y}_3 \\ \bar{y}_4 \\ \bar{y}_5 \\ \bar{y}_6 \\ \bar{y}_7 \\ \bar{y}_8 \\ \bar{y}_9 \\ \bar{y}_{10} \end{pmatrix}.$$

Умножим обе части (3.6) слева на матрицу  $\mathbf{X}^T$ , транспонированную к матрице  $\mathbf{X}$ , в результате получим:

$$(\mathbf{X}^T \mathbf{X}) \mathbf{B} = \mathbf{X}^T \mathbf{Y}. \quad (3.7)$$

Матрица  $\mathbf{X}^T$  в нашем случае имеет вид:

$$\mathbf{X}^T = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & \dots & 1 \\ -1 & 1 & -1 & -1 & \dots & 1 \\ -1 & -1 & 1 & -1 & \dots & 1 \\ -1 & -1 & -1 & 1 & \dots & -0,29 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & \dots & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & \dots & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & \dots & 0,841 \\ 1 & -1 & -1 & 1 & \dots & 1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 & \dots & -0,29 \\ 1 & 1 & -1 & -1 & \dots & -0,29 \end{pmatrix}.$$

Матрица  $\mathbf{X}^T \mathbf{X}$  в нашем случае выглядит следующим образом:

$$\mathbf{X}^T \mathbf{X} = \begin{pmatrix} 10,0 & -0,91 & \dots & 0,08 \\ -0,91 & 7,16 & \dots & 1,02 \\ -0,91 & 0,08 & \dots & -1,05 \\ -0,91 & 0,08 & \dots & -1,05 \\ 7,16 & -1,01 & \dots & -0,47 \\ 7,16 & -1,05 & \dots & 0,49 \\ 7,16 & -1,05 & \dots & 0,49 \\ 0,08 & -1,05 & \dots & -0,47 \\ 0,08 & -1,05 & \dots & -0,47 \\ 0,08 & 1,02 & \dots & 5,24 \end{pmatrix}.$$

Матрица  $\mathbf{X}^T \mathbf{X}$  называется информационной матрицей Фишера (иногда её называют матрицей моментов плана) [147, 148]. Матрица  $(\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1}$  обратная матрице  $\mathbf{X}^T \mathbf{X}$ :

$$(\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1} = \begin{pmatrix} 0,865 & -0,044 & \dots & 0,017 \\ -0,044 & 0,160 & \dots & -0,032 \\ -0,044 & 0,0002 & \dots & 0,032 \\ -0,044 & 0,0002 & \dots & 0,032 \\ -0,362 & 0,001 & \dots & 0,073 \\ -0,362 & 0,040 & \dots & -0,047 \\ -0,362 & 0,040 & \dots & -0,047 \\ 0,017 & 0,032 & \dots & 0,008 \\ 0,017 & 0,032 & \dots & 0,008 \\ 0,017 & -0,032 & \dots & 0,227 \end{pmatrix}.$$

Умножая обе части уравнения (3.7) слева на обратную матрицу  $(\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1}$  получим [147, 148]:

$$(\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1} (\mathbf{X}^T \mathbf{X}) \mathbf{B} = (\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1} (\mathbf{X}^T \mathbf{Y}),$$

но поскольку  $(\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1} (\mathbf{X}^T \mathbf{X}) = \mathbf{E}$  ( $\mathbf{E}$  – единичная матрица), то

$$\mathbf{B} = (\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1} (\mathbf{X}^T \mathbf{Y}). \quad (3.8)$$

Матрицу неизвестных коэффициентов по формуле (3.8) можно найти с использованием различных программных продуктов, в частности посредством программно-алгоритмического средства обработки данных PlanExp B-D13 v.1.0 [150-157].

Как видно из таблицы 3.4 помимо верхнего и нижнего уровней в опытах использовались уровни факторов (при значениях в кодированном виде 0,19 и -0,29 ):

$$\begin{aligned} p &= 0,19 \cdot 25 + 50 = 54,75, \\ p &= -0,29 \cdot 25 + 50 = 42,75, \\ v &= 0,19 \cdot 0,045 + 0,05 = 0,05855, \\ v &= -0,29 \cdot 0,045 + 0,05 = 0,03695, \\ C &= 0,19 \cdot 2 + 2 = 2,38, \\ C &= -0,29 \cdot 2 + 2 = 1,42. \end{aligned} \tag{3.9}$$

С использованием таблицы 3.1 и расчётов (3.9) составили матрицу планирования эксперимента, в соответствии с которой проводилось исследование смазочных композиций с дисперсными добавками.

Согласно плану эксперимента рассчитывается  $N = 10$  опытов по  $r = 3$  параллельных испытания в каждом.

### **3.2 Исследование влияния нагрузки, скорости скольжения и концентрации аэрогеля на скорость изнашивания сопряжений**

В соответствии с исходными данными был разработан план эксперимента по исследованию смазочных композиций с аэрогелем (таблица 3.5).

Таблица 3.5. План эксперимента по исследованию смазочных композиций с аэрогелем и выходные значения скорости изнашивания

Номер опыта ( $u$ )	Матрица планирования			Натуральные значения переменных			Выходной параметр (Скорость изнашивания, мм/час)		
	$x_1$	$x_2$	$x_3$	Давление, МПа	Скорость м/с	Концентрация, %	$y_{u,1}$	$y_{u,2}$	$y_{u,3}$
1	-1	-1	-1	25	0,005	0	0,0091	0,0089	0,0171
2	+1	-1	-1	75	0,005	0	0,02	0,021	0,021
3	-1	+1	-1	25	0,095	0	0,015	0,016	0,017
4	-1	-1	+1	25	0,005	4	0,0057	0,0055	0,0068
5	-1	0,19	0,19	25	0,05855	2,38	0,0047	0,0049	0,006
6	0,19	-1	0,19	54,75	0,005	2,38	0,007	0,0065	0,008
7	0,19	0,19	-1	54,75	0,05855	0	0,012	0,014	0,015
8	-0,29	+1	+1	42,75	0,095	4	0,01	0,009	0,01
9	+1	-0,29	+1	75	0,03695	4	0,019	0,017	0,02
10	+1	+1	-0,29	75	0,095	1,42	0,015	0,017	0,025

Средние значения скорости изнашивания по параллельным опытам определялось из соотношения:

$$\bar{y}_u = \frac{1}{r} \sum_{j=1}^r y_{u,j}, u = 1,2,3, \dots, 10; j = 1,2,3, \quad (3.10)$$

где  $r$  — число параллельных опытов.

Дисперсия параллельных опытов определяется из соотношения:

$$s_u^2 = \frac{1}{r-1} \sum_{j=1}^r (y_{u,j} - y_u)^2. \quad (3.11)$$

Результаты расчётов занесены в таблицу 3.6.

Таблица 3.6. Результаты расчётов по параллельным опытам

Скорость изнашивания, мм/час			Среднее	Дисперсия
$y_{u,1}$	$y_{u,2}$	$y_{u,3}$	$\bar{y}_u$	$S_u^2$
0,0091	0,0089	0,0171	0,0117	0,00002188
0,02	0,021	0,021	0,02066667	0,00000033
0,015	0,016	0,017	0,016	0,00000100
0,0057	0,0055	0,0068	0,006	0,00000049
0,0047	0,0049	0,006	0,0052	0,00000049
0,007	0,0065	0,008	0,00716667	0,00000058
0,012	0,014	0,015	0,01366667	0,00000233
0,01	0,009	0,01	0,00966667	0,00000033
0,019	0,017	0,02	0,01866667	0,00000233
0,015	0,017	0,025	0,019	0,00002800
$\sum S_u^2$				0,00005778
$S_{max}^2$				0,00002800
$G_p$				0,484624704
$S_{\epsilon}^2$				0,0000057777

Для определения возможности проведения регрессионного анализа рассчитали однородности дисперсий параллельных опытов по критерию Кохрена:

$$G_p = \frac{s_{u,max}^2}{\sum_{u=1}^N s_u^2} = 0,4846. \quad (3.12)$$

Расчётное значение критерия сравнивали с табличным из табл. 3.7 для степеней свободы: числителя  $f_1 = r-1=2$ , знаменателя  $f_2 = N = 10$  и соответственно при выборе уровня значимости  $\alpha = 0,01$ :

$$G_{tab} = 0,5359 > G_p = 0,4846.$$

Следовательно, гипотеза об однородности дисперсий параллельных опытов принимается [159].

Таблица 3.7. Критические значения статистики критерия Кохрена уровня 1%

$f_2=N$	$f_1=1$	$f_1=2$	$f_1=3$	$f_1=4$	$f_1=5$	$f_1=6$	$f_1=7$	$f_1=8$	$f_1=9$
2	0,9999	0,9951	0,9794	0,9586	0,9373	0,9172	0,8989	0,8823	0,8674
3	0,9934	0,9423	0,8832	0,8335	0,7934	0,7607	0,7336	0,7108	0,6912
4	0,9676	0,8643	0,7815	0,7213	0,6762	0,6411	0,6129	0,5898	0,5703
5	0,9279	0,7886	0,6958	0,6329	0,5876	0,5531	0,5259	0,5038	0,4854
6	0,8829	0,7218	0,6259	0,5635	0,5196	0,4866	0,4609	0,4401	0,4230
7	0,8377	0,6645	0,5685	0,5080	0,4660	0,4348	0,4106	0,3912	0,3752
8	0,7945	0,6152	0,5210	0,4627	0,4227	0,3932	0,3705	0,3523	0,3374
9	0,7544	0,5728	0,4810	0,4251	0,3871	0,3592	0,3378	0,3208	0,3068
<b>10</b>	0,7175	<b>0,5359</b>	0,4469	0,3934	0,3572	0,3309	0,3106	0,2946	0,2814

Дисперсия воспроизводимости в параллельных опытах равна:

$$s_B^2 = \frac{1}{N} \cdot \sum_{u=1}^N s_u^2 = \frac{1}{N(r-1)} \cdot \sum_{u=1}^N \sum_{j=1}^r (y_{u,j} - \bar{y}_u)^2 = 5,8 \cdot 10^{-6} \frac{\text{мм}^2}{\text{ч}^2}, \quad (3.13)$$

где  $N$  – число независимых опытов.

Далее рассчитали коэффициенты уравнения (3.5) посредством матричного уравнения (3.8). Результаты расчёта приведены в таблице 3.8.

Таблица 3.8. Коэффициенты уравнения математической модели

$b_0$	$b_1$	$b_2$	$b_3$	$b_{11}$	$b_{22}$	$b_{33}$	$b_{12}$	$b_{13}$	$b_{23}$
0,006239	0,005219	0,001556	-0,002019	0,004218	0,001424	0,004088	-0,000345	0,001080	-0,000249

После расчёта всех коэффициентов уравнение (3.5) принимает вид:

$$\hat{y} = 0,006239 + 0,005219x_1 + 0,001556x_2 - 0,002019x_3 + 0,00421x_1^2 + 0,001424x_2^2 + 0,004088x_3^2 - 0,000345x_1x_2 + 0,00108x_1x_3 - 0,00024x_2x_3 \quad (3.14)$$

После получения математической модели проверяются значимость (отличие от нуля) коэффициентов модели и ее адекватность. Проверка коэффициентов на значимость производится с помощью критерия Стьюдента ( $t$ -критерия), который рассчитывается по формуле [152]:

$$t_I = \frac{|b_I|}{s(b_I)}, \quad (3.15)$$

где  $s(b_I)$  – среднеквадратические отклонения в определении коэффициентов уравнения (3.5),  $I$  – индекс при коэффициентах модели.

Среднеквадратическое отклонение в определении коэффициентов функции отклика определяется по формуле [151-160]:

$$s(b_I) = \sqrt{C_I \cdot s_B^2}, \quad (3.16)$$

где  $C_I$  – величины, приведенные для плана В-D13 в таблице 3.9 [152].

Таблица 3.9. Величины  $C_I$  для плана В-D13

$C_0$	$C_1$	$C_2$	$C_3$	$C_{11}$	$C_{22}$	$C_{33}$	$C_{12}$	$C_{13}$	$C_{23}$
0,868	0,159	0,159	0,159	0,594	0,594	0,594	0,226	0,226	0,226

Значения  $s(b_I)$ , а также расчётные значения критерия Стьюдента  $t_I$  приведены в таблице 3.10.

Таблица 3.10. Результаты расчётов критерия Стьюдента

	$b_0$	$b_1$	$b_2$	$b_3$	$b_{11}$	$b_{22}$	$b_{33}$	$b_{12}$	$b_{13}$	$b_{23}$
$ b_I $	0,006	0,005	0,002	0,002	0,004	0,001	0,004	0,000	0,001	0,000
$C_I$	0,868	0,159	0,159	0,159	0,594	0,594	0,594	0,226	0,226	0,226
$s(b_I)$	0,0022	0,0010	0,0010	0,0010	0,0019	0,0019	0,0019	0,0011	0,0011	0,0011
$t_I$	2,679	5,217	2,087	2,087	2,159	0,540	2,159	0,000	0,875	0,000
Значим	1	1	1	1	1	0	1	0	0	0

Критическое значение критерия Стьюдента  $t_{tab}$  выбирали по таблице 3.11 для числа степеней свободы  $N(r-1)=10*2=20$  и принятом уровне значимости равном 0,05, а также рассчитали в программе Microsoft Excel  $t_{tab} = 2,09 \approx 2,08596$ .

Таблица 3.11. Значения критерия Стьюдента  $t_{tab}$  для различных значений доверительной вероятности  $P_S$

$N(r-1)$	Доверительная вероятность $P_S$								
	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	<b>0,95</b>	0,98	0,99	0,999
2	1	1,376	1,963	3,08	6,31	12,71	31,8	63,7	636,6



3	0,816	1,061	1,336	1,886	2,92	4,3	6,96	9,92	31,6
4	0,765	0,978	1,25	1,638	2,35	3,18	4,54	5,84	12,94
5	0,741	0,941	1,19	1,533	2,13	2,77	3,75	4,6	8,61
6	0,727	0,92	1,156	1,476	2,02	2,57	3,36	4,03	6,86
7	0,718	0,906	1,134	1,44	1,943	2,45	3,14	3,71	5,96
8	0,711	0,896	1,119	1,415	1,895	2,36	3	3,5	5,4
9	0,706	0,889	1,108	1,397	1,86	2,31	2,9	3,36	5,04
10	0,703	0,883	1,11	1,383	1,833	2,26	2,82	3,25	4,78
11	0,7	0,879	1,093	1,372	1,812	2,23	2,76	3,17	4,59
12	0,697	0,876	1,088	1,363	1,796	2,2	2,72	3,11	4,49
13	0,695	0,873	1,083	1,356	1,782	2,18	2,68	3,06	4,32
14	0,694	0,87	1,079	1,35	1,771	2,16	2,65	3,01	4,22
15	0,692	0,868	1,076	1,345	1,761	2,14	2,62	2,98	4,14
16	0,691	0,866	1,074	1,341	1,753	2,13	2,6	2,95	4,07
17	0,69	0,865	1,071	1,337	1,746	2,12	2,58	2,92	4,02
18	0,689	0,863	1,069	1,333	1,74	2,11	2,57	2,9	3,96
19	0,688	0,862	1,067	1,33	1,734	2,1	2,55	2,88	3,92
<b>20</b>	0,688	0,861	1,066	1,328	1,729	<b>2,09</b>	2,54	2,86	3,88
$\infty$	0,674	0,842	1,036	1,282	1,645	1,96	2,33	2,58	3,29

В случае соблюдения строгого неравенства  $t_l > t_{tab}$  коэффициент  $b_l$  считается значимым. Все коэффициенты уравнения (3.5), кроме  $b_{22}, b_{12}, b_{13}, b_{23}$  оказались статистически значимыми. После исключения статистически незначимых коэффициентов уравнение регрессии (3.14) принимает вид:

$$\hat{y} = 0,006239 + 0,005219x_1 + 0,001556x_2 - 0,002019x_3 + \quad (3.17) \\ + 0,004218x_1^2 + 0,004088x_3^2.$$

Полученное уравнение (3.17), описывающее взаимосвязь характеристик явления, проверили на адекватность (пригодность). Для этого оценили отклонения предсказываемых расчётных значений  $\hat{y}_u$  от экспериментальных  $\bar{y}_u$  для каждого из опытов осуществлённого эксперимента, что позволяет определить дисперсию адекватности для равного числа параллельных опытов по формуле [148]:

$$s_a^2 = \frac{r}{N - n_s} \cdot \sum_{u=1}^N (\bar{y}_u - \hat{y}_u)^2 = 14,65 \cdot 10^{-6} \frac{\text{мм}^2}{\text{ч}^2}. \quad (3.18)$$

где  $n_s$  – число значимых коэффициентов уравнения. Адекватность уравнения оценивали с помощью  $F$  – критерия (критерия Фишера):

$$F_p = \frac{s_u^2}{s_B^2} = 2,53. \quad (3.19)$$

Табличное значение  $F$  – критерия выбирали по таблице 3.12 для числа степеней свободы  $k_1 = N - n_s = 10 - 6 = 4$  и  $k_2 = N(r - 1) = 20$  и принятом уровне значимости равном 0,05.

Таблица 3.12. Табличные значения  $F$ -критерия Фишера при  $\alpha = 0,05$

$k_2 = N(r-1)$	$k_1 = N - n_s$									
	1	2	3	4	5	6	8	12	24	$\infty$
1	161,45	199,5	215,72	224,57	230,17	233,97	238,89	243,91	249,04	254,32
2	18,51	19	19,16	19,25	19,3	19,33	19,37	19,41	19,45	19,5
3	10,13	9,55	9,28	9,12	9,01	8,94	8,84	8,74	8,64	8,53
4	7,71	6,94	6,59	6,39	6,26	6,16	6,04	5,91	5,77	5,63
5	6,61	5,79	5,41	5,19	5,05	4,95	4,82	4,68	4,53	4,36
6	5,99	5,14	4,76	4,53	4,39	4,28	4,15	4	3,84	3,67
7	5,59	4,74	4,35	4,12	3,97	3,87	3,73	3,57	3,41	3,23
8	5,32	4,46	4,07	3,84	3,69	3,58	3,44	3,28	3,12	2,93
9	5,12	4,26	3,86	3,63	3,48	3,37	3,23	3,07	2,9	2,71
10	4,96	4,1	3,71	3,48	3,33	3,22	3,07	2,91	2,74	2,54
11	4,84	3,98	3,59	3,36	3,2	3,09	2,95	2,79	2,61	2,4
12	4,75	3,88	3,49	3,26	3,11	3	2,85	2,69	2,5	2,3
13	4,67	3,8	3,41	3,18	3,02	2,92	2,77	2,6	2,42	2,21
14	4,6	3,74	3,34	3,11	2,96	2,85	2,7	2,53	2,35	2,13
15	4,54	3,68	3,29	3,06	2,9	2,79	2,64	2,48	2,29	2,07
16	4,49	3,63	3,24	3,01	2,85	2,74	2,59	2,42	2,24	2,01
17	4,45	3,59	3,2	2,96	2,81	2,7	2,55	2,38	2,19	1,96
18	4,41	3,55	3,16	2,93	2,77	2,66	2,51	2,34	2,15	1,92
19	4,38	3,52	3,13	2,9	2,74	2,63	2,48	2,31	2,11	1,88
<b>20</b>	4,35	3,49	3,1	<b>2,87</b>	2,71	2,6	2,45	2,28	2,08	1,84

Расчётное значение  $F$  – критерия сравнили с табличным из табл. 3.12:

$$F_{tab} = 2,87 > F_p = 2,53.$$

Соответственно, по критерию Фишера уравнение математической модели (3.17) является адекватным.

Исследование функции двух переменных, составленной из (3.17) посредством фиксации значения одного из факторов (например,  $x_3$ ), на экстремум проводим по стандартной схеме [158, 159]:

1. Находим частные производные  $\hat{y}(x_1, x_2)$  первого порядка

$$\frac{\partial \hat{y}(x_1, x_2)}{\partial x_1}, \frac{\partial \hat{y}(x_1, x_2)}{\partial x_2}.$$

2. Решаем систему уравнений:

$$\begin{cases} \frac{\partial \hat{y}(x_1, x_2)}{\partial x_1} = 0, \\ \frac{\partial \hat{y}(x_1, x_2)}{\partial x_2} = 0. \end{cases}$$

и таким образом находим критические точки функции.

3. Находим частные производные  $\hat{y}(x_1, x_2)$  второго порядка

$$\frac{\partial^2 \hat{y}(x_1, x_2)}{\partial x_1^2}, \frac{\partial^2 \hat{y}(x_1, x_2)}{\partial x_1 \partial x_2}, \frac{\partial^2 \hat{y}(x_1, x_2)}{\partial x_2^2}.$$

4. Вычисляем значения этих частных производных второго порядка в каждой из найденных в п.2 критических точках  $M(x_{10}; x_{20})$ .

$$A = \left( \frac{\partial^2 \hat{y}(x_1, x_2)}{\partial x_1^2} \right)_M, B = \left( \frac{\partial^2 \hat{y}(x_1, x_2)}{\partial x_1 \partial x_2} \right)_M, C = \left( \frac{\partial^2 \hat{y}(x_1, x_2)}{\partial x_2^2} \right)_M.$$

5. Делается вывод о наличии экстремумов:

- а) если  $AC - B^2 > 0$  и  $A < 0$ , то в точке  $M$  имеется максимум;
- б) если  $AC - B^2 > 0$  и  $A > 0$ , то в точке  $M$  имеется минимум;
- в) если  $AC - B^2 < 0$ , то экстремума нет;
- г) если  $AC - B^2 = 0$ , то вопрос о наличии экстремума остается открытым.

Далее рассматривается графическое представление трёх вариантов математической модели:  $y = f(x_2, x_3)$  при  $x_1 = \text{const}$ ,  $y = f(x_1, x_3)$  при  $x_2 = \text{const}$ . Для визуализации каждого из трех видов уравнений строится диаграмма линий равного уровня (изолиний), представляющая собой проекции трехмерных поверхностей на плоскости. Таким образом, кривая каждой

изолинии строятся в координатах  $(x_2, x_3)$ ,  $(x_1, x_3)$  и  $(x_1, x_2)$ , а ее построение производится по квадратичным функциям  $x_2 = f(x_3)$ ,  $x_1 = f(x_3)$  и  $x_1 = f(x_2)$  соответственно [147].

Диаграмма изолиний математической модели (3.17) при  $x_1 = -1 = \text{const}$  приведена на рисунке 3.4.

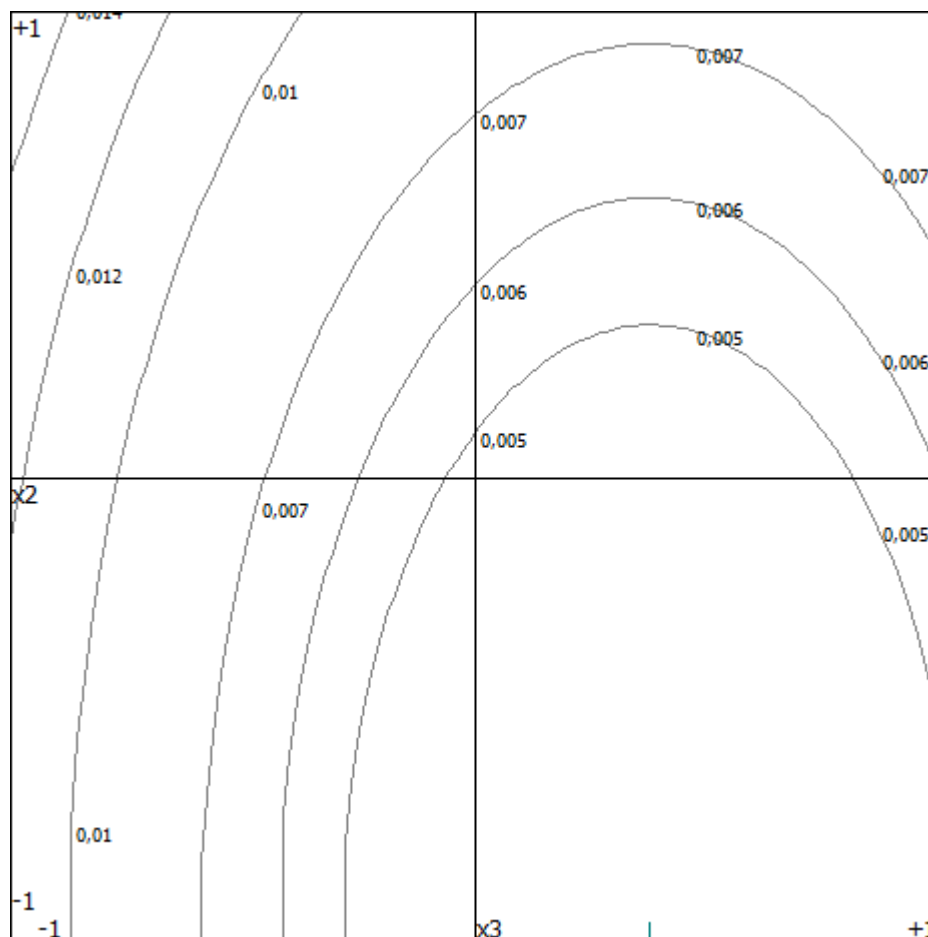


Рисунок 3.4. Диаграмма изолиний математической модели скорости изнашивания при постоянном давлении 25МПа

Преобразованное уравнение математической модели с учетом постоянного фактора:

$$\hat{y} = 0,006239 + 0,005219 \cdot (-1) + 0,001556x_2 - 0,002019x_3 + 0,004218(-1)^2 + 0,004088x_3^2.$$

Предельные значения (экстремум) функции отклика расположены внутри диапазона изменения (варьирования) переменных факторов. Его

численное значение в данном случае  $\hat{y}_{x_1=-1}^{min} = 0,003$ . Экстремуму функции отклика соответствуют значения факторов:  $x_2 = -1$  (0,005м/с) и  $x_3 = 0,375$  ( $\approx 2,5\%$ ) при  $x_1 = -1$  (25МПа).

Диаграмма изолиний математической модели (3.17) при  $x_1 = -0,29 = const$  приведена на рисунке 3.5.

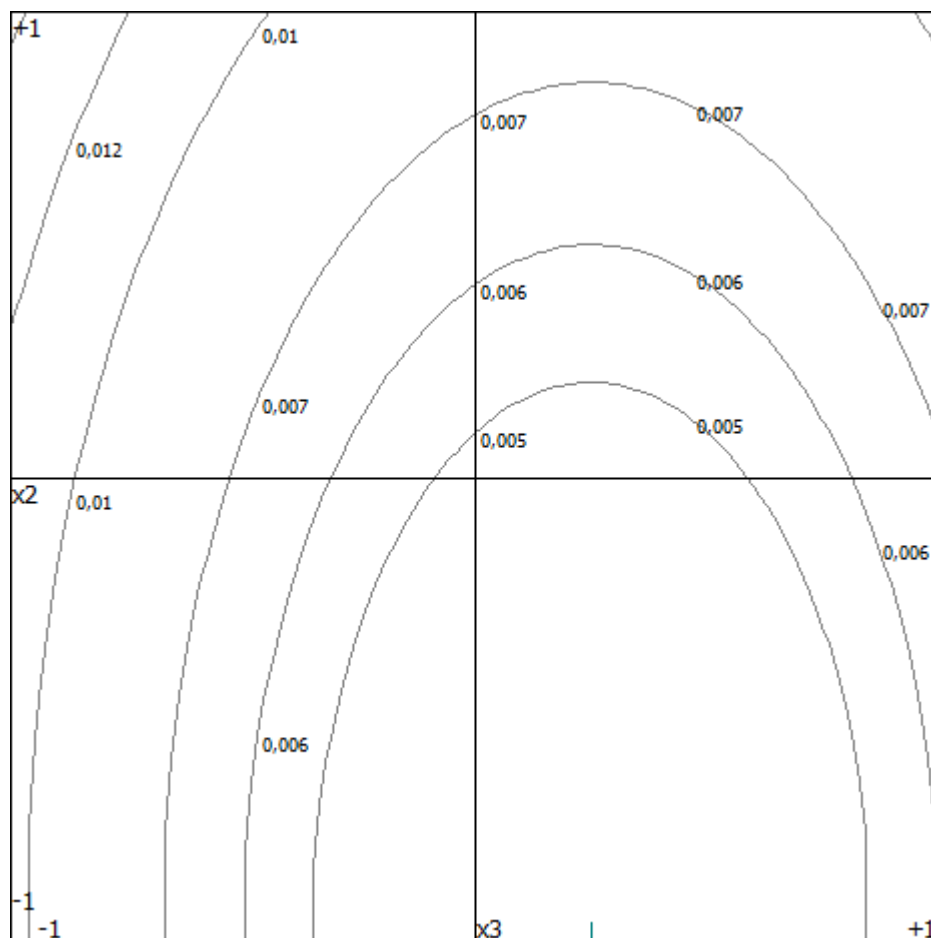


Рисунок 3.5. Диаграмма изолиний математической модели скорости изнашивания при постоянном давлении 42,75 МПа

Преобразованное уравнение математической модели с учетом постоянного фактора:

$$\hat{y} = 0,006239 + 0,005219(-0,29) + 0,001556x_2 - 0,002019x_3 + 0,004218(-0,29)^2 + 0,004088x_3^2.$$

Предельные значения (экстремум) функции отклика расположены внутри диапазона изменения (варьирования) переменных факторов. Его численное значение в данном случае  $\hat{y}_{x_1=-0,29}^{min} = 0,004$ . Экстремуму функции отклика соответствуют значения факторов:  $x_2 = -1$  (0,005м/с) и  $x_3 = 0,25$  (2,5%) при  $x_1 = -0,29$  (42,75 МПа).

Диаграмма изолиний математической модели (3.17) при  $x_1 = 0 = const$  приведена на рисунке 3.6.

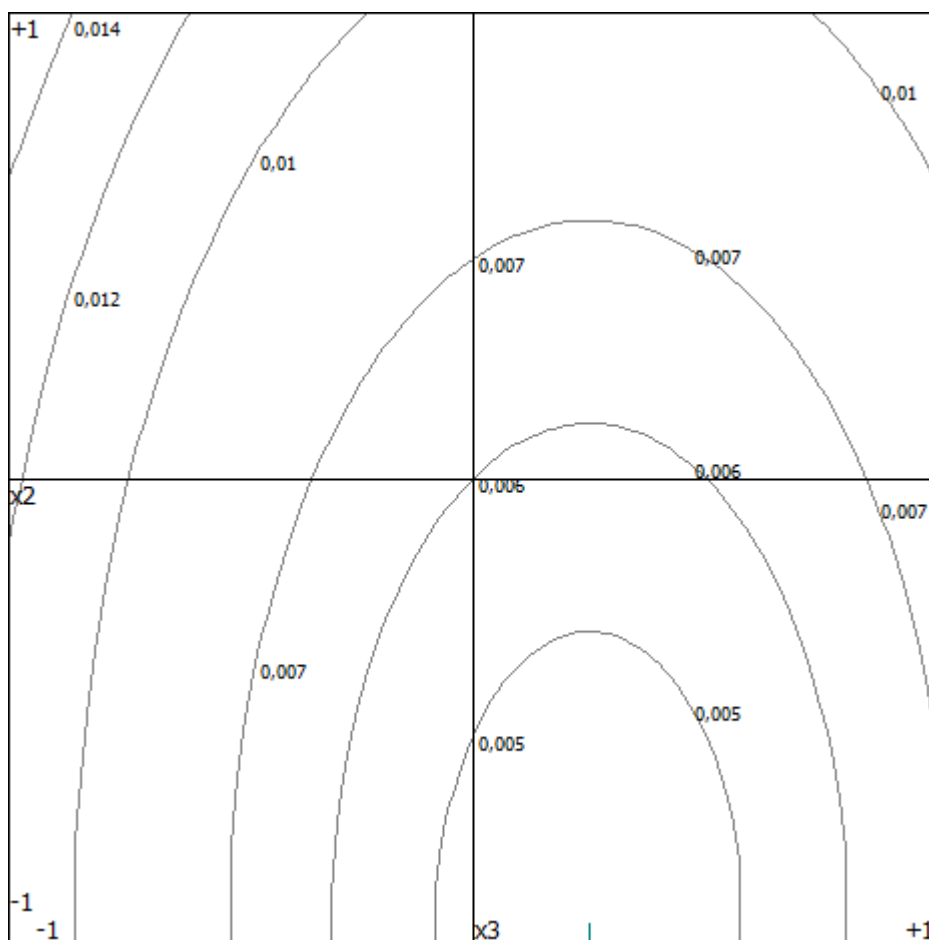


Рисунок 3.6. Диаграмма изолиний математической модели скорости изнашивания при постоянном давлении 50 МПа

Преобразованное уравнение математической модели с учетом постоянного фактора:

$$\hat{y} = 0,006239 + 0,005219 \cdot (0) + 0,001556x_2 - 0,002019x_3 + 0,004218 \cdot (0)^2 + 0,004088x_3^2.$$

Предельные значения (экстремум) функции отклика расположены внутри диапазона изменения (варьирования) переменных факторов. Его численное значение в данном случае  $\hat{y}_{x_1=0}^{min} = 0,005$ . Экстремуму функции отклика соответствуют значения факторов:  $x_2 = -1$  (0,005м/с) и  $x_3 = 0,25$  (2,5%) при  $x_1 = 0$  (50 МПа).

Диаграмма изолиний математической модели (3.17) при  $x_1 = 0,19 = const$  приведена на рисунке 3.7.

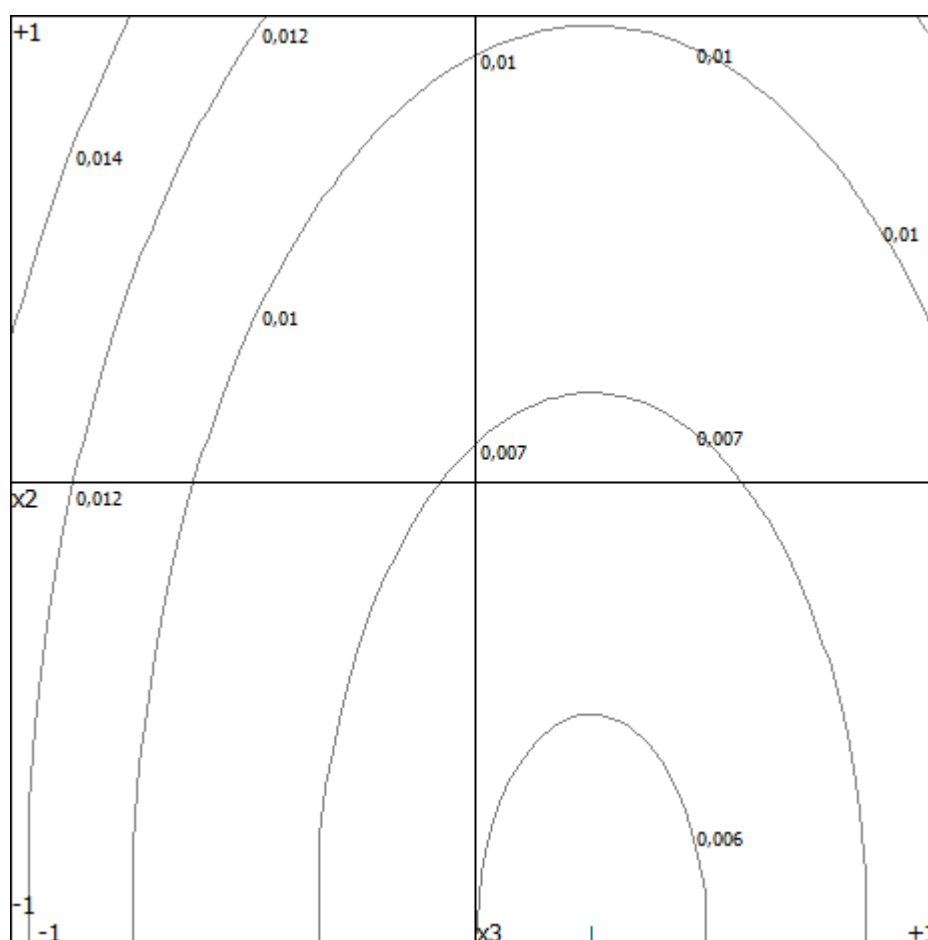


Рисунок 3.7. Диаграмма изолиний математической модели скорости изнашивания при постоянном давлении 54,75 МПа

Преобразованное уравнение математической модели с учетом постоянного фактора:

$$\hat{y} = 0,006239 + 0,005219 \cdot (0,19) + 0,001556x_2 - 0,002019x_3 + 0,004218 \cdot (0,19)^2 + 0,004088x_3^2.$$

Предельные значения (экстремум) функции отклика расположены внутри диапазона изменения (варьирования) переменных факторов. Его численное значение в данном случае  $\hat{y}_{x_1=0,19}^{min} = 0,006$ . Экстремуму функции отклика соответствуют значения факторов:  $x_2 = -1$  (0,005м/с) и  $x_3 = 0,25$  (2,5%) при  $x_1 = 0,19$  (54,75 МПа).

Диаграмма изолиний математической модели (3.17) при  $x_1 = +1 = const$  приведена на рисунке 3.8.

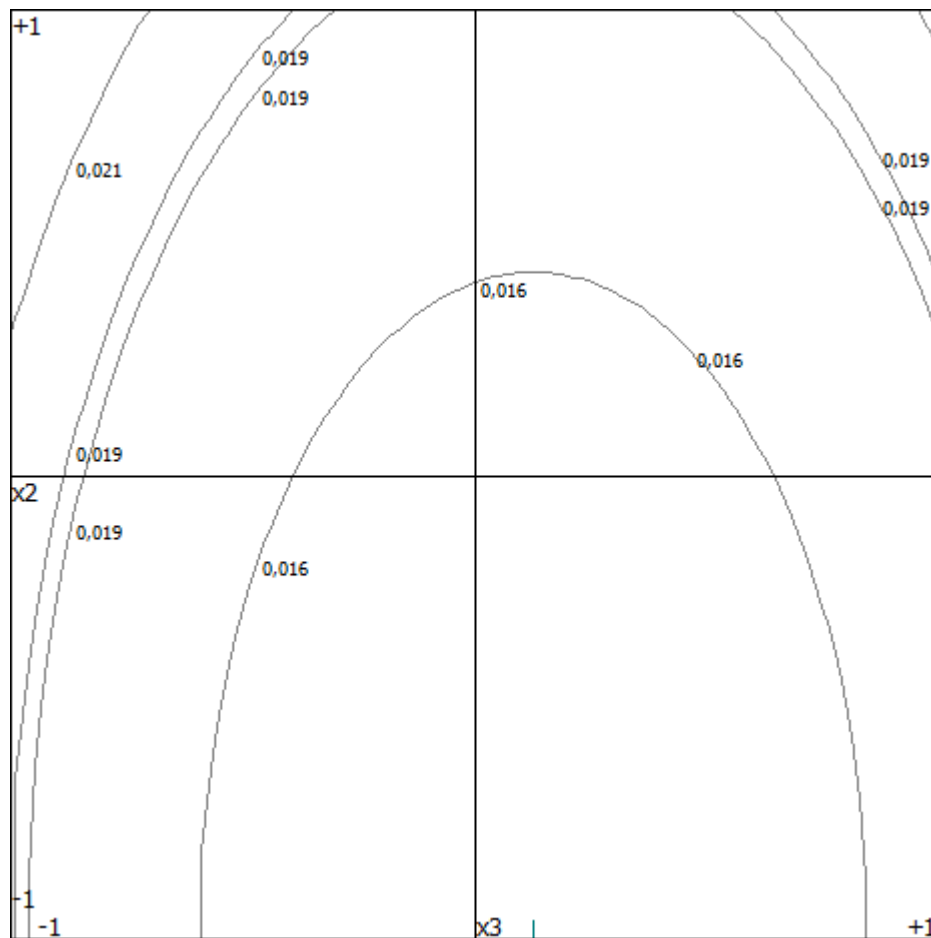


Рисунок 3.8. Диаграмма изолиний математической модели скорости изнашивания при постоянном давлении 75 МПа



Преобразованное уравнение математической модели с учетом постоянного фактора:

$$\hat{y} = 0,006239 + 0,005219 \cdot (1) + 0,001556x_2 - 0,002019x_3 + 0,004218 \cdot (1)^2 + 0,004088x_3^2.$$

Предельные значения (экстремум) функции отклика расположены внутри диапазона изменения (варьирования) переменных факторов. Его численное значение в данном случае  $\hat{y}_{x_1=1}^{min} = 0,014$ . Экстремуму функции отклика соответствуют значения факторов:  $x_2 = -1$  (0,005 м/с) и  $x_3 = 0,125$  ( $\approx 2,5\%$ ) при  $x_1 = 1$  (75 МПа).

Диаграмма изолиний математической модели (3.17) при  $x_2 = -1 = const$  приведена на рисунке 3.9.

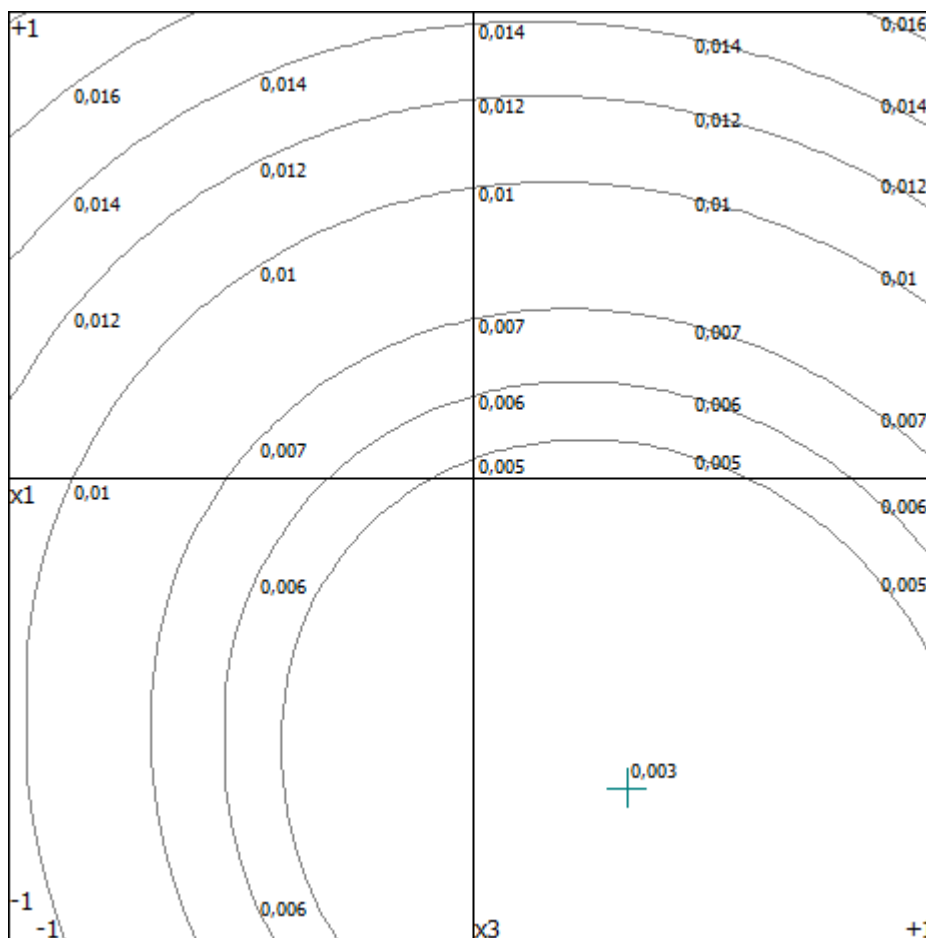


Рисунок 3.9. Диаграмма изолиний математической модели скорости изнашивания при постоянной скорости скольжения 0,005 м/с

Преобразованное уравнение математической модели с учетом постоянного фактора:

$$\hat{y} = 0,006239 + 0,005219x_1 + 0,001556 \cdot (-1) - 0,002019x_3 + 0,004218x_1^2 + 0,004088x_3^2.$$

Предельные значения (экстремум) функции отклика расположены внутри диапазона изменения (варьирования) переменных факторов. Его численное значение в данном случае  $\hat{y}_{x_2=-1}^{min} = 0,003$ . Экстремуму функции отклика соответствуют значения факторов:  $x_1 = -0,667$  (33,325 МПа) и  $x_3 = 0,3$  ( $\approx 2,5\%$ ) при  $x_2 = -1$  (0,005 м/с).

Диаграмма изолиний математической модели (3.17) при  $x_2 = -0,29 = const$  приведена на рисунке 3.10.

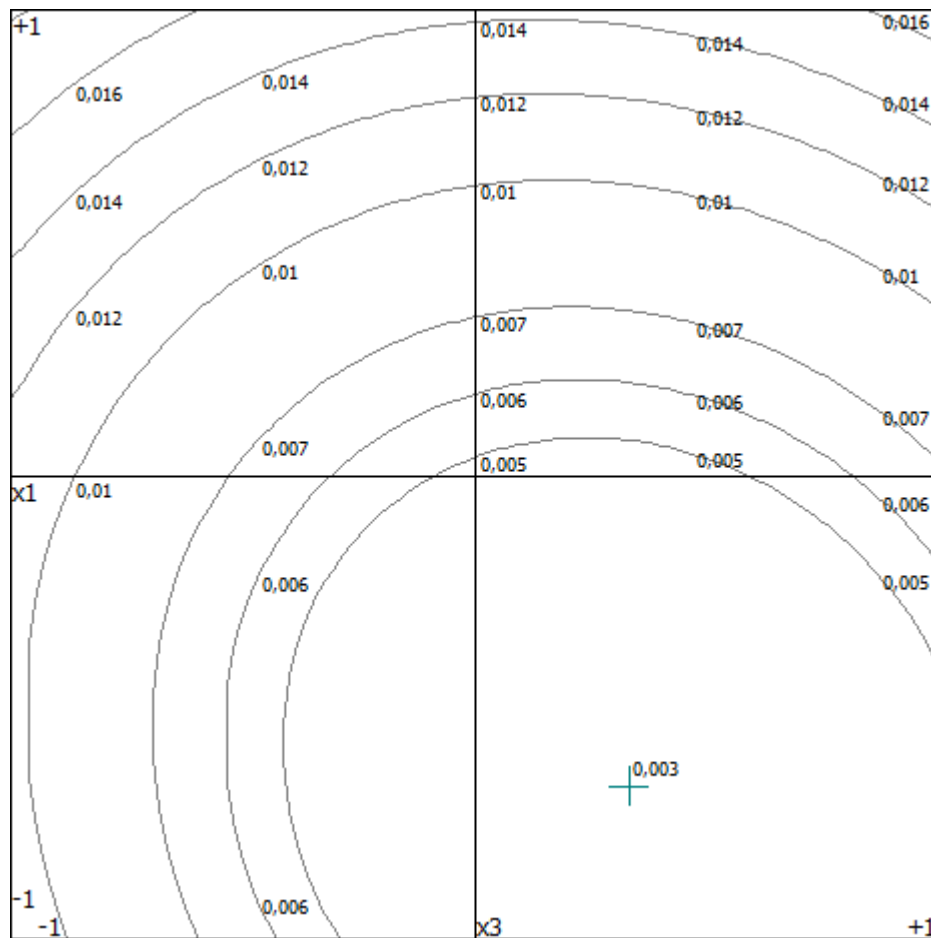


Рисунок 3.10. Диаграмма изолиний математической модели скорости изнашивания при постоянной скорости скольжения 0,03695 м/с

Преобразованное уравнение математической модели с учетом постоянного фактора:

$$\hat{y} = 0,006239 + 0,005219x_1 + 0,001556 \cdot (-0,29) - 0,002019x_3 + 0,004218x_1^2 + 0,004088x_3^2.$$

Предельные значения (экстремум) функции отклика расположены внутри диапазона изменения (варьирования) переменных факторов. Его численное значение в данном случае  $\hat{y}_{x_2=-0,29}^{min} = 0,003$ . Экстремуму функции отклика соответствуют значения факторов:  $x_1 = -0,667$  (33,325 МПа) и  $x_3 = 0,3$  ( $\approx 2,5\%$ ) при  $x_2 = -0,29$  (0,03695 м/с).

Диаграмма изолиний математической модели (3.17) при  $x_2 = 0 = const$  приведена на рисунке 3.11.

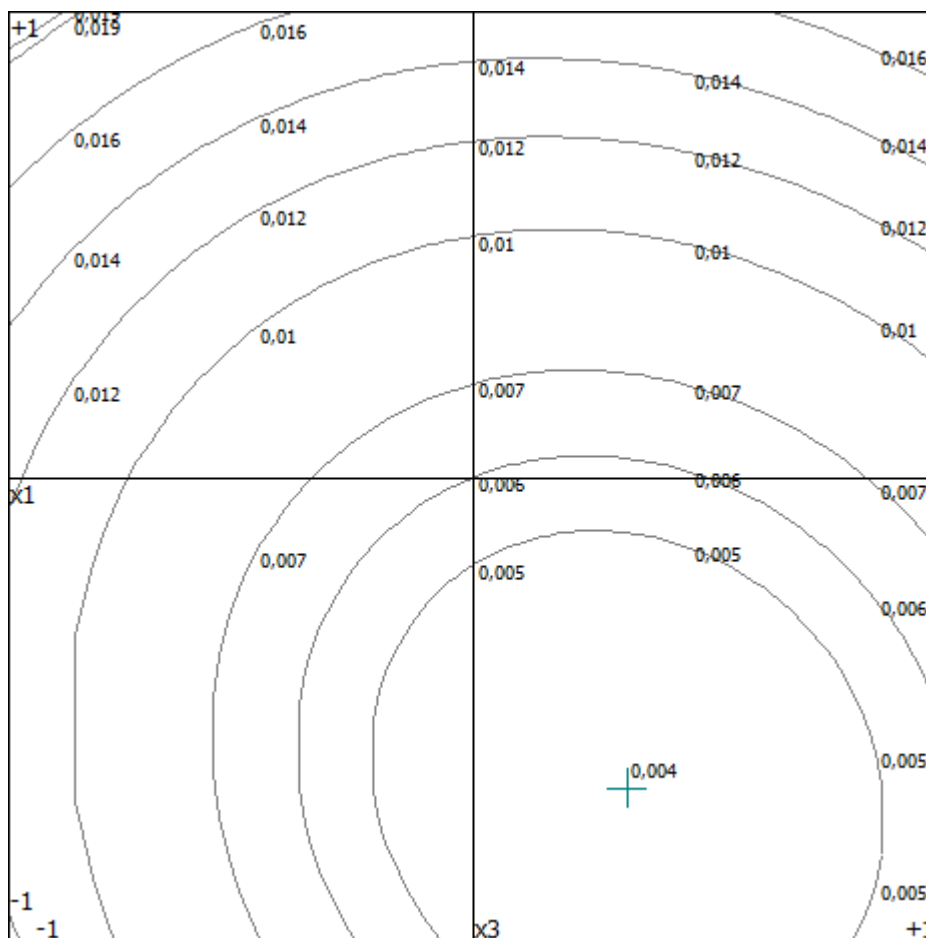


Рисунок 3.11. Диаграмма изолиний математической модели скорости изнашивания при постоянной скорости скольжения 0,05 м/с

Преобразованное уравнение математической модели с учетом постоянного фактора:

$$\hat{y} = 0,006239 + 0,005219x_1 + 0,001556 \cdot (0) - 0,002019x_3 + 0,004218x_1^2 + 0,004088x_3^2.$$

Предельные значения (экстремум) функции отклика расположены внутри диапазона изменения (варьирования) переменных факторов. Его численное значение в данном случае  $\hat{y}_{x_2=0}^{min} = 0,004$ . Экстремуму функции отклика соответствуют значения факторов:  $x_1 = -0,667$  (33,325 МПа) и  $x_3 = 0,3$  ( $\approx 2,5\%$ ) при  $x_2 = 0$  (0,05 м/с).

Диаграмма изолиний математической модели (3.17) при  $x_2 = 0,19 = const$  приведена на рисунке 3.12.

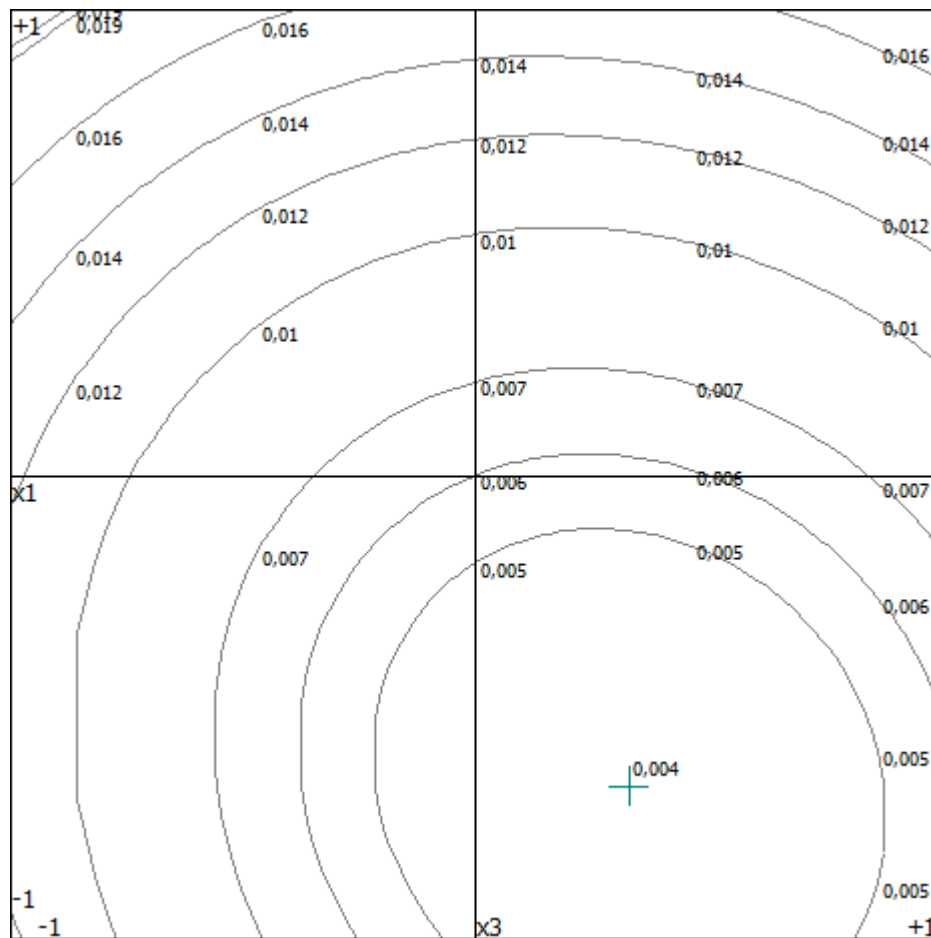


Рисунок 3.12. Диаграмма изолиний математической модели скорости изнашивания при постоянной скорости скольжения 0,05855 м/с

Преобразованное уравнение математической модели с учетом постоянного фактора:

$$\hat{y} = 0,006239 + 0,005219x_1 + 0,001556 \cdot (0,19) - 0,002019x_3 + 0,004218x_1^2 + 0,004088x_3^2.$$

Предельные значения (экстремум) функции отклика расположены внутри диапазона изменения (варьирования) переменных факторов. Его численное значение в данном случае  $\hat{y}_{x_2=0,19}^{min} = 0,004$ . Экстремуму функции отклика 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).

Диаграмма изолиний математической модели (3.17) при  $x_2 = 1 = const$  приведена на рисунке 3.13.

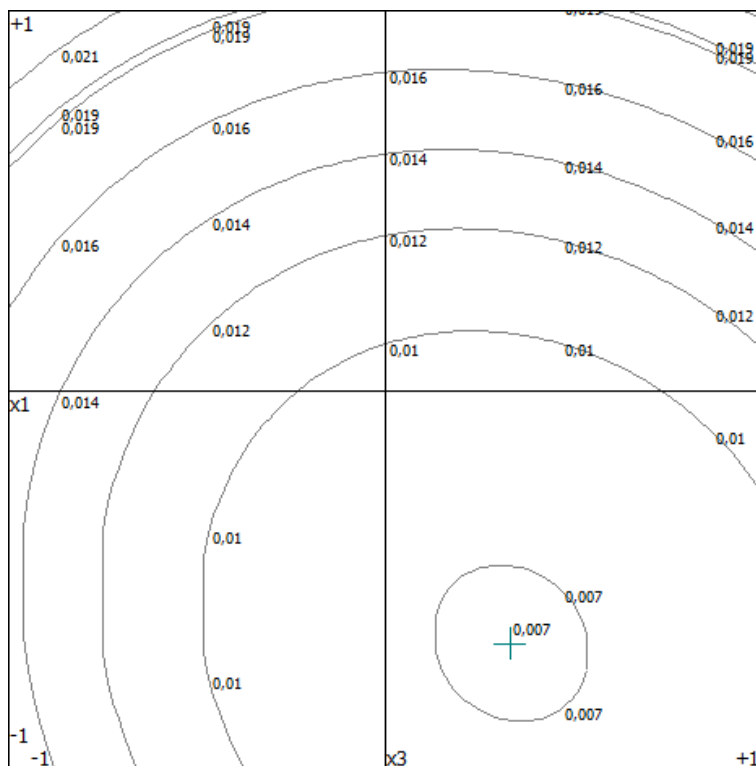


Рисунок 3.13. Диаграмма изолиний математической модели скорости изнашивания при постоянной скорости скольжения 0,095 м/с

Преобразованное уравнение математической модели с учетом постоянного фактора:

$$\hat{y} = 0,006239 + 0,005219x_1 + 0,001556 \cdot (1) - 0,002019x_3 + 0,004218x_1^2 + 0,004088x_3^2.$$

Предельные значения (экстремум) функции отклика расположены внутри диапазона изменения (варьирования) переменных факторов. Его численное значение в данном случае  $\hat{y}_{x_2=1}^{min} = 0,007$ . Экстремуму функции отклика соответствуют значения факторов:  $x_1 = -0,667$  (33,325МПа) и  $x_3=0,3$  ( $\approx 2,5\%$ ) при  $x_2=1$  (0,095 м/с).

Для приведения уравнения (3.17) к виду с натуральными значениями факторов используем формулы кодирования (3.4), подставляя в уравнение (3.17) вместо кодовых натуральные значения факторов.

$$I_t = 0,006239 + 0,005219 \cdot \frac{p - 50}{25} + 0,001556 \cdot \frac{v - 0,05}{0,045} - 0,002019 \cdot \frac{C - 2}{2} + 0,004218 \cdot \left(\frac{p - 50}{25}\right)^2 + 0,004088 \cdot \left(\frac{C - 2}{2}\right)^2. \quad (3.20)$$

Упрощая выражение (3.20), получим следующее уравнение:

$$I_t = 0.0346v + 6.75 \times 10^{-6} p^2 - 4.66 \times 10^{-4} p + 0.00102C^2 - 0.0051C + 0.0171 \quad (3.21)$$

Графики функции (3.21) при различных значениях массовой концентрации аэрогеля в масле 0, 1, 2,5 и 4% приведены на рисунке 3.14.

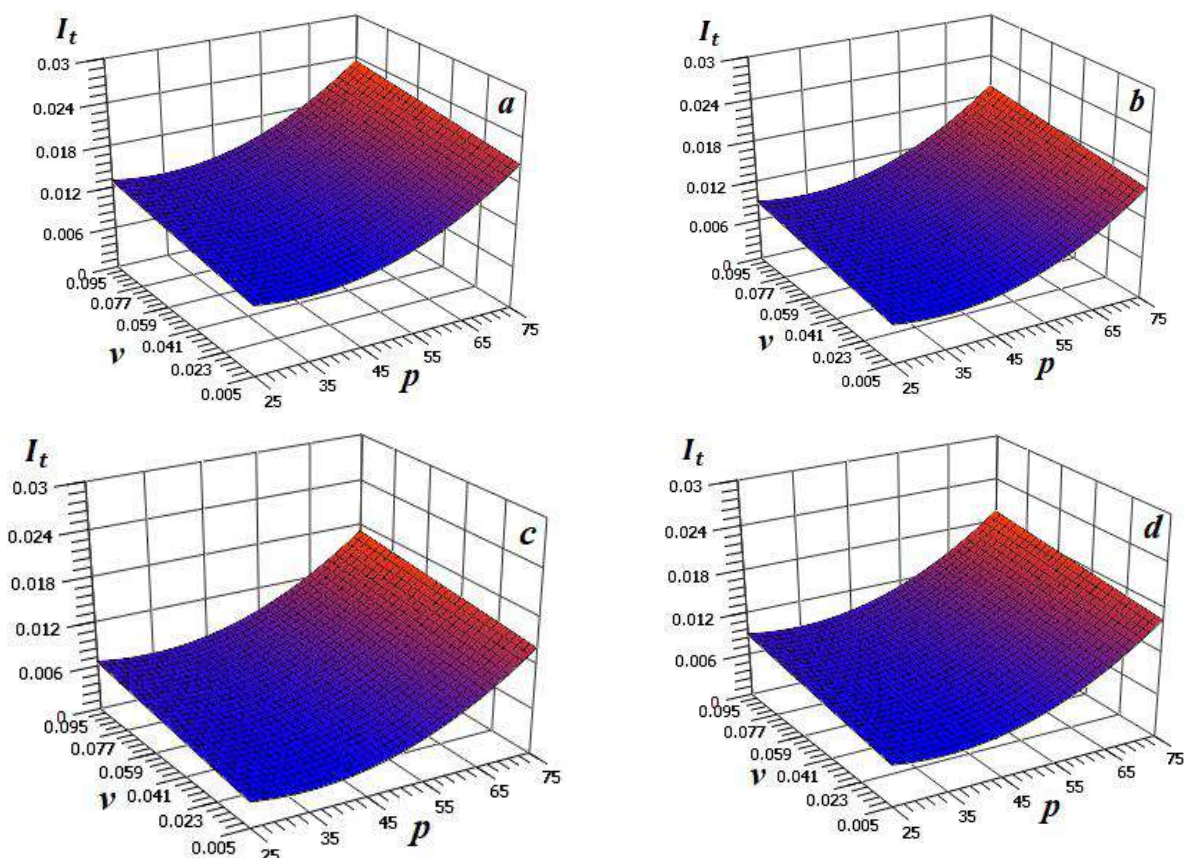


Рисунок 3.14. Графики функции (3.21) при концентрации аэрогеля в масле:

$a - 0\%$ ;  $b - 1\%$ ,  $c - 2,5\%$ ,  $d - 4\%$

Проведённый анализ зависимостей скорости изнашивания от концентрации аэрогеля и номинального давления (рисунки 3.4 – 3.8) показал, что наименьшее из установленных минимальных значений равно:

$$\hat{y}_{x_1=const}^{min} = \min\{0,003; 0,004; 0,005; 0,006; 0,014\} = 0,003 \text{ мм/ч.}$$

Проведённый анализ зависимостей скорости изнашивания от концентрации аэрогеля и скорости скольжения (рисунки 3.9 – 3.13) показал, что наименьшее из минимальных значений равно:

$$\hat{y}_{x_2=const}^{min} = \min\{0,003; 0,003; 0,004; 0,004; 0,007\} = 0,003 \text{ мм/ч.}$$

Соответственно минимальное значение скорости изнашивания принимаем равным 0,003мм/ч.

Далее реализовали дополнительный анализ зависимости скорости изнашивания от концентрации аэрогеля в смазочном слое.

Зависимости скорости изнашивания от концентрации аэрогеля при скорости скольжения 0,005 м/с (рисунки 3.4 – 3.8) и различных значениях номинального давления приведены на рисунке 3.15.

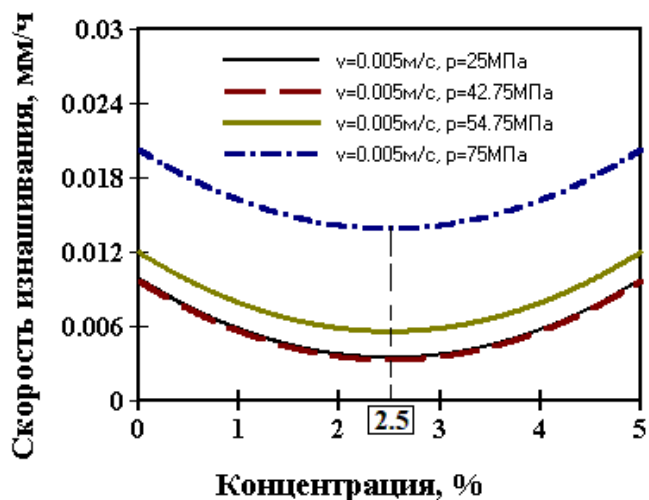


Рисунок 3.15. Зависимости скорости изнашивания от концентрации аэрогеля при скорости скольжения 0,005 м/с и различных значениях номинального давления

Из математического анализа полученных зависимостей при переменном номинальном давлении следует, что оптимальной концентрацией аэрогеля в смазочном слое является  $C=2,5\%$ .

Зависимости скорости изнашивания от концентрации аэрогеля при номинальном давлении 33,325 МПа (рисунки 3.9 – 3.13) и различных значениях скорости скольжения приведены на рисунок 3.16.



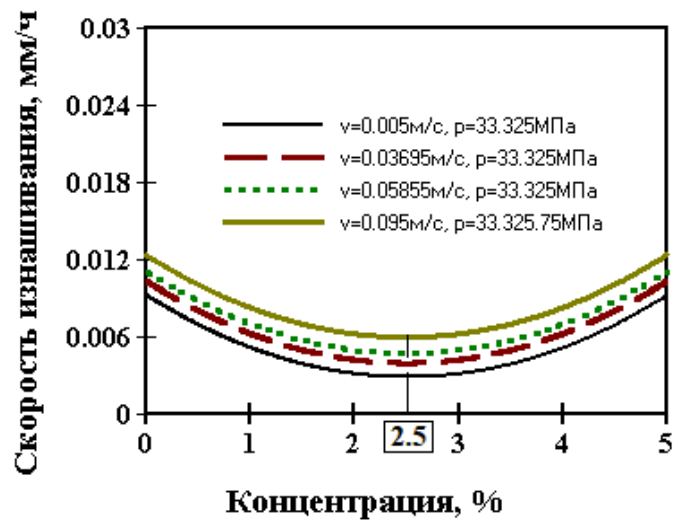


Рисунок 3.16. Зависимости скорости изнашивания от концентрации аэрогеля при номинальном давлении 33,325 МПа и различных значениях скорости скольжения

Из математического анализа полученных зависимостей при переменной скорости скольжения 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:

$$I_{t6} = 0,0234 \frac{\text{мм}}{\text{ч}}. \quad (3.22)$$

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:

$$K_I = \frac{I_{t6}}{I_{t.min}} = \frac{0,0234 \text{ мм/ч}}{0,017 \text{ мм/ч}} \cong 1,4. \quad (3.23)$$

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

### 3.3 Исследование влияния нагрузки, скорости скольжения и концентрации серпентинита на скорость изнашивания сопряжений

В соответствии с исходными данными разработали план эксперимента по исследованию смазочных композиций с серпентинитом (таблица 3.13).

Таблица 3.13. План эксперимента по исследованию смазочных композиций с серпентинитом и выходные значения скорости изнашивания

Номер опыта ( $u$ )	Матрица планирования			Натуральные значения переменных			Выходной параметр (Скорость изнашивания, мм/час)		
	$x_1$	$x_2$	$x_3$	Давление, МПа	Скорость м/с	Концентрация, %	$y_{u,1}$	$y_{u,2}$	$y_{u,3}$
1	-1	-1	-1	25	0,005	0	0,0091	0,0089	0,0171
2	+1	-1	-1	75	0,005	0	0,02	0,021	0,021
3	-1	+1	-1	25	0,095	0	0,015	0,016	0,017
4	-1	-1	+1	25	0,005	4	0,0055	0,0053	0,0066
5	-1	0,19	0,19	25	0,05855	2,38	0,0045	0,0047	0,0058
6	0,19	-1	0,19	54,75	0,005	2,38	0,0068	0,0063	0,0078
7	0,19	0,19	-1	54,75	0,05855	0	0,012	0,014	0,015
8	-0,29	+1	+1	42,75	0,095	4	0,0089	0,009	0,01
9	+1	-0,29	+1	75	0,03695	4	0,018	0,016	0,019
10	+1	+1	-0,29	75	0,095	1,42	0,0145	0,0165	0,0245

Средние значения скорости изнашивания по параллельным опытам определяли из соотношения (3.10).

Дисперсия параллельных опытов определяется из соотношения (3.11).

Результаты расчётов занесены в таблицу 3.14.

Таблица 3.14. Результаты расчётов по параллельным опытам

Скорость изнашивания, мм/час			Среднее	Дисперсия
$y_{u,1}$	$y_{u,2}$	$y_{u,3}$	$\bar{y}_u$	$S_u^2$
0,0091	0,0089	0,0171	0,0117	0,00002188
0,02	0,021	0,021	0,02066667	0,00000033
0,015	0,016	0,017	0,016	0,00000100
0,0055	0,0053	0,0066	0,0058	0,00000049
0,0045	0,0047	0,0058	0,005	0,00000049
0,0068	0,0063	0,0078	0,00696667	0,00000058
0,012	0,014	0,015	0,01366667	0,00000233
0,0089	0,009	0,01	0,0093	0,00000037
0,018	0,016	0,019	0,01766667	0,00000233
0,0145	0,0165	0,0245	0,0185	0,00002800
$\sum S_u^2$				0,00005781
$S_{max}^2$				0,00002800
$G_p$				0,484317343
$S_{\sigma}^2$				0,0000057813

Для определения возможности проведения регрессионного анализа рассчитали однородности дисперсий параллельных опытов по критерию Кохрена:

$$G_p = \frac{s_{u,max}^2}{\sum_{u=1}^N s_u^2} = 0,4843. \quad (3.24)$$

Расчётное значение критерия сравнивали с табличным из табл. 3.7 для степеней свободы: числителя  $f_1 = r-1=2$ , знаменателя  $f_2 = N = 10$  и соответственно при выборе уровня значимости  $\alpha = 0,01$ :

$$G_{tab} = 0,5359 > G_p = 0,4843.$$

Следовательно, гипотеза об однородности дисперсий параллельных опытов принимается.

Дисперсия воспроизводимости в параллельных опытах равна:

$$s_B^2 = \frac{1}{N} \cdot \sum_{u=1}^N s_u^2 = \frac{1}{N(r-1)} \cdot \sum_{u=1}^N \sum_{j=1}^r (y_{u,j} - \bar{y}_u)^2 = 5,78 \cdot 10^{-6} \frac{\text{мм}^2}{\text{ч}^2}. \quad (3.25)$$

Далее рассчитали коэффициенты уравнения (3.5) посредством матричного уравнения (3.8). Результаты расчёта приведены в таблице 3.15.

Таблица 3.15. Коэффициенты уравнения математической модели

$b_0$	$b_1$	$b_2$	$b_3$	$b_{11}$	$b_{22}$	$b_{33}$	$b_{12}$	$b_{13}$	$b_{23}$
0,005998	0,005007	0,001505	-0,002284	0,004064	0,001507	0,004087	-0,000394	0,000917	-0,000251

После расчёта всех коэффициентов уравнение (3.5) принимает вид:

$$\hat{y} = 0,005998 + 0,005007x_1 + 0,001505x_2 - 0,002284x_3 + 0,004064x_1^2 + 0,001507x_2^2 + 0,004087x_3^2 - 0,000394x_1x_2 + 0,000917x_1x_3 - 0,000251x_2x_3. \quad (3.26)$$

После получения математической модели проверяются значимость (отличие от нуля) коэффициентов модели и ее адекватность. Проверка коэффициентов на значимость производится с помощью критерия Стьюдента ( $t$ -критерия), который рассчитывается по формуле (3.15).

Среднеквадратическое отклонение в определении коэффициентов функции отклика определяется по формуле (3.16).

Значения  $s(b_I)$ , а также расчётные значения критерия Стьюдента  $t_I$  приведены в таблице 3.16 [147].

Таблица 3.16. Результаты расчётов критерия Стьюдента

	$b_0$	$b_1$	$b_2$	$b_3$	$b_{11}$	$b_{22}$	$b_{33}$	$b_{12}$	$b_{13}$	$b_{23}$
$ b_I $	0,00600	0,00501	0,00151	0,00228	0,00406	0,00151	0,00409	0,00039	0,00092	0,00025
$C_I$	0,868	0,159	0,159	0,159	0,594	0,594	0,594	0,226	0,226	0,226
$s(b_I)$	0,0022	0,0010	0,0010	0,0010	0,0019	0,0019	0,0019	0,0011	0,0011	0,0011
$t_I$	2,678	5,215	2,086	2,086	2,159	1,079	2,159	0,000	0,875	0,000
Значим	1	1	1	1	1	0	1	0	0	0

Критическое значение критерия Стьюдента  $t_{tab}$  выбирали по таблице 3.11 для числа степеней свободы  $N(r-1)=10*2=20$  и принятом уровне значимости равном 0,05, а также рассчитали в программе Microsoft Excel  $t_{tab} = 2,09 \approx 2,08596$ .

В случае соблюдения строгого неравенства  $t_I > t_{tab}$  коэффициент  $b_I$  считается значимым. Все коэффициенты уравнения (3.5), кроме  $b_{22}, b_{12}, b_{13}, b_{23}$  оказались статистически значимыми. После исключения статистически незначимых коэффициентов уравнение регрессии (3.26) принимает вид:

$$\hat{y} = 0,005998 + 0,005007x_1 + 0,001505x_2 - 0,002284x_3 + 0,004064x_1^2 + 0,004087x_3^2. \quad (3.27)$$

Полученное уравнение (3.27), описывающее взаимосвязь характеристик явления, проверили на адекватность (пригодность). Для этого оценили отклонения предсказываемых расчётных значений  $\hat{y}_u$  от экспериментальных  $\bar{y}_u$  для каждого из опытов осуществлённого эксперимента, что позволяет определить дисперсию адекватности для равного числа параллельных опытов по формуле [155]:

$$s_a^2 = \frac{r}{N - n_s} \cdot \sum_{u=1}^N (\bar{y}_u - \hat{y}_u)^2 = 14,76 \cdot 10^{-6} \frac{\text{мм}^2}{\text{ч}^2}. \quad (3.28)$$

Адекватность уравнения оценивали с помощью  $F$  – критерия:

$$F_p = \frac{s_u^2}{s_B^2} = 2,55. \quad (3.29)$$

Табличное значение  $F$  – критерия выбирали по таблице 3.12 для числа степеней свободы  $k_1 = N - n_s = 10 - 6 = 4$  и  $k_2 = N(r - 1) = 20$  и принятом уровне значимости равном 0,05. Расчётное значение  $F$  – критерия сравнили с табличным из таблицы 3.12:

$$F_{tab} = 2,87 > F_p = 2,55.$$

Соответственно, по критерию Фишера уравнение математической модели (3.27) является адекватным [157]. Далее рассматривается графическое

представление трёх вариантов математической модели [147]:  $y = f(x_2, x_3)$  при  $x_1 = \text{const}$ ,  $y = f(x_1, x_3)$  при  $x_2 = \text{const}$ .

Диаграмма изолиний математической модели (3.27) при  $x_1 = -1 = \text{const}$  приведена на рисунке 3.17.

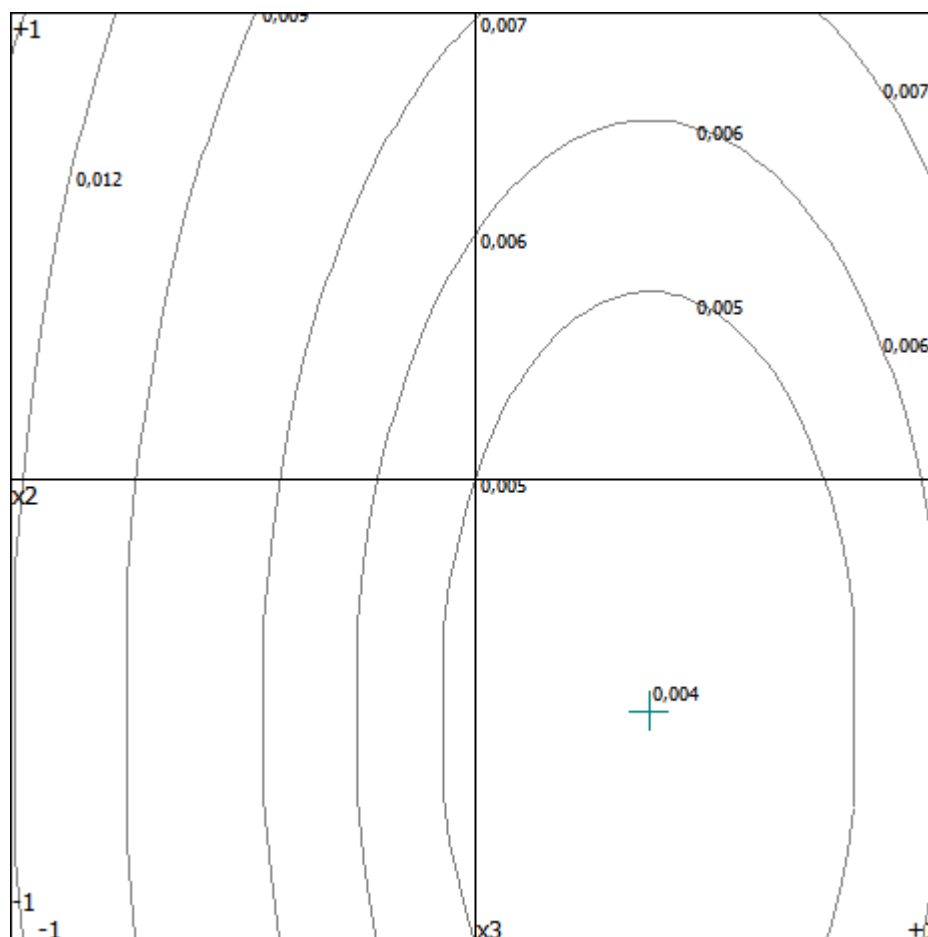


Рисунок 3.17. Диаграмма изолиний математической модели скорости изнашивания при постоянном давлении 25МПа

Преобразованное уравнение математической модели с учетом постоянного фактора:

$$\hat{y} = 0,005998 + 0,005007(-1) + 0,001505x_2 - 0,002284x_3 + 0,004064(-1)^2 + 0,004087x_3^2.$$

Предельные значения (экстремум) функции отклика расположены внутри диапазона изменения (варьирования) переменных факторов. Его численное значение в данном случае  $\hat{y}_{x_1=-1}^{\min} = 0,004$ . Экстремуму функции

отклика соответствуют значения факторов:  $x_2 = -0,5$  (0,028м/с) и  $x_3 = 0,375$  (2,75%) при  $x_1 = -1$  (25МПа).

Диаграмма изолиний математической модели (3.27) при  $x_1 = -0,29 = const$  приведена на рисунке 3.18.

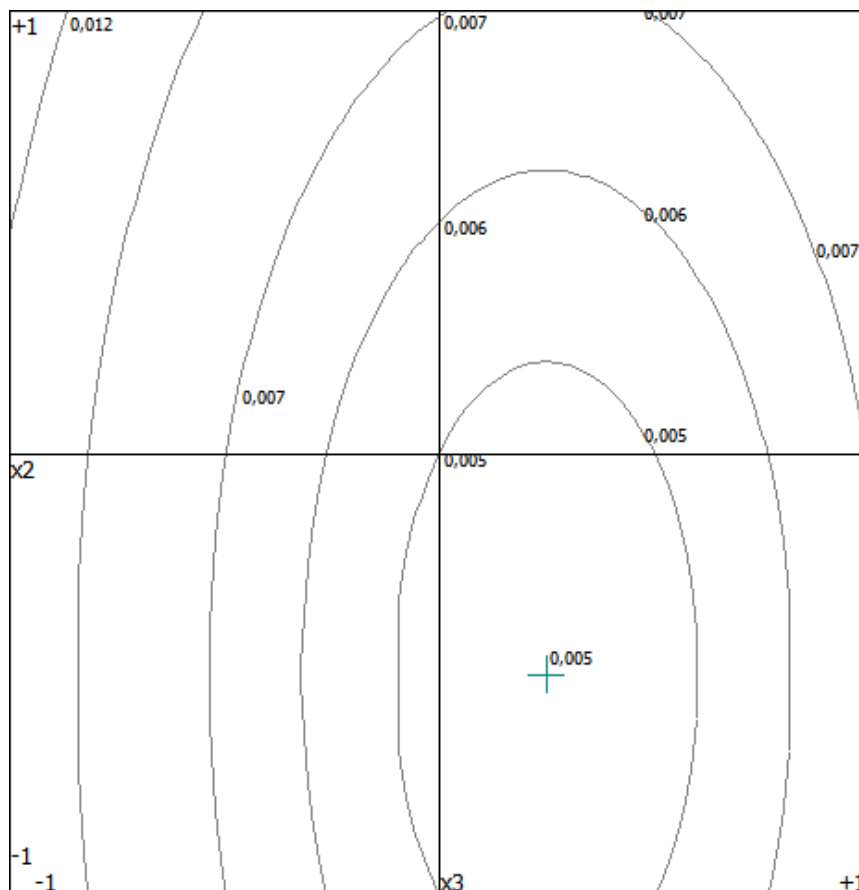


Рисунок 3.18. Диаграмма изолиний математической модели скорости изнашивания при постоянном давлении 42,75МПа

Преобразованное уравнение математической модели с учетом постоянного фактора:

$$\hat{y} = 0,005998 + 0,005007(-0,29) + 0,001505x_2 - 0,002284x_3 + 0,004064(-0,29)^2 + 0,004087x_3^2.$$

Предельные значения (экстремум) функции отклика расположены внутри диапазона изменения (варьирования) переменных факторов. Его численное значение в данном случае  $\hat{y}_{x_1=-0,29}^{min} = 0,005$ . Экстремуму функции

отклика соответствуют значения факторов:  $x_2 = -0,5$  (0,028 м/с) и  $x_3 = 0,25$  (2,5%) при  $x_1 = -0,29$  (42,75 МПа).

Диаграмма изолиний математической модели (3.27) при  $x_1 = 0 = const$  приведена на рисунке 3.19.

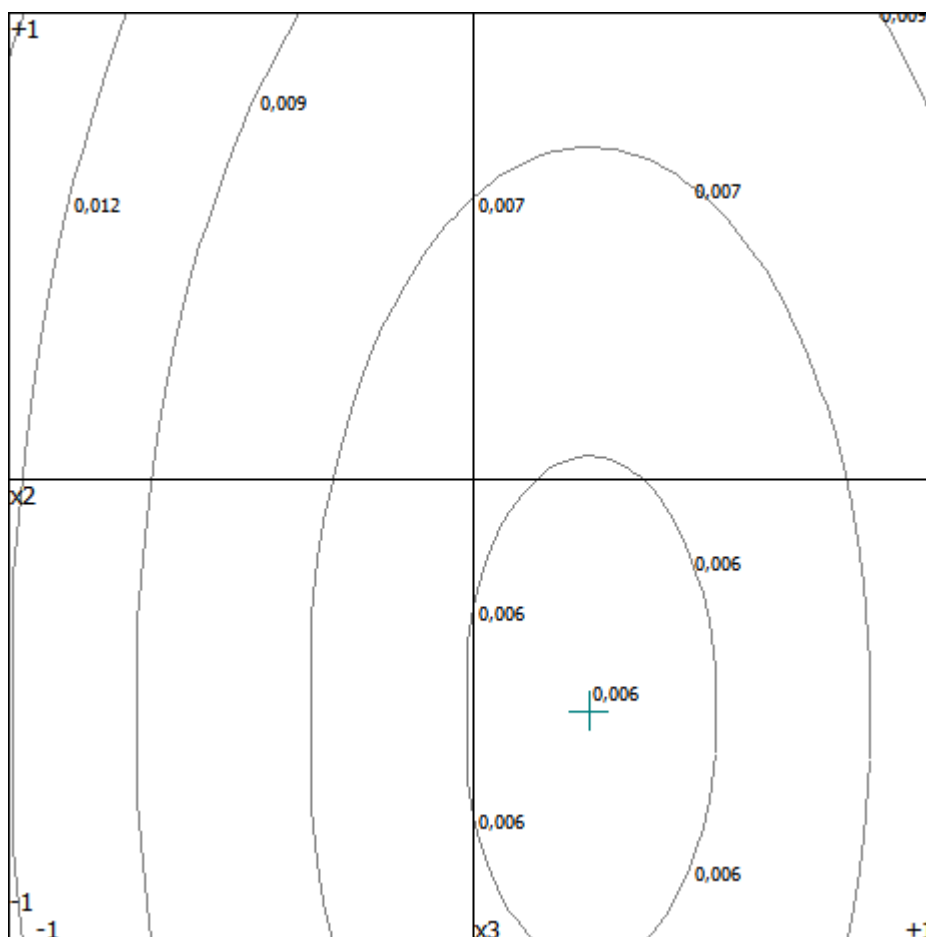


Рисунок 3.19. Диаграмма изолиний математической модели скорости изнашивания при постоянном давлении 50 МПа

Преобразованное уравнение математической модели с учетом постоянного фактора:

$$\hat{y} = 0,005998 + 0,005007(0) + 0,001505x_2 - 0,002284x_3 + 0,004064(0)^2 + 0,004087x_3^2.$$

Предельные значения (экстремум) функции отклика расположены внутри диапазона изменения (варьирования) переменных факторов. Его численное значение в данном случае  $\hat{y}_{x_1=0}^{min} = 0,006$ . Экстремуму функции



отклика соответствуют значения факторов:  $x_2 = -0,5$  (0,028 м/с) и  $x_3 = 0,25$  (2,5%) при  $x_1 = 0$  (50 МПа).

Диаграмма изолиний математической модели (3.27) при  $x_1 = 0,19 = const$  приведена на рисунке 3.20.

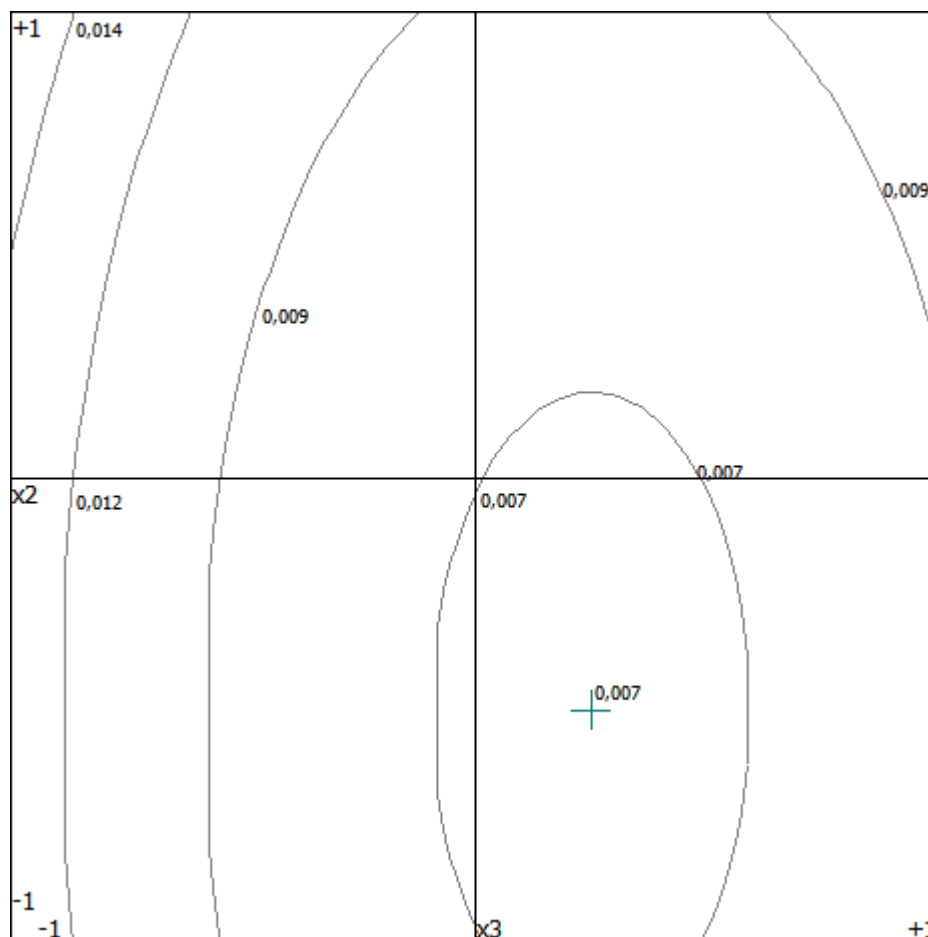


Рисунок 3.20. Диаграмма изолиний математической модели скорости изнашивания при постоянном давлении 54,75 МПа

Преобразованное уравнение математической модели с учетом постоянного фактора:

$$\hat{y} = 0,005998 + 0,005007(0,19) + 0,001505x_2 - 0,002284x_3 + 0,004064(0,19)^2 + 0,004087x_3^2.$$

Предельные значения (экстремум) функции отклика расположены внутри диапазона изменения (варьирования) переменных факторов. Его

численное значение в данном случае  $\hat{y}_{x_1=0,19}^{min} = 0,007$ . Экстремуму функции отклика соответствуют значения факторов:  $x_2 = -0,5$  (0,028 м/с) и  $x_3 = 0,25$  (2,5%) при  $x_1 = 0,19$  (54,75 МПа).

Диаграмма изолиний математической модели (3.27) при  $x_1 = 1 = const$  приведена на рисунке 3.21.

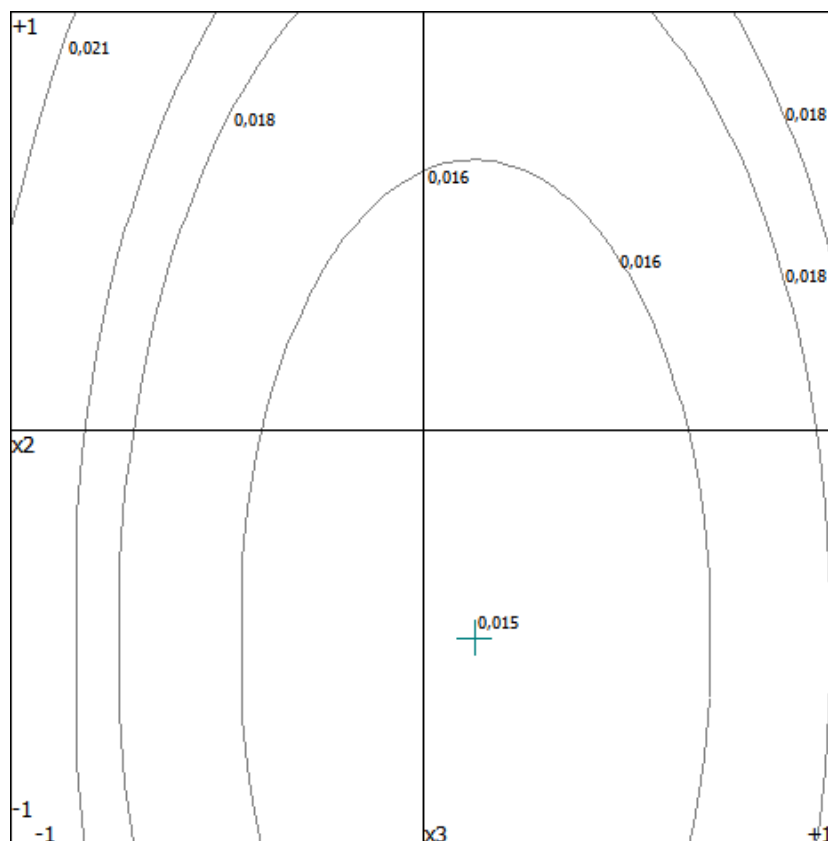


Рисунок 3.21. Диаграмма изолиний математической модели скорости изнашивания при постоянном давлении 75 МПа

Преобразованное уравнение математической модели с учетом постоянного фактора:

$$\hat{y} = 0,005998 + 0,005007(1) + 0,001505x_2 - 0,002284x_3 + 0,004064(1)^2 + 0,004087x_3^2.$$

Предельные значения (экстремум) функции отклика расположены внутри диапазона изменения (варьирования) переменных факторов. Его численное значение в данном случае  $\hat{y}_{x_1=1}^{min} = 0,015$ . Экстремуму функции

отклика соответствуют значения факторов:  $x_2 = -0,5$  (0,028м/с) и  $x_3 = 0,125$  (2,25%) при  $x_1 = 1$  (75 МПа).

Диаграмма изолиний математической модели (3.27) при  $x_2 = -1 = const$  приведена на рисунке 3.22.

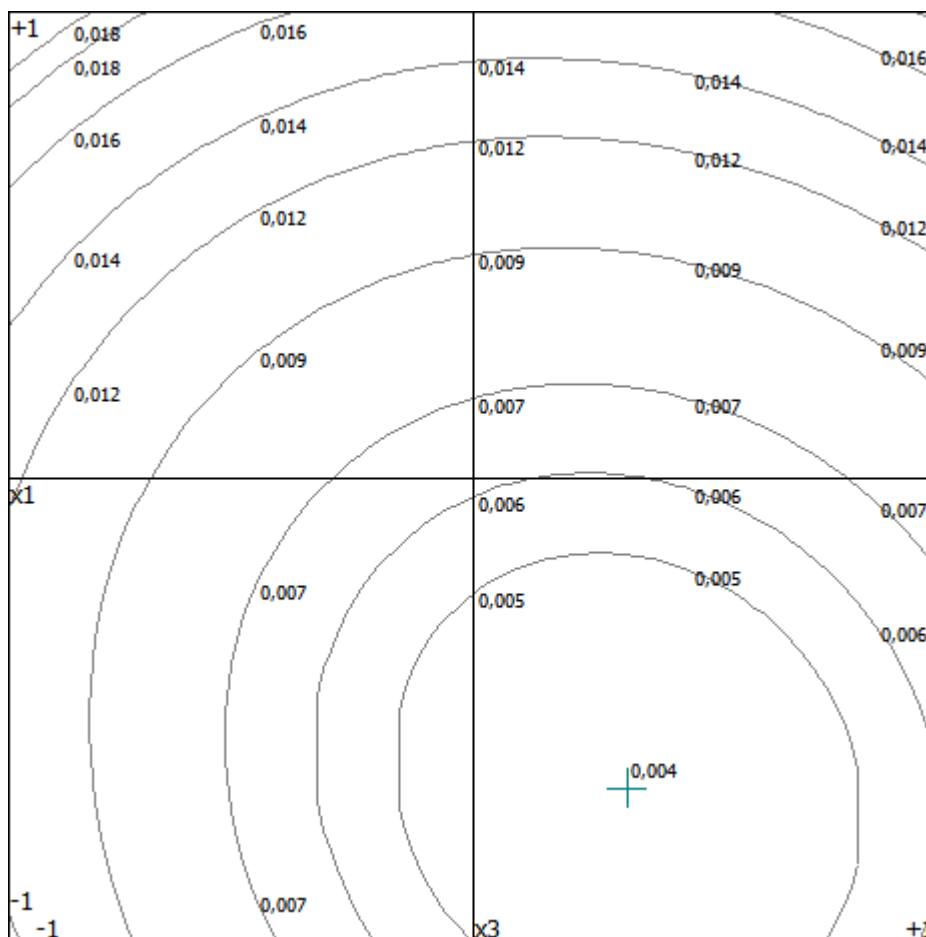


Рисунок 3.22. Диаграмма изолиний математической модели скорости изнашивания при постоянной скорости скольжения 0,005 м/с

Преобразованное уравнение математической модели с учетом постоянного фактора:

$$\hat{y} = 0,005998 + 0,005007x_1 + 0,001505(-1) - 0,002284x_3 + 0,004064x_1^2 + 0,004087x_3^2.$$

Предельные значения (экстремум) функции отклика расположены внутри диапазона изменения (варьирования) переменных факторов. Его

численное значение в данном случае  $\hat{y}_{x_2=-1}^{min} = 0,004$ . Экстремуму функции отклика соответствуют значения факторов:  $x_1 = -0,667$  (33,325 МПа) и  $x_3 = 0,333$  (2,67%) при  $x_2 = -1$  (0,005 м/с).

Диаграмма изолиний математической модели (3.27) при  $x_2 = -0,29 = const$  приведена на рисунке 3.23.

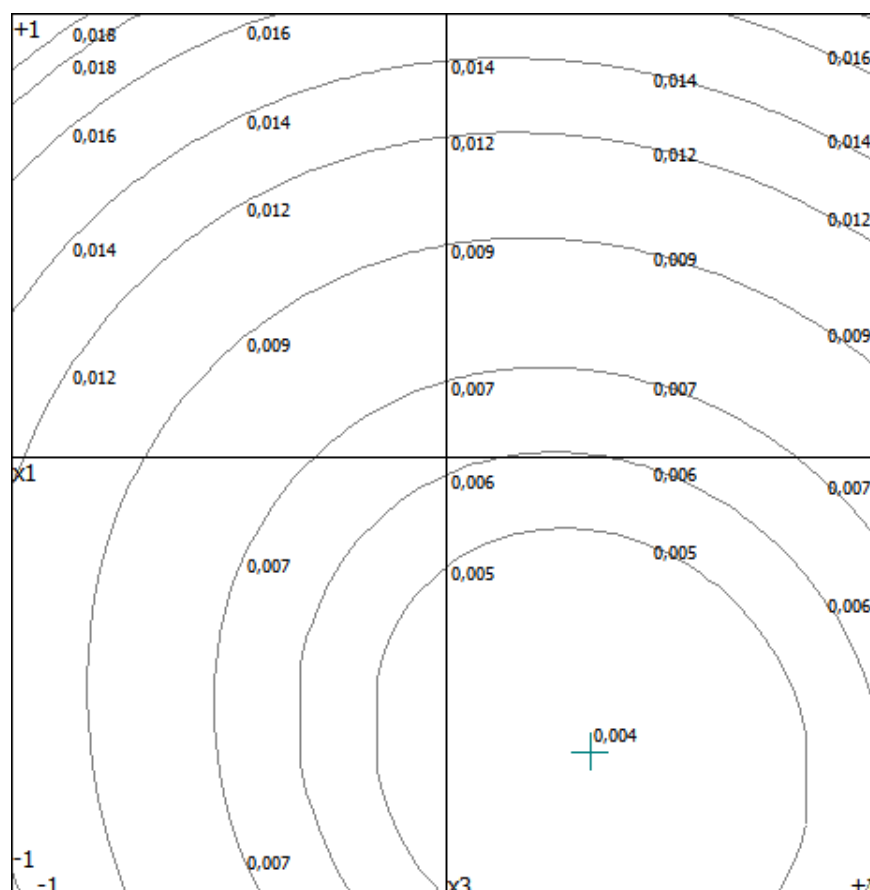


Рисунок 3.23. Диаграмма изолиний математической модели скорости изнашивания при постоянной скорости скольжения 0,03695 м/с

Преобразованное уравнение математической модели с учетом постоянного фактора:

$$\hat{y} = 0,005998 + 0,005007x_1 + 0,001505(-0,29) - 0,002284x_3 + 0,004064x_1^2 + 0,004087x_3^2.$$

Предельные значения (экстремум) функции отклика расположены внутри диапазона изменения (варьирования) переменных факторов. Его

численное значение в данном случае  $\hat{y}_{x_2=-0,29}^{min} = 0,004$ . Экстремуму функции отклика соответствуют значения факторов:  $x_1 = -0,667$  (33,325 МПа) и  $x_3 = 0,333$  (2,67%) при  $x_2 = -0,29$  (0,03695 м/с).

Диаграмма изолиний математической модели (3.27) при  $x_2 = 0 = const$  приведена на рисунке 3.24.

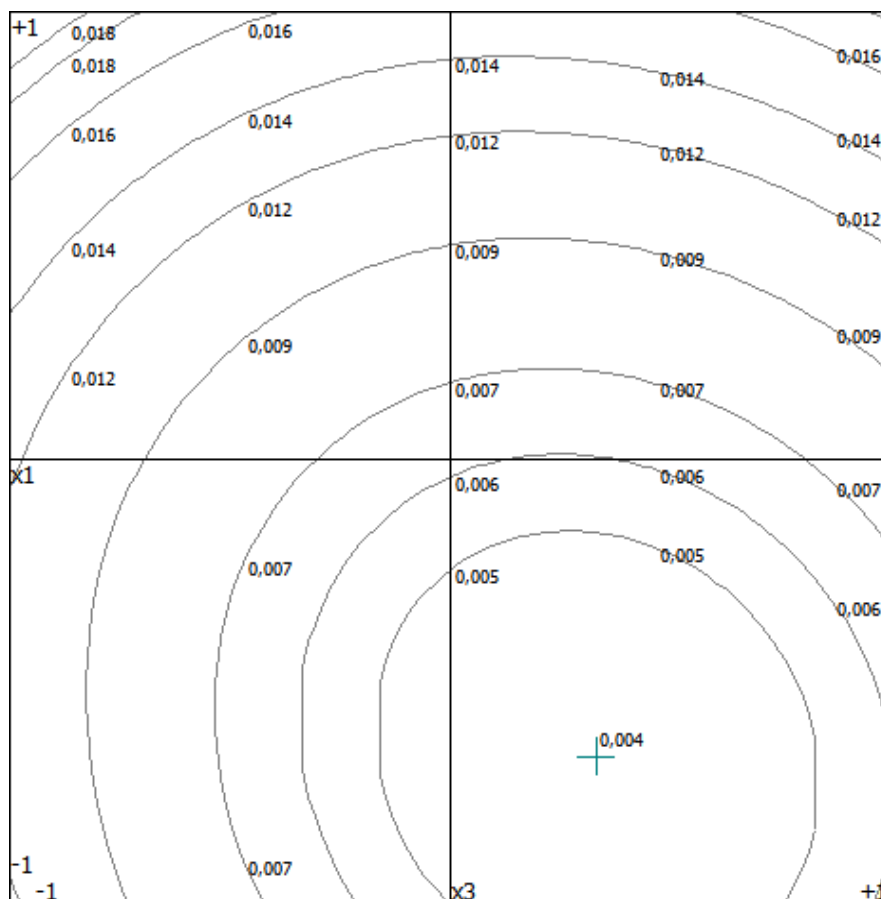


Рисунок 3.24. Диаграмма изолиний математической модели скорости изнашивания при постоянной скорости скольжения 0,05 м/с

Преобразованное уравнение математической модели с учетом постоянного фактора:

$$\hat{y} = 0,005998 + 0,005007x_1 + 0,001505(0) - 0,002284x_3 + 0,004064x_1^2 + 0,004087x_3^2.$$

Предельные значения (экстремум) функции отклика расположены внутри диапазона изменения (варьирования) переменных факторов. Его

численное значение в данном случае  $\hat{y}_{x_2=0}^{min} = 0,004$ . Экстремуму функции отклика соответствуют значения факторов:  $x_1 = -0,667$  (33,325МПа) и  $x_3 = 0,333$  (2,67%) при  $x_2 = 0$  (0,05м/с).

Диаграмма изолиний математической модели (3.27) при  $x_2 = 0,19 = const$  приведена на рисунке 3.25.

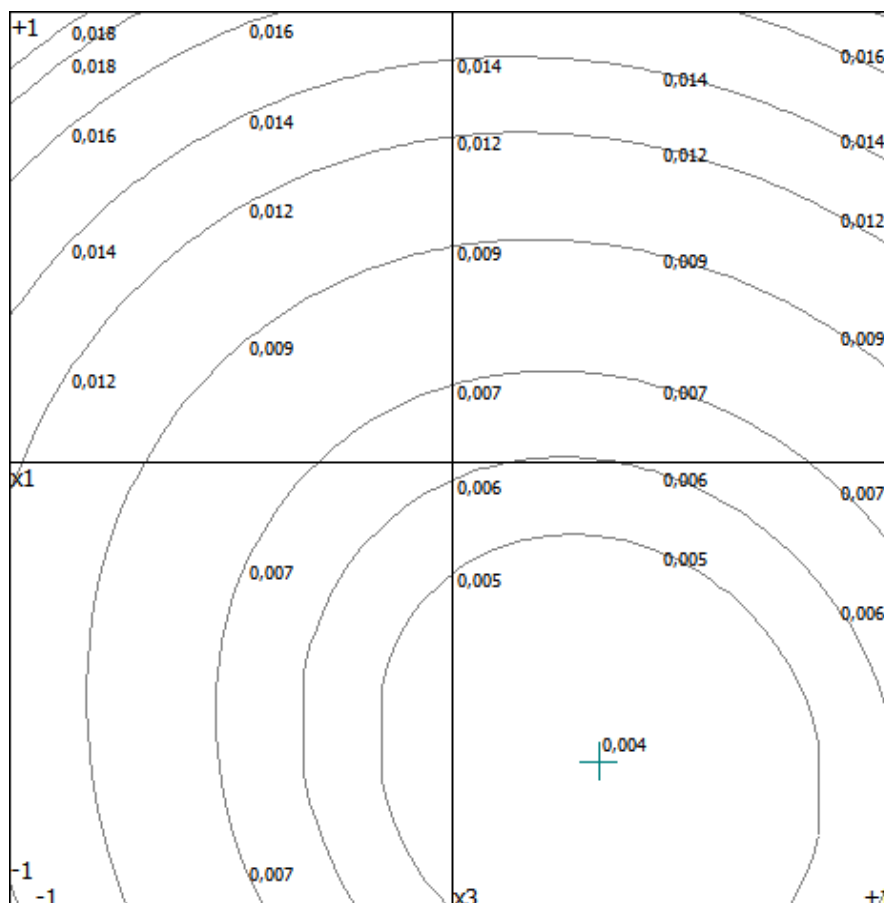


Рисунок 3.25. Диаграмма изолиний математической модели скорости изнашивания при постоянной скорости скольжения 0,05855 м/с

Преобразованное уравнение математической модели с учетом постоянного фактора:

$$\hat{y} = 0,005998 + 0,005007x_1 + 0,001505(0,19) - 0,002284x_3 + 0,004064x_1^2 + 0,004087x_3^2.$$

Предельные значения (экстремум) функции отклика расположены внутри диапазона изменения (варьирования) переменных факторов. Его

численное значение в данном случае  $\hat{y}_{x_2=0,19}^{min} = 0,004$ . Экстремуму функции отклика соответствуют значения факторов:  $x_1 = -0,667$  (33,325 МПа) и  $x_3 = 0,333$  (2,67%) при  $x_2 = 0,19$  (0,05855 м/с).

Диаграмма изолиний математической модели (3.27) при  $x_2 = 1 = const$  приведена на рисунке 3.26.

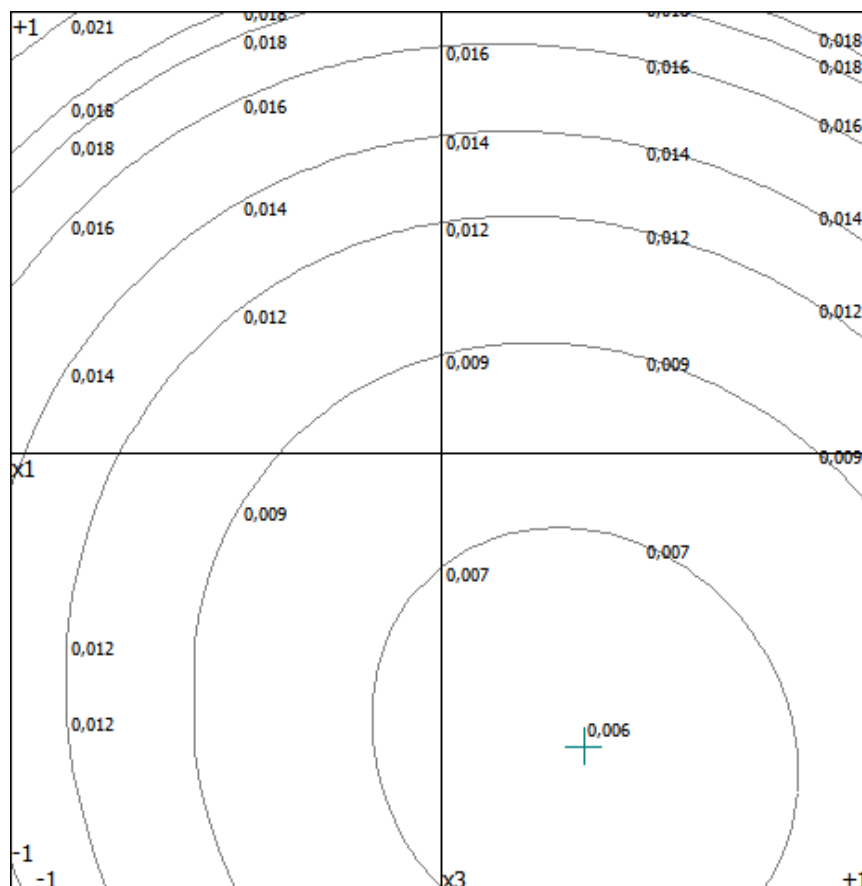


Рисунок 3.26. Диаграмма изолиний математической модели скорости изнашивания при постоянной скорости скольжения 0,095 м/с

Преобразованное уравнение математической модели с учетом постоянного фактора:

$$\hat{y} = 0,005998 + 0,005007x_1 + 0,001505(1) - 0,002284x_3 + 0,004064x_1^2 + 0,004087x_3^2.$$

Предельные значения (экстремум) функции отклика расположены внутри диапазона изменения (варьирования) переменных факторов. Его

численное значение в данном случае  $\hat{y}_{x_2=1}^{min} = 0,006$ . 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).

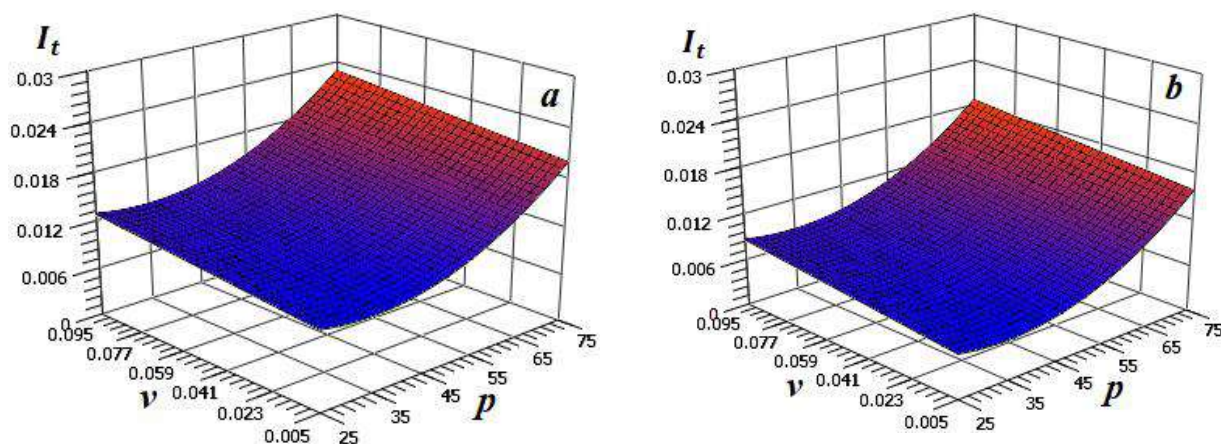
Для приведения уравнения (3.27) к виду с натуральными значениями факторов используем формулы кодирования (3.4), подставляя в уравнение (3.27) вместо кодовых натуральные значения факторов.

$$I_t = 0,005998 + 0,005007 \cdot \frac{p - 50}{25} + 0,001505 \cdot \frac{v - 0,05}{0,045} - 0,002284 \cdot \frac{C - 2}{2} + 0,004064 \cdot \left(\frac{p - 50}{25}\right)^2 + 0,004087 \cdot \left(\frac{C - 2}{2}\right)^2. \quad (3.30)$$

Упрощая выражение (3.30), получим следующее уравнение:

$$I_t = 0.0334v + 6.5 \times 10^{-6} p^2 - 4.5 \times 10^{-4} p + 0.00102C^2 - 0.00523C + 0.0169 \quad (3.31)$$

Графики функции (3.31) при различных значениях концентрации серпентинита в масле 0, 1, 2,5 и 4% приведены на рисунке 3.27.





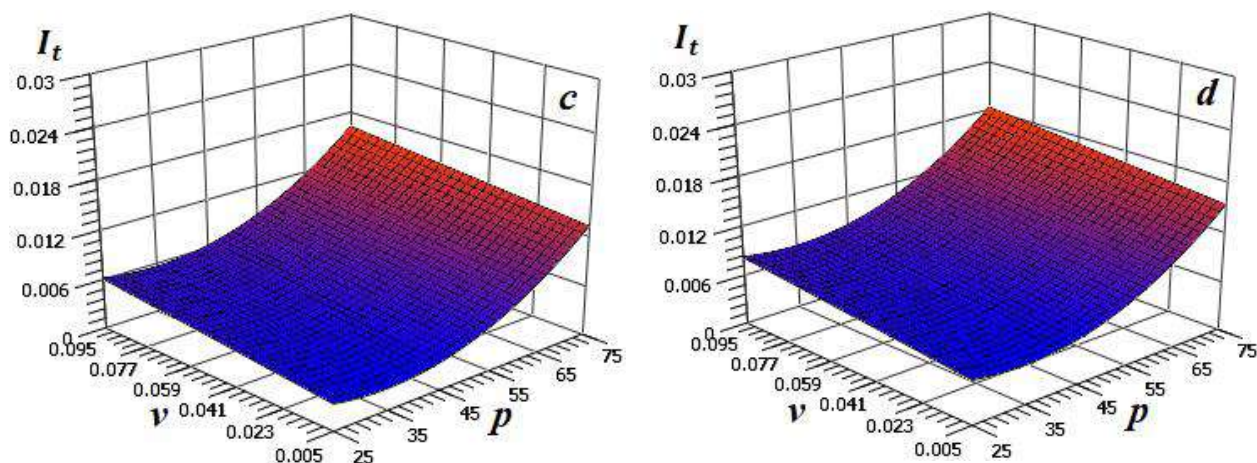


Рисунок 3.27. Графики функции (3.31) при концентрации серпентинита в масле:  $a - 0\%$ ;  $b - 1\%$ ,  $c - 2,5\%$ ,  $d - 4\%$

Проведённый анализ зависимостей скорости изнашивания от концентрации серпентинита и номинального давления (рисунки 3.17 – 3.21) показал, что наименьшее из установленных минимальных значений равно:

$$\hat{y}_{x_1=const}^{min} = \min\{0,004; 0,005; 0,006; 0,007; 0,015\} = 0,004 \text{ мм/ч.}$$

Проведённый анализ зависимостей скорости изнашивания от концентрации аэрогеля и скорости скольжения (рисунки 3.22 – 3.26) показал, что наименьшее из минимальных значений равно:

$$\hat{y}_{x_2=const}^{min} = \min\{0,004; 0,004; 0,004; 0,004; 0,006\} = 0,004 \text{ мм/ч.}$$

Соответственно минимальное значение скорости изнашивания принимаем равным 0,004мм/ч.

Далее реализовали дополнительный анализ зависимости скорости изнашивания от концентрации серпентинита в смазочном слое.

Зависимости скорости изнашивания от концентрации аэрогеля при скорости скольжения 0,028 м/с (рис.3.17 – 3.21) и различных значениях номинального давления приведены на рисунок 3.28.

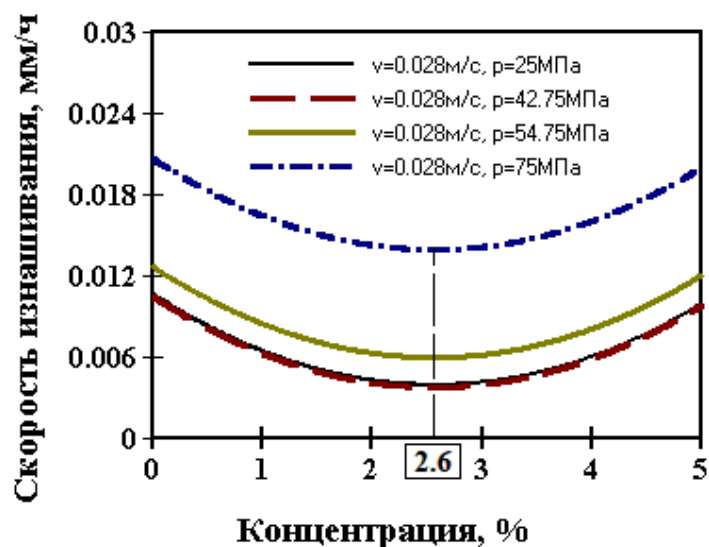


Рисунок 3.28. Зависимости скорости изнашивания от концентрации серпентинита при скорости скольжения 0,028 м/с и различных значениях номинального давления

Из математического анализа полученных зависимостей при переменном номинальном давлении следует, что оптимальной концентрацией серпентинита в смазочном слое является  $C \approx 2,6\%$ .

Зависимости скорости изнашивания от концентрации аэрогеля при номинальном давлении 33,325 МПа (рис.3.22 – 3.26) и различных значениях скорости скольжения приведены на рисунок 3.29.

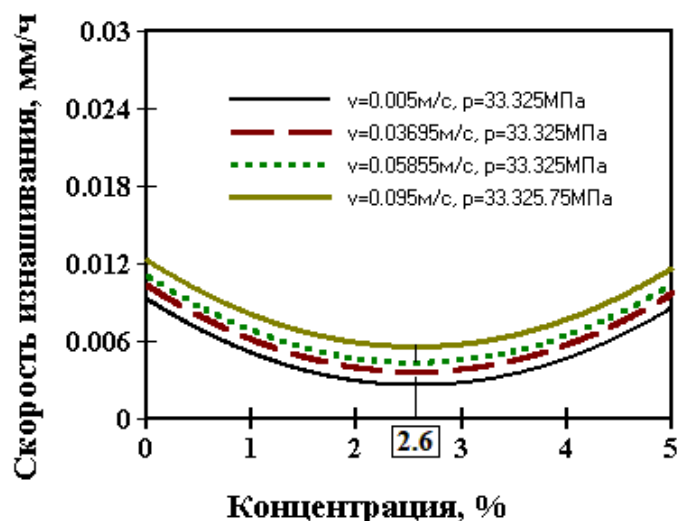


Рисунок 3.29. Зависимости скорости изнашивания от концентрации серпентинита при номинальном давлении 33,325 МПа и различных значениях скорости скольжения

Из математического анализа полученных эмпирических зависимостей при переменной скорости скольжения следует, что оптимальной концентрацией серпентинита в смазочном слое является  $C \approx 2,6\%$ .

Скорость изнашивания пары трения при максимальных в данном исследовании давлении и скорости 75 МПа и 0,095 м/с при нулевой концентрации серпентинита в смазочном слое составляет:

$$I_{t6} = 0,023 \frac{\text{мм}}{\text{ч}}. \quad (3.32)$$

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:

$$K_I = \frac{I_{t6}}{I_{t.min}} = \frac{0,023 \text{мм/ч}}{0,01618 \text{мм/ч}} \cong 1,42. \quad (3.33)$$

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

### 3.4 Выводы по главе 3

В ходе исследования было доказано экспериментальным путем положительное влияние присадочных добавок (серпентинита и аэрогеля) в трансмиссионное масло ТСП-10 на износостойкость деталей движителя гусеничного лесного трактора. При оптимальной концентрации аэрогеля в 2,5% износостойкость деталей в соединениях движителя гусеничного лесного трактора повысится в 1,4 раза, а при оптимальной концентрации серпентинита в 2,6% - в 1,42 раза по сравнению с базовым вариантом (трансмиссионное масло ТСП-10 без присадок). Учитывая значительно более

низкую стоимость серпентинита по сравнению с аэрогелем, он однозначно, является более предпочтительным при выборе присадочной добавки.

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).

## **4 ОБОСНОВАНИЕ РЕКОМЕНДАЦИЙ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ИССЛЕДОВАНИЙ**

### **4.1 Возможность и целесообразность использования результатов исследования для гусеничных лесных машин в условиях лесов на вечной мерзлоте**

Как было отмечено в первом разделе настоящей диссертационной работы, природно-производственные условия лесов на вечной мерзлоте (лесов криолитозоны) являются одними из самых сложных [164].

Суровые условия резко-континентального климата приводят к очень значительному среднегодовому перепаду температур, достигающему до 100°C и более [165, 166].

Леса на вечной мерзлоте принято относить к разряду одних из наиболее ранимых, и чувствительных к антропогенной нагрузке. Способность лесов криолитозоны восстанавливаться после природных и антропогенных нарушений значительно меньше, чем, например, в умеренном климате. И с очевидным потеплением климата, наблюдаемым в последние десятилетия, способность экосистем лесов криолитозоны восстанавливать нарушения все более снижается [167-170].

Недаром в Приказе Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации, от 17.01.2022 г. № 23 «Об утверждении видов лесосечных работ, порядка и последовательности их выполнения, формы технологической карты лесосечных работ, формы акта заключительного осмотра лесосеки и порядка заключительного осмотра лесосеки» напрямую указано: «Разработка лесосек в лесах, произрастающих на многолетне-мерзлотных почвах, должна вестись в зимний период при промерзшем верхнем слое почвы. При проведении рубок в данных природно-климатических условиях повреждение почвы с минерализацией ее поверхности не допускается».

Для лесных машин, в частности для гусеничных ходовых систем, это означает работу в условиях сильных отрицательных температур, что предъявляет повышенные, причем существенно повышенные, требования к надежности и эффективности работы системы смазки, включая требования к повышению триботехнических характеристик смазочных материалов, и их способности сохранять требуемую для эффективной работы вязкость при сильных отрицательных температурах.

И если, как указано в Приказе Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации, от 17.01.2022 г. № 23, лесосечные работы в лесах на вечной мерзлоте нельзя проводить в теплый период года, то широкий перечень лесохозяйственных мероприятий проводится именно в теплый период во всех лесах, включая леса криолитозоны.

К перечню лесохозяйственных мероприятий, проводимых в теплый период года в рассматриваемых природно-производственных условиях, прежде всего относятся противопожарные.

Резко-континентальный климат, и преобладание в лесном фонде криолитозоны лиственницы, приводят к резкому повышению пожароопасности лесов на вечной мерзлоте [171, 172].

В теплое время года резко-континентальный климат формирует очень жаркую и очень сухую погоду, в результате которой лесной опад высыхает, и становится очень восприимчивым к огню лесным горючим материалом. При этом лиственница, хотя и относится к хвойным деревьям, является деревом листопадным, т.е. она сбрасывает свой ассимиляционный аппарат в конце сезона вегетации. В результате к началу пожароопасного сезона леса криолитозоны наполняются большим количеством легковоспламеняющихся лесных горючих материалов, готовых вспыхнуть от одной искры [173].

При этом климатические условия, формируемые резко-континентальным климатом, способствуют повышенному образованию

сухих гроз, которые в рассматриваемых условиях и являются основной причиной лесных пожаров.

В качестве наглядного примера результатов описанной выше ситуации можно указать, что в Ленинградской области, в Республике Карелия, и других субъектах Северо-Западного федерального округа Российской Федерации более 90% случаев лесных пожаров относят к антропогенным, в то время как в Республике Саха (Якутия) более 75% случаев лесных пожаров относят к природным.

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, агрегатированные лесным плугом, реже лесной фрезой (рисунок 4.1).



Рисунок 4.1. Гусеничный трактор ДТ-75, агрегатированный двухотвальным лесным плугом, на прокладке противопожарной минерализованной полосы



Отметим, что в период прокладки минерализованной полосы верхний слой мерзлотного почвогрунта может быть как переувлажненным, что приводит к затеканию в элементы гусеничной ходовой системы жидкого абразива, а может быть пересохшим, и сильно пылить, что приводит к возникновению буквально пылевого облака, состоящего также из абразива [174-176]. И в этих условиях система смазки также должны показывать высокую эффективность и надежность работы.

Несмотря на предпринимаемые ежегодно территориальными органами лесного хозяйства и арендаторами участков лесного фонда противопожарные мероприятия, количество и масштаб лесных пожаров в лесах на вечной мерзлоте ежегодно остается очень значительным. И в последние годы постоянно растет, что, по всей видимости, связано с одиннадцатилетним циклом солнечной активности.

Для тушения лесных пожаров также привлекается значительное количество гусеничных лесных машин, как специальных противопожарных (рисунок 4.2), так и другого назначения – трелевочных, кусторезов, подборщиков, и т.д. [177].



Рисунок 4.2. Гусеничный противопожарный трактор ЛХТ-100А-06-12

При работе на горях в ходовую часть гусеничного трактора попадает повышенное количество абразивных веществ, не только пыль от



иссушенного пожаром верхнего слоя почвогрунта, но и частицы от сгоревшей древесины, представляющие собой, по сути, наноалмазы, образованные углеродом сверхтвердые наночастицы. Они, как известно, обладают повышенной агрессивностью к сопряженным трущимся металлическим поверхностям, из-за чего при работе на горячих для бензиномоторных пил, например, используют специальные воздушные фильтры, предохраняющие цилиндропоршневую группу двигателя внутреннего сгорания от повышенного износа.

Исходя из этого, при работе на лесных пожарах, от системы смазки ходовой части гусеничного движителя требуется не допустить попадания нано абразивных частиц к сопряженным трущимся деталям.

В Федеральном законе от 19.07.2018 г. № 212-ФЗ «О внесении изменений в Лесной кодекс Российской Федерации и отдельные законодательные акты Российской Федерации в части совершенствования воспроизводства лесов и лесоразведения» содержится требование к арендаторам участков лесного фонда проводить работы по искусственному лесовосстановлению на не арендованных участках лесного фонда, площадью равной вырубленной арендатором и отведенной под объекты строительства и реконструкции объектов. Так называемое «компенсационное лесовосстановление». В качестве таких участков для лесовосстановления рекомендовано выбирать лесные земли после пожаров, или рубок, на которых не произошло естественное лесовосстановление.

На работы по компенсационному лесовосстановлению приходится весьма существенные объемы, особенно в лесах на вечной мерзлоте. К примеру, в Республике Саха (Якутия) вырубается ежегодно около 6% от объема допустимого ежегодного изъятия древесных ресурсов (от расчетной лесосеки), при этом большая часть этого объема вырубается не в качестве рубок спелых и перестойных насаждений (известных ранее как рубки главного пользования лесом), а в качестве «рубок лесных насаждений

любого возраста на лесных участках, предназначенных для строительства, реконструкции и эксплуатации объектов», т.е. линейных объектов нефте- и газопроводы, ЛЭП, и т.д.

Для выполнения требований 212-ФЗ лесопользователи выполняют большой объем работ по искусственному лесовосстановлению, на вырубках и гарях прошлых лет, которые требуют их предварительной расчистки. И для этого также используются, преимущественно, гусеничные тракторы, также как и на очистке лесосек после окончания основных лесосечных работ [178, 179].

На фотографии рисунка 4.3, сделанным на расчистке гари под искусственное компенсационное лесовосстановление в июне 2023 г. в Республике Саха (Якутия) показана ситуация, когда оттаявший слой сезонной мерзлоты привел к переувлажнению верхнего слоя почвогрунта, а валяющиеся на площадке остатки сгоревшей древесины добавляют в жидкую абразивную грязь, в которую погружен практически весь гусеничный движитель бульдозера, еще nano частицы особо твердого абразива.

Представленные на рисунке 4.3 природно-производственные условия, без сомнения, можно отнести к наиболее тяжелым для работы гусеничного движителя, и требующими максимальной надежности и эффективности работы системы смазки, включая требования к повышению триботехнических характеристик смазочных материалов, и их способности сохранять требуемую для эффективной работы, и не пропускать к сопряженным трущимся деталям частицы абразива.

В дальнейшем, при проведении работ по искусственному лесовосстановлению, но уже не в таких чрезвычайно сложных условиях, также используются преимущественно гусеничные тракторы – для нарезки борозд, при последующей ручной посадке семян/саженцев под Меч Колесова, или финскую трубу, или для транспортирования посадочной машины (рисунок 4.4).

Рассмотренные выше лесохозяйственные работы являются наиболее распространенными, в том числе и в лесах на вечной мерзлоте. Помимо рассмотренных работ гусеничные тракторы, и гусеничные вездеходы, используются для выполнения целого ряда других операций, таких как – сбор семенного материала с растущих деревьев (в качестве базы для подъемников), передвижные ремонтные мастерские, скарификаторы под последующее естественное лесовосстановление, и т.д.



Рисунок 4.3. Работа гусеничного бульдозера на расчистке гари под компенсационное искусственное лесовосстановление (Республика Саха (Якутия), июнь 2023 г.)

Везде, где от машины требуется минимально возможное давление на лесной почвогрунт, и при этом большая сила тяги с минимальным

буксованием, используются машины на гусеничном шасси [180-187]. При этом они зачастую работают в экстремально тяжелых условиях эксплуатации, значительно тяжелее, чем, например, у строительных, или сельскохозяйственных гусеничных машин.

И в этой связи, подчеркнем еще раз, гусеничным лесным машинам необходима надежная и эффективная система смазки, включая повышенные триботехнические характеристики используемых смазочных материалов.



Рисунок 4.4. Гусеничный трактор ТДТ-55А, агрегатированный посадочной машиной в лесном питомнике

Более того, условия работы в лесу делают крайне желательным отсутствие необходимости частой, и даже сезонной, замены смазочных материалов в гусеничном движителе, поскольку для этого требуется доставить машину в теплый бокс. Для этого требуется тягач с тралом (рисунок 4.5), а значит дополнительные затраты, которые будут достаточно значительные с учетом крайне слабо развитой дорожной сети в лесах,

например, Республики Саха (Якутия), да и других субъектов Российской Федерации, в которых леса растут на вечной мерзлоте. Причем еще раз отметим то факт, что на леса криолитозоны приходится более 50% площади всей территории лесного фонда нашей страны.

Как показывают результаты теоретических и экспериментальных исследований, всем вышеперечисленным требованиям эксплуатации лесных гусеничных машин в особо тяжелых природно-производственных условиях лесов на вечной мерзлоте отвечают предлагаемые в диссертации инновационные смазочные материалы - серпентинит и аэрогель.



Рисунок 4.5. Доставка бульдозера на площадку под искусственное лесовосстановление (Республика Саха (Якутия), июнь 2023 г.)



## 4.2 Рекомендации по технической применимости предложенных решений

Исходя из рекомендаций по техническому обслуживанию тракторов Онежского тракторного завода, при проведении технического обслуживания, необходимо контролировать уровень трансмиссионного масла в механизме балансира, а именно ступицах опорных катков, направляющих колес, кареток и кривошипов. Рекомендуется применять масло марки Тсп-10, уровень которого должен находиться по нижнему краю заливного отверстия специальной масленки (рисунок 4.6) [188]. Данный контроль необходимо проводить в рамках ТО-2, то есть каждые 300 моточасов работы трактора, и лишь в исключительных случаях, когда появляются заметные подтекания масла, ранее. Контроль осевых зазоров и износа пар трения ходовой части рекомендовано проводить в рамках ТО-3, то есть каждые 900 моточасов работы.



Рисунок 4.6. Каток со смазочной масленкой

На практике интервал в 900 моточасов является неоправданно большим, так как при отсутствии или значительном снижении трансмиссионной смазки в паре трения ось катка - подшипник, возникает

значительный износ, вызывающий отказ балансира. При проведении эксплуатационных испытаний, было установлено, что данный узел даже при стандартной смазке и отсутствии видимой утечки масла, может иметь суммарный износ до 0,24 мм за 600 моточасов, что соответствует максимальному допустимому износу соединения без ремонта [189]. Стоит отметить, что 80% износа приходится на подшипник, а 20% на ось катка. После указанной величины износа, в зазор соединения активно начинает попадать абразив, ускоряя интенсивность изнашивания. Износостойкость подшипника скольжения значительно ниже, чем у оси, так как он является расходным материалом в указанном соединении, и изготавливается из более мягкой стали. Подшипник скольжения необходимо менять при каждом технических обслуживании, снижая тем самым зазор в соединении.

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 смене 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. 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%.

Смешивание трансмиссионного масла и серпентинита необходимо осуществлять миксерным способом. Для избегания осаждения, хранение полученной смеси осуществлять не более суток. Непосредственно перед заливом в механизмы трактора, емкость со смесью необходимо взболтать.

Эксплуатационные испытания проводились природно-производственные условия лесов на вечной мерзлоте в Архангельской области. Испытания проводились в зимний период (температура опускалась до  $-40^{\circ}\text{C}$ ). 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» (Приложение №1).

#### **4.3 Экономическая обоснованность использования результатов исследования для гусеничных лесных машин в условиях лесов на вечной мерзлоте**

Методик расчета экономической эффективности внедряемых технических и технологических решений, как и ее показателей существует достаточно много. Целесообразность их использования зависит от наличия/отсутствия необходимости использования банковских продуктов (кредит, лизинг, и т.п.), отрасли промышленности, получаемого конечного продукта, и его характеристик и т.д. [190-191].

Например, при использовании двух различных трелевочных тракторов на лесосечных работах в [202] рекомендуется использовать следующую методику.

При оценке экономической эффективности применения различных трелевочных тракторов в составе эксплуатационных затрат ( $C_t$ ) учитываются:



- основная и дополнительная заработная плата с начислениями на нее (отчисления во внебюджетные фонды);
- страховые суммы;
- расходы на подготовку и освоения производства;
- расходы по содержанию и эксплуатации трелевочных тракторов;
- прочие производственные расходы, обусловленные применением трелевочных тракторов.

Сравнительный экономический результат (эффект) за каждый год применения различных трелевочных тракторов или технологических схем их применения обосновывается по формуле:

$$\begin{aligned} \mathcal{E}_{1,2,3..t} = & \left( K \cdot \frac{\Pi_{1,2..t}}{\sum_{t=0}^T \Pi} + \sum_{t=0}^T C_{1,2..t} - O_t \right)_a \cdot \frac{T_{\bar{b}} \cdot \bar{\Pi}_{\bar{b}}}{T_a \cdot \bar{\Pi}_a} - \\ & - \left( K \cdot \frac{\Pi_{1,2..t}}{\sum_{t=0}^T \Pi} + \sum_{t=0}^T C_{1,2..t} - O_t \right)_{\bar{b}}, \end{aligned} \quad (4.1)$$

где:  $K_a, K_{\bar{b}}$  – балансовая стоимость трелевочных тракторов по их вариантам сравнения ( $a$  и  $\bar{b}$ );

$\Pi_{1,2..t_a}, \Pi_{1,2..t_{\bar{b}}}$  – годовая выработка трелевочных тракторов по вариантам их сравнения ( $a$  и  $\bar{b}$ );

$\sum_{t=0}^T \Pi_a, \sum_{t=0}^T \Pi_{\bar{b}}$  – общий объем выработки трелевочных тракторов по вариантам сравнения ( $a$  и  $\bar{b}$ );

$\sum_{t=0}^T C_{1,2..t_a}, \sum_{t=0}^T C_{1,2..t_{\bar{b}}}$  – эксплуатационные затраты по трелевке древесины по сравниваемым трелевочным тракторам ( $a$  и  $\bar{b}$ );

$O_{t_a}$ ,  $O_{t_b}$  - остаточная стоимость трелевочных тракторов после выработки ресурса (экономически целесообразного периода) по сравниваемым вариантам ( $a$  и  $b$ );

$T_a$ ,  $T_b$  - ресурс наработки трелевочных тракторов по сравниваемым вариантам ( $a$  и  $b$ );

$\overline{P}_a$ ,  $\overline{P}_b$  - годовые объемы трелевки древесины трелевочных тракторов по сравниваемым вариантам ( $a$  и  $b$ ).

Выявленный наилучший вариант применения трелевочных тракторов в дальнейшем оценивается по критерию чистой приведенной ценности (дохода) (ЧДД), который определяется как разность между текущей ценностью потока будущих доходов (выгод) и текущей ценностью будущих затрат на осуществление, эксплуатацию и техническое обслуживание трелевочных тракторов на всем протяжении срока эксплуатации (наработки ресурса), по формуле:

$$\text{ЧДД} = \sum_{t=0}^T \frac{B_t - C_t}{(1+r)^t} - \sum_{t=0}^T \frac{K_t}{(1+r)^t}, \quad (4.2)$$

где: ЧДД – чистая приведенная (дисконтированная) ценность (доход) от использования трелевочных тракторов;

$B_t$  – суммарные годовые выгоды (доходы) от использования трелевочных тракторов;

$C_t$  – затраты на трелевку древесины с помощью трелевочных тракторов в год  $t$ ;

$r$  – ставка дисконта;

$T$  – срок службы трелевочных тракторов до выработки ресурса.

Суммарные годовые выгоды ( $B_t$ ) использования трелевочных тракторов определяются по формуле:

$$B_t = \sum_{i=0}^T \Pi_{1,2,...,t} \times C_t, \quad (4.3)$$

где:  $C_t$  – цена трелевки древесины с помощью трелевочных тракторов в расчете на единицу работ ( $\Pi_{1,2,...,t}$ ).

Цена единицы работ на трелевке древесины с помощью трелевочных тракторов определяется по формуле [37]:

$$C_t = \frac{\bar{C} : \bar{C} \times C_t}{\Pi_{1,2,...,t}}, \quad (4.4)$$

где:  $\bar{C}$  – средняя цена за единицу лесопродукции;

$\bar{C}$  – средние затраты (полная себестоимость) на единицу лесопродукции.

Остальные элементы аналогичны выше, указанным обозначениям (выражения (4.1) и (4.3)).

В качестве дополнительных критериев (показателей) при оценке экономической эффективности применения трелевочных тракторов в ряде источников рекомендуется рассмотреть:

1. Внутреннюю ставку дохода (внутренней нормы рентабельности) равной ставке дисконта, при которой затраты равны (приближаются) к выгодам, т.е. чистая приведенная ценность трелевочных тракторов равна нулю или около этого. Внутренняя ставка дохода, устанавливаемая на уровне максимального процента по ссудам, который можно оплачивать за финансирование инвестиций и ресурсов, необходимых для приобретения и эксплуатации трелевочных тракторов, оставаясь при этом окупаемым.
2. Соотношение выгоды/затраты. В случае, если отношение больше единицы, то предлагаемое техническое или технологическое решение заслуживает внимания (выгодно).
3. Соотношение чистые выгоды/затраты, в котором дисконтированные выгоды делятся на дисконтированные затраты по приобретению и

эксплуатации трелевочных тракторов. Положительное значение соотношения чистые выгоды/затраты означает выгодность приобретения новых трелевочных тракторов.

Для практического использования результатов настоящего диссертационного исследования не требуется инвестиций в приобретение нового оборудования (гусеничных лесных машин), изменения технологии их производства, освоения новых видов продукции.

Следовательно, при обосновании экономической целесообразности использования результатов исследования для гусеничных лесных машин в условиях лесов на вечной мерзлоте нет необходимости использовать приведенные выше зависимости.

Очевидно, что в анализируемом случае оптимальной будет оценка по соотношению выгоды/затраты.

В качестве исходных данных расчета экономической обоснованности практического использования результатов настоящего диссертационного исследования примем данные, представленные в таблице 4.1.

Представляется целесообразным провести расчет на количество моточасов до достижения максимально допустимого износа соединения вал-втулка без ремонта (с присадками) в эксплуатационных условиях – 810 моточасов.

Как указано в таблице 4.1, количество моточасов до достижения максимально допустимого износа соединения вал-втулка без ремонта (без присадок) составляет 600. А стоимость соединения (ось+подшипник) составляет 10000 руб.

Таблица 4.1. Исходные данные для расчета экономической обоснованности практического использования результатов диссертационного исследования

№	Показатель	Значение
1	Количество моточасов до достижения максимально допустимого износа соединения вал-втулка без ремонта (без присадок)	600
2	Количество моточасов до достижения максимально допустимого износа соединения вал-втулка без ремонта (с присадками)	852 (лабораторные условия) 810 (эксплуатационные условия)
3	Стоимость соединения (ось+подшипник)	10000 руб.
4	Количество соединений в 1 тракторе	8 шт.
5	Серпентинит	500 руб./кг
6	Масло Тсп-10	200 руб./литр
7	Необходимый объем масла на 8 соединений	4 л
8	Необходимая концентрация серпентинита в масле	2,5%

Следовательно амортизационные расходы при эксплуатации соединения (ось+подшипник) без рекомендуемых присадок составляет:

$$10000/600=16,67 \text{ руб./мото-час.}$$

Амортизационные расходы при эксплуатации соединения (ось+подшипник) с рекомендуемыми присадками составят:

$$10000/810=12,35 \text{ руб./мото-час.}$$

То есть разница на одно соединение (ось+подшипник) составит:

$$16,67-12,35=4,32 \text{ руб./мото-час.}$$

А на все рассматриваемые соединения гусеничного лесного трактора экономия составит:

$$4,32 \cdot 8 = 34,56 \text{ руб/мото-час.}$$

Ресурс рассматриваемых соединений, при использовании результатов настоящего диссертационного исследования увеличится на 35%.

Затраты на практическое использование результатов настоящего диссертационного исследования можно определить следующим образом.

Как указано в таблице 4.1, на все 8 рассматриваемых соединений гусеничного лесного трактора требуется 4 литра масла Тсп-10, стоимостью 200 руб/л. Иначе говоря, на сумму  $200 \cdot 4 = 800$  руб.

Также в таблице 4.1 указано, что практического использования результатов настоящего диссертационного исследования в стандартное для рассматриваемых соединений масло Тсп-10 следует добавить Серпентинит, стоимостью 500 руб/кг, в пропорции 2,5%. Иначе говоря, на один гусеничный трактор потребуется 0,1 кг Серпентинита (на все 8 рассматриваемых соединений). Стоимость такой добавки, т.е. сумма затрат на внедрение предлагаемых в настоящей диссертации, составит 50 руб.

При этом экономия амортизационных затрат только на один мото-час (на все 8 рассматриваемых соединений) составляет 34,56 руб.

Следовательно, при затратах в 50 руб., экономия денежных средств, связанная только повышением долговечности рассматриваемых соединений (ось+подшипник) гусеничного лесного трактора на 35%, составит 3456 руб. (на 100 мото-час). Учитывая среднее количество рабочих дней в году - 250, а продолжительность смены - 8 часов (из которых 7 эксплуатационные), получаем 1750 мото-час в год. Тогда годовая экономия составит - 60480 руб. В среднем на лесозаготовительных предприятиях отрасли, исходя из опроса лесопромышленников в северо-западном регионе, работает от 2 до 50 единиц транспортно-технологических машин. В парке предприятия с нормой заготовки  $100000 \text{ м}^3$  в год и при наличии резервной техники для

лесохозяйственных и противопожарных мероприятий, в среднем находится 10 тракторов, соответственно, годовая экономия для такого предприятия составит не менее 600 тыс. р.

И это, не считая экономии времени и стоимости работ, связанных с обслуживанием рассматриваемых соединений (ось+подшипник), включая затраты на транспортировку трактора в бокс для проведения ТО, а также эффектов от повышения коэффициента технической готовности, и соответствующего увеличения времени полезной эксплуатации трактора.

Методика расчета экономического ущерба от простоев и отказов техники подробно описана в работе доцента Маркова В.А. [146] с применением теории профессора Мурашкина Н.В. Из приведенных расчетов следует, что для ликвидации отказов одного трактора ОТЗ, в среднем в год расходуется 112 часов, а при повышении долговечности на 35%, будет расходоваться 73 часа, часовая экономия составит 39 часов с одной единицы техники. При средней производительности одного трактора  $8,3 \text{ м}^3$  в моточас, получаем  $324 \text{ м}^3$ . Для 10 тракторов этот показатель будет  $3240 \text{ м}^3$ , что при стоимости древесины в  $3000 \text{ р/м}^3$ , составит 9,7 млн. рублей экономии для одного лесозаготовительного предприятия в год.

Общая экономия за счет повышения ресурса техники составит для одного предприятия с тракторным парком в 10 машин – 10,3 млн. рублей.

Также следует отметить, что при более глубоком и профессиональном экономическом анализе предлагаемых в настоящем диссертационном исследовании мероприятий, не входящем в задачи настоящей работы, целесообразно также учесть влияние повышения коэффициента технической готовности (надежности) трактора на безопасность его эксплуатации для оператора и обслуживающего персонала. Поскольку трудоемкость проведения работ по техническому обслуживанию ремонту трактора снизится, соответственно снизится и травматизм связанного с эксплуатацией трактора персонала [202-209].

#### 4.1 Выводы по главе 4

В результате всестороннего рассмотрения затронутых разделе 4 настоящей диссертационной работы вопросов можно сформулировать следующие основные выводы:

1. В суровых природно-производственных условиях лесов криолитозоны, связанных с экстремально низкими температурами в зимний период, большими нагрузками на трансмиссию и гусеничный движитель при проведении различных лесохозяйственных работ в теплый период года необходима надежная и эффективная система смазки рассматриваемых в настоящей диссертационной работе соединений (ось+подшипник), включая повышенные триботехнические характеристики используемых смазочных материалов.
2. 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 (литол, солидол, графитин, циатим и др.), которую невозможно добавить в соединение посредством масленки, без разбора узла.
3. Экономия денежных средств для лесозаготовительного предприятия с объёмом заготовки леса в  $100 \text{ т.м}^3$ , при повышении ресурса техники на 35% и снижении количества отказов, составит 10,3 млн. рублей в год [210].



## **ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ, РЕКОМЕНДАЦИИ И ПЕРСПЕКТИВЫ ДАЛЬНЕЙШИХ ИССЛЕДОВАНИЙ**

### **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 объёмом заготовки леса в 100 т.м<sup>3</sup>, при повышении ресурса техники на 35% и снижении количества отказов, составит 10,3 млн. рублей в год рублей.

### **Рекомендации:**

1. 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.

### **Перспективы дальнейших исследований:**

1. Одним из перспективных направлений исследований в области триботехники является комбинированное использование различных присадочных материалов в сочетании с различными марками трансмиссионных масел.
2. Помимо гусеничной техники, для лесных работ также применяются колесные и машины на альтернативном ходу. Одним из направлений исследований является применение присадочных добавок к трансмиссиям данных машин.
3. Помимо элементов трансмиссии, износу также подвержены и другие узлы лесной техники, такие как двигатель. Применение присадочных материалов для снижения интенсивности износа поршневой группы также является актуальной и перспективной темой для исследований.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Григорьева О. И. Сравнение подходов к типологии лесных насаждений России и Европейских стран / О. И. Григорьева, А. С. Старовойтова, В. А. Макуев, Е. А. Тихонов, М. В. Коломинова, И. В. Григорьев // Системы. Методы. Технологии. – 2022. – № 3 (55). – С. 71–77.
2. Ковалев Р. Н. Метод оценки эффективности лесовосстановительных мероприятий с учетом параметров лесотранспортной сети / Р. Н. Ковалев, И. М. Еналеева-Бандура, А. Н. Баранов, В. А. Лозовой, О. И. Григорьева, И. В. Григорьев // Системы. Методы. Технологии. – 2022. – № 4 (56). – С. 64–71.
3. Куницкая О. А. Повышение эффективности лесопользования за счет использования непостоянных лесных складов / О. А. Куницкая, А. В. Помигуев // Управление земельными ресурсами, землеустройство, кадастр, геодезия и картография. Проблемы и перспективы развития : сб. материалов Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием, посвящ. 255-летию Землеустройству Якутии и Году науки и технологий. – Якутск, 2021. – С. 314–320.
4. Григорьев И. В. Технология и система машин для разрубki трасс линейных объектов / И. В. Григорьев, О. А. Куницкая, С. Е. Рудов, А. Б. Давтян // Энергия: экономика, техника, экология. – 2019. – № 10. – С. 62–68.
5. Григорьева О. И. Перспективы импортозамещения систем машин для искусственного лесовосстановления / О. И. Григорьева, В. А. Макуев, Е. В. Барышникова, О. Н. Бурмистрова, В. В. Швецова, И. В. Григорьев, В. А. Иванов // Системы. Методы. Технологии. – 2022. – № 3 (55). – С. 78–84.
6. Григорьев И. В. Выбор системы машин для создания и эксплуатации лесных плантаций / И. В. Григорьев, А. Б. Давтян, О. И. Григорьева // Управление земельными ресурсами, землеустройство, кадастр, геодезия и картография. Проблемы и перспективы развития : сб. материалов Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием, посвящ. 255-летию

Землеустройству Якутии и Году науки и технологий. – Якутск, 2021. – С. 271–278.

7. Григорьев И. В. Лучшие практики подготовки операторов лесных машин / И. В. Григорьев, О. А. Куницкая, С. Е. Рудов, О. И. Григорьева, С. А. Войнаш // Строительные и дорожные машины. – 2020. – № 10. – С. 42–48.

8. Григорьева О. И. Концепция универсальной машины для выполнения лесохозяйственных работ и тушения лесных пожаров / О. И. Григорьева, А. Б. Давтян, О. И. Гринько, С. А. Войнаш // Машиностроение: новые концепции и технологии : материалы Всерос. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. – Красноярск, 2020. – С. 45–49.

9. Тетеревлева Е. В. Транспортно-технологические машины для тушения лесных пожаров на базе колесных вездеходов / Е. В. Тетеревлева, О. И. Гринько, О. И. Григорьева // Транспортные и транспортно-технологические системы : материалы Междунар. науч.-техн. конф. / отв. ред. Н. С. Захаров. – 2020. – С. 374–377.

10. Мануковский А. Ю. Перспективная лесохозяйственная машина / А. Ю. Мануковский, М. В. Зорин, О. И. Григорьева, А. Б. Давтян, О. А. Куницкая, И. В. Григорьев // Приоритетные направления инновационной деятельности в промышленности : сб. науч. ст. по итогам шестой междунар. науч. конф. – Казань, 2020. – С. 141–143.

11. Григорьев И. В. Параметры и показатели работы перспективного форвардера для малообъемных лесозаготовок / И. В. Григорьев // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. – 2018. – Т. 6, № 4 (40). – С. 21–25.

12. Хахина А. М. Статистический анализ параметров колесных трелевочных машин / А. М. Хахина, И. В. Григорьев, А. М. Газизов, О. А. Куницкая // Хвойные бореальной зоны. – 2018. – Т. 36, № 2. – С. 189–197.

13. Григорьева О. И. Перспективы импортозамещения в производстве лесохозяйственных и лесопожарных машин в России / О. И. Григорьева, А. Б.

- Давтян, О. И. Гринько // Лесозэксплуатация и комплексное использование древесины : сб. ст. Всерос. науч.-практ. конф. – Красноярск, 2020. – С. 66–69.
14. Марков О. Б. Математическая модель выбора системы машин для создания и эксплуатации лесных плантаций / О. Б. Марков, Р. В. Воронов, А. Б. Давтян, И. В. Григорьев, Г. А. Калита // Деревообрабатывающая промышленность. – 2021. – № 1. – С. 16–26.
15. Воронов Р. В. Математическая модель модульного принципа подбора системы машин для создания и эксплуатации лесных плантаций / Р. В. Воронов, О. Б. Марков, И. В. Григорьев, А. Б. Давтян // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. – 2019. – № 5 (371). – С. 125–134.
16. Гаспарян Г. Д. Численное исследование показателей заготовки древесины на лесных плантациях / Г. Д. Гаспарян, А. Б. Давтян, И. В. Григорьев, О. Б. Марков, О. И. Григорьева // Resources and Technology. – 2021. – Т. 18, № 4. – С. 17–45.
17. Григорьева О. И. Эффективная технология расчистки древесно-кустарниковой растительности / О. И. Григорьева, А. Б. Давтян // Повышение эффективности лесного комплекса : материалы Седьмой Всерос. нац. науч.-практ. конф. с междунар. участием. – Петрозаводск, 2021. – С. 34–35.
18. Сафин Р. Р. Технология и машины лесовосстановительных работ : учебное пособие / Р. Р. Сафин, И. В. Григорьев, О. И. Григорьева, Е. Ю. Разумов. – М. : Деревообрабатывающая промышленность, 2015. – 230 с.
19. Сафин Р. Р. Основы лесного хозяйства : учебное пособие / Р. Р. Сафин, И. В. Григорьев, О. И. Григорьева, Е. Ю. Разумов. – М. : Деревообрабатывающая промышленность, 2015. – 170 с.
20. Григорьев И. В. Пути повышения эффективности работы лесных машин / И. В. Григорьев, О. А. Куницкая, С. Е. Рудов, А. Б. Давтян // Энергия: экономика, техника, экология. – 2020. – № 1. – С. 55–63.
21. Бурмистрова О. Н. Теоретические исследования производительности форвардеров при ограничениях воздействия на почвогрунты / О. Н.

Бурмистрова, А. А. Просужих, Е. Г. Хитров, О. А. Куницкая, Е. Н. Лунева // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. – 2021. – № 3 (381). – С. 101–116.

22. Grigorev I. Efficiency improvement of forest machinery exploitation / I. Grigorev, O. Kunickaya, A. Prosuzhih, I. Kruchinin, D. Shakirzyanov, V. Shvetsova, O. Markov, S. Egipto // Diagnostyka. – 2020. – Vol. 21, No. 2. – P. 95–109.

23. Григорьев И. В. Перспективные направления повышения качества подготовки специалистов в области лесопользования / И. В. Григорьев, О. И. Григорьева // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. – 2015. – Т. 3, № 2-2 (13-2). – С. 205–208.

24. Григорьева О. И. Повышение эффективности кадрового обеспечения лесного комплекса Российской Федерации / О. И. Григорьева, И. В. Григорьев // Архитектура университетского образования: построение единого пространства знаний : сб. трудов IV Нац. науч.-метод. конф. с междунар. участием. – 2020. – С. 123–130.

25. Скобцов И. Г. Требования стандартов по безопасности при работе на лесных машинах / И. Г. Скобцов, О. А. Куницкая // Безопасность и охрана труда в лесозаготовительном и деревообрабатывающем производствах. – 2022. – № 1. – С. 51–56.

26. Пятакин В. И. Технология и машины лесосечных работ : учебник для вузов / В. И. Пятакин, И. В. Григорьев, А. К. Редькин [и др.] ; под ред. В. И. Пятакина. – СПб. : Изд-во СПбГПУ, 2012. – 362 с.

27. Скобцов И. Г. Обзор конструктивных решений защитных устройств кабин лесных машин / И. Г. Скобцов, О. А. Куницкая // Безопасность и охрана труда в лесозаготовительном и деревообрабатывающем производствах. – 2022. – № 1. – С. 60–69.

28. Григорьев И. В. Постановка задачи экономической оценки улучшения условий труда и безопасности работы операторов лесных машин / И. В.

Григорьев, О. И. Григорьева // Безопасность и охрана труда в лесозаготовительном и деревообрабатывающем производствах. – 2022. – № 4. – С. 43–48.

29. Скобцов И. Г. Математическая модель оценки энергопоглощающих свойств устройства защиты оператора лесной машины / И. Г. Скобцов, О. А. Куницкая // Безопасность и охрана труда в лесозаготовительном и деревообрабатывающем производствах. – 2022. – № 3. – С. 40–50.

30. Скобцов И. Г. Исследование динамических нагрузок, действующих на кабину лесной машины при различных вариантах возникновения аварийных ситуаций / И. Г. Скобцов, О. А. Куницкая // Безопасность и охрана труда в лесозаготовительном и деревообрабатывающем производствах. – 2022. – № 3. – С. 28–39.

31. Григорьев И. В. Общие методические вопросы эргономической оценки системы "оператор - производственная среда - машина" / И. В. Григорьев, О. И. Григорьева // Безопасность и охрана труда в лесозаготовительном и деревообрабатывающем производствах. – 2022. – № 5. – С. 17–22.

32. Григорьев И. В. Эффективные технологии и системы машин для малообъёмных заготовок древесины / И. В. Григорьев, О. И. Григорьева, А. А. Чураков // Энергия: экономика, техника, экология. – 2018. – № 2. – С. 61–66.

33. Никифоров О. А. Основные трудовые требования в схемах добровольной лесной сертификации в рамках стандартов цепочки поставок / О. А. Никифоров, О. И. Григорьева // Безопасность и охрана труда в лесозаготовительном и деревообрабатывающем производствах. – 2022. – № 4. – С. 53–63.

34. Григорьева О. И. Безопасность и охрана труда в свете требований международных систем добровольной лесной сертификации / О. И. Григорьева, Д. А. Данилов, И. В. Григорьев // Безопасность и охрана труда в

лесозаготовительном и деревообрабатывающем производствах. – 2022. – № 1. – С. 4–20.

35. Каляшов В. А. Современные технические решения для обеспечения безопасной работы лесных машин на горных склонах / В. А. Каляшов, Т. А. До, О. И. Григорьева, А. Ю. Гурьев, Д. В. Новгородов // Безопасность и охрана труда в лесозаготовительном и деревообрабатывающем производствах. – 2022. – № 2. – С. 11–25.

36. Куницкая О. А. Машинная заготовка древесины по скандинавской технологии / О. А. Куницкая, Н. А. Чернуцкий, М. В. Дербин, С. Е. Рудов, И. В. Григорьев, О. И. Григорьева. – СПб. : Издательско-полиграфическая ассоциация высших учебных заведений, 2019. – 192 с.

37. Григорьев И. В. Перспективные направления развития технологических процессов лесосечных работ / И. В. Григорьев, О. И. Григорьева, А. И. Никифорова, В. М. Глуховский // Труды БГТУ. Сер.: Лесная и деревообрабатывающая промышленность. – 2016. – № 2 (184). – С. 109–116.

38. Григорьев И. В. Перспективы модульных систем машин для лесозаготовительного производства в Якутии / И. В. Григорьев, М. Ф. Григорьев, Д. И. Степанова // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. – 2017. – Т. 5, № 9 (35). – С. 74–77.

39. Мохирев А. П. Совершенствование конструкции полноповоротных лесозаготовительных машин на экскаваторных базах / А. П. Мохирев, И. В. Григорьев, О. А. Куницкая, О. И. Григорьева, С. А. Войнаш // Строительные и дорожные машины. – 2018. – № 6. – С. 43–49.

40. Григорьев И. В. Перспективные направления опытно-конструкторских работ в лесном машиностроении / И. В. Григорьев, О. А. Куницкая // Повышение эффективности лесного комплекса : материалы третьей Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием. – 2017. – С. 53–56.



41. Григорьева О. И. Лесопожарные транспортно-технологические комплексы на базе колесных форвардеров / О. И. Григорьева, О. И. Гринько, Ф. В. Николаева // Транспортные и транспортно-технологические системы : материалы Междунар. науч.-техн. конф. / отв. редактор Н. С. Захаров. – Тюмень, 2021. – С. 55–58.
42. Григорьев И. В. Эффективное использование погрузочной техники на лесных складах / И. В. Григорьев, О. А. Куницкая // Энергия: экономика, техника, экология. – 2021. – № 6. – С. 42–57.
43. Григорьев И. В. Совершенствование конструкции активного полуприцепа форвардера на базе сельскохозяйственного колесного трактора / И. В. Григорьев, А. А. Чураков // Транспортные и транспортно-технологические системы : материалы Междунар. науч.-техн. конф. / отв. ред. Н. С. Захаров. – 2018. – С. 84–88.
44. Григорьев И. В. Лесозаготовительные машины на экскаваторной базе / И. В. Григорьев, О. И. Григорьева // Повышение эффективности лесного комплекса : материалы IV Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием. – 2018. – С. 45–46.
45. Rudov S. E. Theoretical approaches to logging trail network planning: increasing efficiency of forest machines and reducing their negative impact on soil and terrain / S. E. Rudov, A. M. Voronova, J. M. Chemshikova, E. V. Teterevleva, I. N. Kruchinin, Yu. Zh. Dondokov, M. N. Khaldeeva, I. A. Burtseva, V. V. Danilov, I. V. Grigorev // Asian Journal of Water, Environment and Pollution. – 2019. – Vol. 16, No. 4. – P. 61–75.
46. Добрецов Р. Ю. Пути улучшения управляемости лесных и транспортных гусеничных машин / Р. Ю. Добрецов, И. В. Григорьев, А. М. Газизов // Вестник Башкирского государственного аграрного университета. – 2017. – № 3 (43). – С. 97–106.
47. Рудов С. Е. Пути повышения эффективности работы систем машин для сортиментной заготовки древесины / С. Е. Рудов, И. В. Григорьев //

Повышение эффективности лесного комплекса : материалы Седьмой Всерос. нац. науч.-практ. конф. с междунар. участием. – Петрозаводск, 2021. – С. 168–169.

48. Григорьев И. В. Снижение отрицательного воздействия на почву колесных трелевочных тракторов обоснованием режимов их движения и технологического оборудования / И. В. Григорьев. – СПб. : ЛТА, 2006. – 236 с.

49. Григорьев И. В. Средащадящие технологии разработки лесосек в условиях Северо-Западного региона Российской Федерации : научное издание / И. В. Григорьев, А. И. Жукова, О. И. Григорьева, А. В. Иванов. – СПб. : Изд-во ЛТА, 2008. – 176 с.

50. Рудов С. Е. Инновационные направления научных исследований в лесопользовании / С. Е. Рудов, В. В. Швецова // Современные инновации: фундаментальные и прикладные исследования : сб. науч. трудов по материалам VIII Междунар. науч.-практ. конф. – 2018. – С. 6–9.

51. Михайлова Л. М. Перспективы систем машин на базе средств малой механизации для малообъемных лесозаготовок и лесохозяйственных работ / Л. М. Михайлова, О. А. Куницкая, А. И. Мотовилов // Стратегия и перспективы развития агротехнологии и лесного комплекса Якутии до 2050 года : сб. науч. ст. по материалам Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием, посвящ. 100-летию образования Якутской АССР и 85-летию Первого президента РС(Я) М. Е. Николаева (Николаевские чтения). – 2022. – С. 735–742.

52. Григорьев И. В. Сравнение вариантов систем машин для малообъемных лесозаготовок / И. В. Григорьев, С. Л. Винокуров // Вестник АГАТУ. – 2021. – № 3 (3). – С. 51–62.

53. Григорьев И. В. Достоинства и недостатки колесной и гусеничной баз лесопромышленных тракторов / И. В. Григорьев, А. И. Никифорова, В. Ю. Лисов // Леспромформ. – 2014. – № 4 (102). – С. 82–87.

54. Вагвелди А. Выращивание и эксплуатация лесных плантаций / А. Вагвелди, Ш. Фехер, Б. Хорват [и др.] ; И. В. Григорьев, О. И. Григорьева, Д. Данилов [и др.]. – Ужгород : University of West Hungary Press, 2016. – 132 с.
55. Рего Г. Э. Алгоритм локального поиска для задачи покрытия полигона лесом корневых деревьев / Г. Э. Рего, Р. В. Воронов, И. В. Григорьев // Инженерный вестник Дона. – 2022. – № 10 (94). – С. 240–259.
56. Ильюшенко Д. А. Современные лесозаготовительные машины: анализ взаимосвязей их характеристик / Д. А. Ильюшенко, В. Б. Песков, И. В. Григорьев // Февральские чтения : сб. материалов науч.-практ. конф. профессорско-преподавательского состава Сыктывкарского лесного института по итогам науч.-исслед. работы в 2015 году. – 2016. – С. 127–130.
57. Григорьев И. В. Перспективный машинный комплекс для заготовки древесины / И. В. Григорьев, А. А. Чураков // Природные ресурсы и экология Дальневосточного региона : материалы II междунар. науч.-практ. форума. – 2017. – С. 170–175.
58. Григорьева О. И. Эффективность транспортно-технологических систем для лесного хозяйства / О. И. Григорьева // Транспортные и транспортно-технологические системы : материалы Междунар. науч.-техн. конф. / отв. ред. Н. С. Захаров. – 2018. – С. 79–83.
59. Бурмистрова О. Н. Теоретическое обоснование параметров средооадающего движителя гусеничного вездехода / О. Н. Бурмистрова, Ю. М. Чемшикова, И. В. Григорьев, О. А. Куницкая, А. А. Тамби // Системы. Методы. Технологии. – 2019. – № 3 (43). – С. 81–88.
60. Добрецов Р. Ю. Оценка энергоэффективности шасси гусеничных лесных машин / Р. Ю. Добрецов, И. В. Григорьев // Транспортные и транспортно-технологические системы : материалы междунар. науч.-техн. конф. – 2017. – С. 145–149.
61. Григорьев И. В. Перспективная конструкция гусеничного форвардера / И. В. Григорьев, А. А. Чураков, О. И. Григорьева // Транспортные и

транспортно-технологические системы : материалы междунар. науч.-техн. конф. – 2017. – С. 140–144.

62. Григорьев И. В. Перспективная конструкция вездехода для лесного хозяйства / И. В. Григорьев, А. А. Чураков, О. И. Григорьева // Транспортные и транспортно-технологические системы : материалы междунар. науч.-техн. конф. – 2017. – С. 136–139.

63. Добрецов Р. Ю. Увеличение подвижности гусеничных вездеходов для вахтовых лесозаготовок / Р. Ю. Добрецов, И. В. Григорьев, В. А. Иванов // Системы. Методы. Технологии. – 2016. – № 2 (30). – С. 114–119.

64. Добрецов Р. Ю. Взаимодействие гусеничного движителя с почвогрунтом при значительном продольном смещении центров давления / Р. Ю. Добрецов, И. В. Григорьев // Леса России: политика, промышленность, наука, образование : материалы науч.-техн. конф. – 2016. – С. 124–127.

65. Добрецов Р. Ю. Увеличение подвижности гусеничных и колесных машин / Р. Ю. Добрецов, И. В. Григорьев, С. Е. Рудов, Е. В. Тетеревлева, Ю. М. Чемшикова // Ремонт. Восстановление. Модернизация. – 2019. – № 11. – С. 4–10.

66. Тихомиров П. V. Методика последовательного анализа и определения стандартов отклонений от проектных параметров лесовозных автомобильных дорог / П. В. Тихомиров, А. В. Скрыпников, В. Г. Козлов, О. Н. Тверитнев, И. В. Григорьев // Resources and Technology. – 2022. – Т. 19, № 3. – С. 69–82.

67. Григорьев И. V. Обоснование методики оценки экологической эффективности лесопользования / И. В. Григорьев, О. И. Григорьева, А. И. Никифорова, О. А. Куницкая // Вестник КрасГАУ. – 2012. – № 6 (69). – С. 72–77.

68. Григорьев И. V. Определение энергоемкости продуктов лесопользования в рамках методики оценки экологической эффективности лесопользования / И. В. Григорьев, Е. Г. Хитров, А. И. Никифорова, О. И.

Григорьева, О. А. Куницкая // Вестник Тамбовского университета. Сер.: Естественные и технические науки. – 2014. – Т. 19, № 5. – С. 1499–1502.

69. Григорьев И. В. Особенности эксплуатации колесных лесных машин в сложных почвенно-грунтовых и рельефных условиях / И. В. Григорьев, С. Е. Рудов // Forest Engineering : материалы науч.-практ. конф. с междунар. участием. – 2018. – С. 67–71.

70. Никифорова А. И. Оценка экологической безопасности работы лесных машин / А. И. Никифорова, О. И. Григорьева, Д. С. Киселев, А. М. Хахина, М. Е. Рудов // Природные ресурсы и экология Дальневосточного региона : материалы Междунар. науч.-практ. форума. – 2013. – С. 134–138.

71. Никифорова А. И. Определение осадки при движении лесозаготовительной машины по двуслойному основанию / А. И. Никифорова, Е. Г. Хитров, А. А. Пелымский, О. И. Григорьева // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. – 2014. – № 2 (139). – С. 87–91.

72. Никифорова А. И. Экспериментальные исследования уплотнения боковых полос трасс трелевки волочащейся частью трелемной пачки лесоматериалов / А. И. Никифорова, М. Е. Рудов, О. И. Григорьева // Проблемно-ориентированные исследования: теория и практика : материалы респ. науч.-практ. конф. – Петрозаводск : Петрозаводский гос. ун-т, 2014. – С. 37–39.

73. Григорьев И. В. Поиск новых технических решений для повышения экологической совместимости лесных машин с лесной средой / И. В. Григорьев, И. И. Тихонов, О. И. Григорьева, М. Е. Рудов // Интенсификация формирования и охраны интеллектуальной собственности : материалы респ. науч.-практ. конф., посвящ. 75-летию ПетрГУ. – Петрозаводск : Петрозаводский гос. ун-т, 2015. – С. 9–11.

74. Никифорова А. И. Моделирование воздействия движителей лесных машин на почвы лесосек / А. И. Никифорова, О. И. Григорьева // Актуальные

направления научных исследований XXI века: теория и практика. – 2015. – Т. 3, № 5-4 (16-4). – С. 320–323.

75. Zhuk A. Yu. Modelling of indenter pressed into heterogeneous soil / A. Yu. Zhuk, A. M. Nahina, I. V. Grigorev, V. A. Ivanov, G. D. Gasparyan, A. Y. Manukovsky, O. A. Kunitskaya, O. K. Danilenko, O. I. Grigoreva // Journal of Engineering and Applied Sciences. – 2018. – Vol. 13, No. S8. – P. 6419–6430.

76. Измайлова В. С. Оценка успешности естественного возобновления ели после сплошных рубок в Лисинском лесничестве / В. С. Измайлова, О. И. Григорьева // Актуальные вопросы в лесном хозяйстве : материалы молодежной междунар. науч.-практ. конф. – 2017. – С. 31–34.

77. Григорьева О. И. Особенности естественного лесовосстановления в условиях криолитозоны / О. И. Григорьева // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. – 2018. – Т. 6, № 4 (40). – С. 25–29.

78. Калистратов А. В. О важности исследований экологической эффективности процесса трелевки / А. В. Калистратов, О. И. Григорьева, Г. В. Григорьев, И. Н. Дмитриева // Наука, образование, инновации в приграничном регионе : материалы респ. науч.-практ. конф. – Петрозаводск : Петрозаводский гос. ун-т, 2015. – С. 7–9.

79. До Т. А. Теоретические исследования работы лесных машин с гусеничным двигателем на склонах / Т. А. До, Г. В. Григорьев, В. А. Каляшов, А. Ю. Гурьев, О. И. Григорьева, Е. Г. Хитров // Resources and Technology. – 2022. – Т. 19, № 3. – С. 1–29.

80. До Т. А. Обоснование технологических параметров, связанных с тягово-сцепными свойствами гусеничной машины, работающей на склонах / Т. А. До, Н. И. Злобина, В. А. Каляшов, Д. В. Новгородов, О. И. Григорьева, Е. Г. Хитров // Деревообрабатывающая промышленность. – 2022. – № 2. – С. 3–12.

81. Хитров Е. Г. Сравнение показателей взаимодействия с грунтом и проходимости колесных и колесно-гусеничных движителей / Е. Г. Хитров, Е. В. Котенев // *Resources and Technology*. – 2019. – Т. 16, № 4. – С. 1–24.
82. Беляева Н. В. Влияние рубок ухода разной интенсивности на общую производительность ельников кисличных / Н. В. Беляева, О. И. Григорьева, Т. А. Ищук // *Системы. Методы. Технологии*. – 2011. – № 3 (11). – С. 140–148.
83. Беляева Н. В. Влияние рекреационной нагрузки на развитие подроста древесных пород в городском парке "Сосновка" / Н. В. Беляева, О. И. Григорьева, Е. Н. Кузнецов // *Аграрный научный журнал*. – 2014. – № 9. – С. 6–11.
84. Рудов С. Е. Результаты экспериментальных исследований влияния температуры почвогрунтов криолитозоны на их физико-механических свойства / С. Е. Рудов, В. Я. Шапиро, И. В. Григорьев, О. А. Куницкая, О. И. Григорьева, Т. Н. Стородубцева // *Лесотехнический журнал*. – 2020. – Т. 10, № 4 (40). – С. 197–207.
85. Новиков М. С. Методика и аппаратура экспериментальных исследований динамики температур слоев лесного почвогрунта криолитозоны / М. С. Новиков, О. А. Куницкая, С. Е. Рудов, В. А. Каляшов // *Стратегия и перспективы развития агротехнологии и лесного комплекса Якутии до 2050 года : сб. науч. ст. по материалам Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием, посвящ. 100-летию образования Якутской АССР и 85-летию Первого президента РС(Я) М. Е. Николаева (Николаевские чтения)*. – 2022. – С. 760–767.
86. Хитров Е. Г. Подбор допустимого давления движителя колесных лесных машин в зависимости от грунтовых условий / Е. Г. Хитров, И. И. Фролов // *Сборник статей по материалам научно-технической конференции института технологических машин и транспорта леса по итогам научно-*

исследовательских работ 2018 года / отв. ред. В. А. Соколова. – 2019. – С. 90–100.

87. Khitrov E. Comparing approaches of calculating soil pressure of forestry machines / E. Khitrov, A. Andronov, D. Iliushenko, E. Kotenev // 19th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2019 : conference proceedings. Soils; forest ecosystems. – Sophia, 2019. – P. 649–656.

88. Хитров Е. Г. Анализ составляющих глубины колеи, образующейся под воздействием движителя лесной машины на почвогрунт / Е. Г. Хитров // Resources and Technology. – 2019. – Т. 16, № 4. – С. 76–93.

89. Ivanov V. Theoretical model for evaluation of tractive performance of forestry machine's wheel / V. Ivanov, M. Stepanishcheva, E. Khitrov, D. Iliushenko // 18th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2018 : conference proceedings. – 2018. – P. 997–1004.

90. 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. Викторov, Ю.А. Карасев [и др.]; заявитель Федеральное государственное казенное учреждение "12 Центральный научно-исследовательский институт" Министерства обороны Российской Федерации.

91. Хитров Е. Г. Модель для оценки радиальной деформации колеса лесной машины с учетом деформации почвогрунта / Е. Г. Хитров, И. В. Григорьев, В. А. Макуев, А. М. Хахина, С. Ю. Калинин // Вестник Московского государственного университета леса - Лесной вестник. – 2015. – Т. 19, № 6. – С. 87–90.

92. Шапиро В. Я. Моделирование уплотнения почвогрунта в боковых полосах трелевочного волока с учетом изменчивости трассы движения / В. Я. Шапиро, И. В. Григорьев, Д. В. Лепилин, А. И. Жукова // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. – 2010. – № 6 (111). – С. 61–64.



93. Григорьев И. В. Расчет показателей процесса уплотнения почвогрунта при трелевке пачки хлыстов / И. В. Григорьев, В. А. Макуев, В. Я. Шапиро, М. Е. Рудов, А. И. Никифорова // Вестник Московского государственного университета леса - Лесной вестник. – 2013. – № 2. – С. 112–118.
94. Хитров Е. Г. Исследование экологичности и вопросы сертификации движителей лесных машин / Е. Г. Хитров, Е. В. Котенев, А. В. Андронов, С. А. Чжан, В. А. Никифорова // Системы. Методы. Технологии. – 2020. – № 2 (46). – С. 100–105.
95. Хитров Е. Г. Линейные функции коэффициентов сопротивления движению и сцепления движителей лесных машин с грунтом / Е. Г. Хитров, Д. А. Ильюшенко, Е. К. Ермакова // Научно-техническая конференция по итогам научно-исследовательских работ 2019 года : сб. ст. по материалам конф. / отв. ред. В. А. Соколова. – 2020. – С. 88–94.
96. Хитров Е. Г. Расчет касательного напряжения с учетом снижения удельного сцепления лесного грунта при буксовании движителя / Е. Г. Хитров, Д. А. Ильюшенко, Е. К. Ермакова // Научно-техническая конференция по итогам научно-исследовательских работ 2019 года : сб. ст. по материалам конф. / отв. ред. В. А. Соколова. – 2020. – С. 105–110.
97. Шэнь Ю. Принципы построения шасси экстремальной проходимости для эксплуатации в лесном комплексе / Ю. Шэнь, М. Б. Москаленко, Р. Ю. Добрецов // Повышение эффективности лесного комплекса : материалы Восьмой Всерос. нац. науч.-практ. конф. с междунар. участием. – Петрозаводск, 2022. – С. 208–209.
98. Кузнецов Д. А. Вально-планетарный трансформирующий механизм для лесных и транспортных машин / Д. А. Кузнецов, Р. Ю. Добрецов // Повышение эффективности лесного комплекса : материалы Восьмой Всерос. нац. науч.-практ. конф. с междунар. участием. – Петрозаводск, 2022. – С. 92–94.

99. Куницкая О. А. Проактивный сервис для лесных машин / О. А. Куницкая // Повышение эффективности лесного комплекса : материалы Шестой Всерос. нац. науч.-практ. конф. с междунар. участием. – Петрозаводск, 2020. – С. 86–87.
100. Григорьев И. В. Применение мобильных технологий для мониторинга, контроля и управления процессами сервиса лесных машин / И. В. Григорьев, О. А. Куницкая, Н. Л. Фам // Инновации в химико-лесном комплексе: тенденции и перспективы развития : сб. материалов Всерос. науч.-практ. конф. / отв. ред. Ю. А. Безруких, Е. В. Мельникова. – 2020. – С. 143–146.
101. Григорьев И. В. Особенности эксплуатации лесных машин в сильные морозы / И. В. Григорьев // Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности : материалы междунар. науч.-техн. конф. молодых ученых / гл. ред. И. С. Сазонов. – 2018. – С. 102.
102. Григорьев И. В. Модернизация системы контроля давления в шинах лесных и сельскохозяйственных машин / И. В. Григорьев, О. А. Куницкая, Ю. В. Ланских, С. Ю. Сандаков, А. А. Просужих, С. Е. Рудов // Ремонт. Восстановление. Модернизация. – 2021. – № 2. – С. 21–30.
103. Григорьев И. В. Перспективы использования систем контроля давления в шинах лесных и сельскохозяйственных машин / И. В. Григорьев, А. А. Просужих, С. Е. Рудов // Машиностроение: новые концепции и технологии : материалы Всерос. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. – Красноярск, 2020. – С. 40–45.
104. Григорьев И. В. Актуальные проблемы лесозаготовительного производства в России на рубеже 2022 года / И. В. Григорьев, О. А. Куницкая, Н. Л. Беляев // Комплексные вопросы аграрной науки и образования : сб. науч. ст. по материалам Внутривуз. науч.-практ. конф., посвящ. 65-летию Высшего аграрного образования Республики Саха (Якутия) и Всерос. студенческой науч.-практ. конф. с междунар. участием в рамках «Северного форума – 2021». – 2021. – С. 265–271.

105. Куницкая О. А. Проблемы повышения качества отечественного лесного машиностроения / О. А. Куницкая, В. А. Макуев, Т. Н. Стородубцева, Г. А. Калита, С. И. Ревяко, Р. С. Тимохов // Системы. Методы. Технологии. – 2022. – № 4 (56). – С. 57–63.
106. Григорьев И. В. Совершенствование конструкции валочно-пакетирующей машины / И. В. Григорьев, И. И. Тихонов, А. И. Никифорова, О. И. Григорьева // Леса России в XXI веке : материалы девятой междунар. науч.-техн. интернет-конф. – 2012. – С. 53–56.
107. Григорьев И. В. Сравнение одномашинных комплексов для сортиментной заготовки древесины / И. В. Григорьев, А. И. Никифорова, О. И. Григорьева // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. – 2015. – Т. 3, № 9-2 (20-2). – С. 125–128.
108. Григорьев И. В. Перспективы создания лесозаготовительных комплексов на базе отечественных строительных и сельскохозяйственных машин / И. В. Григорьев, О. А. Куницкая, А. А. Просужих, А. Б. Давтян, С. Е. Рудов // Ремонт. Восстановление. Модернизация. – 2020. – № 10. – С. 3–10.
109. Гуревич А. М. Конструкция тракторов и автомобилей / А. М. Гуревич, А. К. Болотов, В. И. Судницын. – М. : Агропромиздат, 1989. – 368 с.
110. Рудов М. Е. Экологические и лесоводственные аспекты работы лесных машин в лесах криолитозоны / М. Е. Рудов, О. А. Куницкая, М. Ф. Григорьев, Д. И. Степанова, А. И. Григорьева // Актуальные проблемы лесного комплекса. – 2020. – № 57. – С. 14–17.
111. Рудов С. Е. Теоретические исследования экологической совместимости колесных лесных машин и мерзлотных почвогрунтов лесов криолитозоны / С. Е. Рудов, О. А. Куницкая // Транспортные и транспортно-технологические системы : материалы Междунар. науч.-техн. конф. / отв. ред. Н. С. Захаров. – 2020. – С. 323–326.
112. Rudov S. E. Specific features of accounting of state of the massive of the frozen soil grounds under cyclic loads / S. E. Rudov, I. V. Grigorev, O. A.

Kunickaya, V. P. Druzyanova, A. K. Ivanov, M. K. Okhlopkova, V. Y. Pankov, A. S. Pekhutov, A. P. Ivanov, R. G. Borovikov // *Bulgarian Journal of Agricultural Science*. – 2019. – Vol. 25, No. Suppl. 2. – P. 191–205.

113. Rudov S. The mathematical model of forestry machines impact on cryolitozone forest soils / S. Rudov, O. Kunickaya, I. Grigorev, A. Burgonutdinov, I. Kruchinin, A. Prosuzhih, N. Dolmatov, N. Dmitrieva // *Asian Journal of Water, Environment and Pollution*. – 2020. – Vol. 17, No. 4. – P. 89–95.

114. Рудов С. Е. Исследование процесса разрушения мерзлых и оттаивающих почвогрунтов при воздействии трелевочной системы / С. Е. Рудов, В. Я. Шапиро, И. В. Григорьев, О. А. Куницкая, О. И. Григорьева // *Известия высших учебных заведений. Лесной журнал*. – 2020. – № 2 (374). – С. 101–117.

115. Рудов С. Е. Особенности контактного взаимодействия трелевочной системы с мерзлым почвогрунтом / С. Е. Рудов, В. Я. Шапиро, И. В. Григорьев, О. А. Куницкая, О. И. Григорьева // *Известия высших учебных заведений. Лесной журнал*. – 2019. – № 1 (367). – С. 106–119.

116. Григорьев Г. В. Проблемы и перспективы лесозаготовительного производства в условиях районов распространения вечной мерзлоты / Г. В. Григорьев, И. Н. Дмитриева, И. В. Григорьев, В. А. Каляшов, С. Е. Рудов, В. А. Иванов // *Системы. Методы. Технологии*. – 2021. – № 3 (51). – С. 59–67.

117. Перспективность дальнейших исследований по совершенствованию гусеничных лесных машин / Ю. А. Карасев, В. А. Марков, А. С. Дмитриев [и др.] // *Resources and Technology*. – 2023. – Т. 20, № 1. – С. 42–86. – DOI: 10.15393/j2.art.2023.6703. – EDN MZDATQ.

118. Балихин В. В. Технология ремонта машин и оборудования : учебник для вузов / В. В. Балихин, В. В. Быков, Н. Ю. Иванов. – СПб. : СПбГЛТА, 2006. – 524 с.

119. Марков В. А. Определение вероятности безотказной работы балансира гусеничного трактора / В. А. Марков, Ю. А. Карасев, Д. А. Попова // *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. – СПб. : СПбГЛТУ, 2023. – С. 190–195.

120. 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.

121. Марков А. Н. Повышение долговечности подшипниковых узлов лесных машин применением композиционных материалов / А. Н. Марков. – СПб. : ЛТА, 1996. – 160 с.

122. Марков В. А. Определение вероятности безотказной работы балансира гусеничного трактора / В. А. Марков, Ю. А. Карасев, Д. А. Попова // 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. – СПб. : СПбГЛТУ, 2023. – С. 190–195.

123. Кламанн Д. Смазки и родственные продукты. Синтез. Свойства. Применение. Международные стандарты / Д. Кламанн ; пер. с англ. ; под ред. Ю. С. Заславского. – М. : Химия, 1988. – 488 с.

124. Бреки А. Д. Влияние смазочного композиционного материала с наночастицами диселенида вольфрама на трение в подшипниках качения / А. Д. Бреки, В. В. Медведева, Ю. А. Фадин [и др.] // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2015. – № 11-1. – С. 171–180.

125. Смазочные материалы; антифрикционные и противоизносные свойства; методы испытаний : справочник / под ред. Р. М. Матвеевского, В. Л. Лашхи, И. А. Буяновского [и др.]. – М. : Машиностроение, 1989. – 224 с.

126. Бреки А. Д. Особенности процесса трения скольжения стали Р6М5 по стали 45 в условиях смазки Литол-24, модифицированной частицами MoS<sub>2</sub> / А. Д. Бреки, С. Г. Чулкин, А. Е. Гвоздев, А. Г. Колмаков // Деформация и разрушение материалов. – 2021. – № 11. – С. 34–40.
127. Киреев В. В. Строение и термоокислительные превращения полиметилсилсесквиоксанов / В. В. Киреев, Б. И. Дьяченко, В. П. Рыбалко // Высокомолекулярные соединения. Сер. А. – 2008. – Т. 50, № 4. – С. 614–624.
128. Рыбалко В. П. Термоокислительная устойчивость полиметилсилсесквиоксанов на основе олигомеров, синтезированных в присутствии хлоридов металлов / В. П. Рыбалко, Б. И. Дьяченко, Е. И. Писаренко, В. В. Киреев // Пластические массы. – 2010. – № 4. – С. 30–34.
129. Постнова И. В. Одностадийный синтез монолитного макропористого полиметилсилсесквиоксана, абсорбирующего нефть / И. В. Постнова, Ю. А. Щипунов // Коллоидный журнал. – 2015. – Т. 77, № 2. – С. 262.
130. Смирнова О. А. Синтетический серпентинит / О. А. Смирнова, А. В. Кривоногова // Современные тенденции развития науки и технологий. – 2016. – № 7-1. – С. 31–33.
131. Бреки А. Д. Триботехнические свойства модифицированных смазочных масел : дис. ... канд. техн. наук : 05.02.04 / Бреки Александр Джалюльевич. – СПб., 2011. – 161 с.
132. Бреки А. Д. Противоизносные свойства пластичных смазочных композиционных материалов «Литол 24 - частицы гидросиликатов магния» / А. Д. Бреки, В. В. Медведева, Н. А. Крылов [и др.] // Материаловедение. – 2017. – № 3. – С. 38–42.
133. Бреки А. Д. Особенности трения скольжения стали Р6АМ5 по стали Ст3 в среде смазочного масла М14Г2ТС с присадкой порошка гидросиликата магния / А. Д. Бреки, С. Г. Чулкин, А. Е. Гвоздев, А. Г. Колмаков, А. М. Кузьмин // Деформация и разрушение материалов. – 2021. – № 8. – С. 30–36.

134. Бреки А. Д. Закономерности трения скольжения стали 35 по бронзе БРАЖ9-4 в среде смазочного масла с дисперсными частицами гидросиликата магния / А. Д. Бреки, С. Г. Чулкин, А. Е. Гвоздев, А. Г. Колмаков, С. Н. Кутепов // Материаловедение. – 2021. – № 7. – С. 13–20.
135. Mahadik D. B. Monolithic and shrinkage-free hydrophobic silica aerogels via new rapid supercritical extraction process / D. B. Mahadik, Y. K. Lee, N. K. Chavan, S. A. Mahadik, H. H. Park // The Journal of Supercritical Fluids. – 2016. – Vol. 107. – P. 84–91.
136. Jia X. Waterproof MXene-decorated wood-pulp fabrics for high-efficiency electromagnetic interference shielding and Joule heating / X. Jia, B. Shen, L. Zhang, W. Zheng // Composites Part B: Engineering. – 2020. – Vol. 198. – P. 108250.
137. Kavale M. S. Optically transparent, superhydrophobic methyltrimethoxysilane based silica coatings without silyating reagent / M. S. Kavale, D. B. Mahadik, V. G. Parale, P. B. Wagh, S. C. Gupta, A. V. Rao, H. C. Barshilia // Applied Surface Science. – 2011. – Vol. 258, No. 1. – P. 158–162.
138. Lermontov S. A. Hierarchical highly porous composite ceramic material modified by hydrophobic methyltrimetoxysilane-based aerogel / S. A. Lermontov, V. M. Buznik, N. A. Sipyagina [et al.] // Journal of Porous Materials. – 2021. – P. 1–8.
139. Лермонтов С. А. Сравнительный анализ характеристик супергидрофобных эластичных полиметилсилсесквиоксановых аэрогелей, полученных при атмосферном давлении и в сверхкритических условиях / С. А. Лермонтов, А. Н. Малкова, А. А. Колмакова [и др.] // Деформация и разрушение материалов. – 2022. – № 8. – С. 15–22.
140. Закономерности изменения триботехнических свойств смазочного слоя в зависимости от содержания в нём микрочастиц МТМС аэрогеля / А. Д. Бреки, Ю. А. Карасев, В. А. Марков [и др.] // Материаловедение. – 2024. – № 11. – С. 19–28.

141. Триботехнические свойства смазочных композиций с добавками МТМС аэрогеля и серпентинита для балансира лесозаготовительного трактора / Ю. А. Карасев, В. А. Марков, А. Д. Бреки [и др.] // Системы. Методы. Технологии. – 2024. – № 3 (63). – С. 122–130.
142. Карасев Ю. А. Серпентинит, как минеральная альтернатива синтетическим присадкам / Ю. А. Карасев, В. А. Марков, А. А. Гаузе // Научный потенциал молодежи и технический прогресс : материалы VII Всерос. науч.-практ. конф., Санкт-Петербург, 15 мая 2024 года. – СПб. : ИП Жукова Е.В., 2024. – С. 63–64.
143. Макаренко Н.Г. Технологическое обеспечение и повышение ресурса деталей машин на основе электрохимикомеханической обработки: дис. ... докт. техн. наук : 05.02.08 / Макаренко Николай Григорьевич. – Омск, 2012. – 354 с.
144. 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.
145. Проников А. С. Надежность машин / А. С. Проников. – М. : Машиностроение, 1978. – 592 с.
146. Полюшкин Н. Г. Основы теории трения, износа и смазки : учеб. пособие / Н. Г. Полюшкин. – Красноярск : Краснояр. гос. аграр. ун-т, 2013. – 192 с.
147. Марков В. А. Повышение долговечности подвижных сопряжений ходовой части лесных машин при ремонте с применением композиционных материалов : дис. ... канд. техн. наук : 05.21.01 / Марков Виктор Александрович. – СПб., 2010. – 131 с.
148. 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.

149. Ящерицын П. И. Планирование эксперимента в машиностроении / П. И. Ящерицын, Е. И. Махаринский. – Минск : Вышэйш. шк., 1985. – 286 с.

150. Барвинок В. А. Математическое планирование эксперимента в производстве летательных аппаратов : учеб. пособие / В. А. Барвинок, П. А. Бордаков. – Куйбышев : КАИ, 1990. – 64 с.

151. Новик Ф. С. Оптимизация процессов технологии металлов методами планирования экспериментов / Ф. С. Новик, Я. Б. Арсов. – М. : Машиностроение, 1980. – 304 с.

152. Белов В. В. Разработка программно-алгоритмического средства обработки данных трехфакторного планированного эксперимента с целью расчета статистически адекватной математической модели прочности бетона / В. В. Белов, И. В. Образцов // Инновации и моделирование в строительном материаловедении и образовании : сб. науч. трудов, Тверь, 28 октября 2014 года / под общ. ред. В. В. Белова. – Тверь : Тверской гос. техн. ун-т, 2015. – С. 9–16.

153. Вишторский Е. М. Оптимизация рецептурно-технологических параметров пенобетона нормального твердения с использованием математического трёхфакторного планированного эксперимента / Е. М. Вишторский, А. В. Назарова, С. В. Сороканич // Сборник научных трудов Донбасского государственного технического университета. – 2019. – № 14 (57). – С. 71–77.

154. Любимый Н. С. Обеспечение требуемой шероховатости поверхностей изделий из металлополимера наполненного алюминием при обработке шлифованием / Н. С. Любимый, М. С. Чепчуров, Е. Э. Аверченкова // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2017. – № 1. – С. 162–169.

155. Бабешко М. В. Обеспечение требуемой шероховатости поверхностей изделий из металлополимера наполненного алюминием при обработке шлифованием / М. В. Бабешко // Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова, Белгород, 01–20 мая 2019 года. – Белгород : Белгородский гос. технол. ун-т им. В.Г. Шухова, 2019. – С. 1391–1405.
156. Братчун В. И. Проектирование состава влажного асфальтополимер-шлакобетона, характеризующегося оптимальным сочетанием коагуляционно-кристаллизационных контактов / В. И. Братчун, В. В. Жеванов, Е. А. Ромасюк [и др.] // Вестник Донбасской национальной академия строительства и архитектуры. – 2021. – № 1 (147). – С. 15–26.
157. Зимин Д. В. Закономерности изменения триботехнических свойств пластичных смазочных материалов, содержащих популяции микроорганизмов : дис. ... канд. техн. наук : 2.5.3. / Зимин Денис Викторович. – СПб., 2024. – 156 с.
158. Тютрин А. А. Математическая обработка результатов эксперимента по переработке рафинировочного шлака кремниевого производства / А. А. Тютрин, Н. В. Немчинова, В. В. Хоанг, Е. И. Савченко // Теория и технология металлургического производства. – 2022. – № 4 (43). – С. 15–22.
159. Парфенова Л. М. Кинетика твердения золошлакощелочного вяжущего / Л. М. Парфенова, Е. А. Разуева // Вестник Полоцкого государственного университета. Сер. F: Строительство. Прикладные науки. – 2019. – № 16. – С. 35–40.
160. Природопользование: ресурсы, техническое обеспечение : межвуз. сб. науч. тр. Вып. 3 / под ред. Ф. В. Пошарникова. – Воронеж : ВГЛТУ, 2007. – 420 с.
161. Лукутцова Н. П. Математические модели зависимости структурных и деформационно-прочностных свойств гипсодревесного композита от компонентного состава / Н. П. Лукутцова, А. А. Пыкин, А. А. Лукаш [и др.] //

Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2023. – № 7. – С. 17–26.

162. Евдокимов Ю. А. Планирование и анализ экспериментов при решении задач трения и износа / Ю. А. Евдокимов, В. И. Колесников, А. И. Тетерин. – М. : Наука, 1980. – 228 с.

163. Фихтенгольц Г. М. Курс дифференциального и интегрального исчисления. В 3 т. Т. 1 : учебник для вузов / Г. М. Фихтенгольц. – 16-е изд., стер. – СПб. : Лань, 2022. – 608 с.

164. Каляшов В. А. Особенности лесных почвогрунтов криолитозоны как объекта воздействия движителей лесных машин / В. А. Каляшов, И. В. Григорьев, В. А. Иванов [и др.] // Системы. Методы. Технологии. – 2023. – № 4 (60). – С. 94–101.

165. Савинов Д. Д. Свойства и режимы мерзлотных палевых почв / Д. Д. Савинов, В. И. Слепцов. – Якутск : Изд-во ЯФ СО АН СССР, 1987. – 128 с.

166. Саввинов Д. Д. Фундаментальные и прикладные мерзлотного почвоведения // Материалы Всерос. науч.-практ. конф. (с междунар. участием), посвящ. 80-летию д-ра биол. наук, акад. АН РС(Я), засл. деятеля науки РФ, проф. Саввинова Дмитрия Дмитриевича. 29-30 марта 2012 г. – Якутск : Изд. дом СВФУ, 2013. – С. 9–17.

167. Поздняков Л. К. Мерзлотное лесоведение / Л. К. Поздняков. – Новосибирск : Наука, 1986. – 190 с.

168. Константинов П. Я. О связи глубины сезонного протаивания с межгодовой изменчивостью средней годовой температуры грунтов / П. Я. Константинов, Р. Н. Аргунов, Е. Ю. Герасимов, И. С. Угаров // Криосфера Земли. – 2006. – Т. IV, № 3. – С. 15–22.

169. Лейбман М. О. Динамика слоев сезонного оттаивания пород и методика измерения его глубина в различных ландшафтах Центрального Ямала // Криосфера Земли. – 2001. – Т. V, № 3. – С. 17–24.

170. Николаев А. Н. Влияние климатических факторов и термического режима мерзлотных почв Центральной Якутии на радиальный прирост лиственницы и сосны (на примере стационара «Спасская Падь») / А. Н. Николаев, П. П. Федоров // Лесоведение. – 2004. – № 6. – С. 1–11.
171. Лоренц А. С. Исследование применения иглофилтров в составе вакуумных установок для повышения эффективности борьбы с лесными пожарами / А. С. Лоренц, И. В. Григорьев, О. И. Григорьева, П. Б. Рябухин // Системы. Методы. Технологии. – 2023. – № 4 (60). – С. 124–129.
172. Гринько О. И. Влияние лесных пожаров на лесную экосистему / О. И. Гринько, О. И. Григорьева, И. В. Григорьев // Вестник АГАТУ. – 2023. – № 3 (11). – С. 45–72.
173. Сидорова О. В. Климатический отклик деревьев лиственницы, произрастающих на верхней границе леса и надпойменной террасе в низовьях реки Индигирки / О. В. Сидорова, М. М. Нурзбаев // Основные закономерности глобальных и региональных изменений климата и природной среды в позднем кайнозоне Сибири. Вып. 1. – Новосибирск, 2002. – С. 391–401.
174. Ершов Ю. И. Особенности географии и генезиса мерзлотных почв субарктики Центральной Сибири // Материалы Всерос. науч.-практ. конф. (с междунар. участием), посвящ. 80-летию д-ра биол. наук, акад. АН РС(Я), засл. деятеля науки РФ, проф. Саввинова Дмитрия Дмитриевича. 29-30 марта 2012 г. – Якутск: Изд. дом СВФУ, 2013. – С. 113–117.
175. Кулижский С. П. Оценка физического состояния почв на основе зависимости потенциала (давления) почвенной влаги от влажности // Материалы Всерос. науч.-практ. конф. (с междунар. участием), посвящ. 80-летию д-ра биол. наук, акад. АН РС(Я), засл. деятеля науки РФ, проф. Саввинова Дмитрия Дмитриевича. 29-30 марта 2012 г. – Якутск: Изд. дом СВФУ, 2013. – С. 48–63.

176. Саввинов Д. Д. Гидротермический режим почв в зоне многолетней мерзлоты / Д. Д. Саввинов. – Новосибирск: Наука, 1976. – 254 с.
177. Григорьева О. И. Охрана труда и техника безопасности при эксплуатации иглофилтрационной установки для тушения лесных пожары / О. И. Григорьева, А. С. Лоренц, И. В. Григорьев // Безопасность и охрана труда в лесозаготовительном и деревообрабатывающем производствах. – 2023. – № 1. – С. 37–43.
178. Трушевский П. В. Правила техники безопасности при очистке лесосек от порубочных остатков / П. В. Трушевский, И. С. Должиков, О. И. Григорьева, И. В. Григорьев // Безопасность и охрана труда в лесозаготовительном и деревообрабатывающем производствах. – 2023. – № 4. – С. 10–29.
179. Трушевский П. V. Анализ технических и технологических решений очистки лесосек от порубочных остатков / П. В. Трушевский, О. А. Куницкая, И. С. Должиков, В. А. Макуев, С. И. Ревяко, О. И. Григорьева // Resources and Technology. – 2023. – Т. 20, № 4. – С. 89–138.
180. Zyryanov M. The experimental study of logging residue stock on logging sites following clear-cutting using a sorting machine system / M. Zyryanov, I. Grigorev, S. Medvedev [et al.] // International Journal of Simulation and Process Modelling. – 2023. – Vol. 1, No. 1.
181. Швецов А. С. Рациональные приемы выполнения рубок лесных насаждений универсальной лесозаготовительной машиной / А. С. Швецов, А. А. Кривошеев, И. С. Должиков [и др.] // Вестник АГАТУ. – 2024. – № 1 (13). – С. 48–65.
182. Рябухин П. Б. Повышение экологической эффективности лесозаготовительного производства в Дальневосточном федеральном округе / П. Б. Рябухин, О. А. Куницкая, В. П. Друзянова [и др.] // Деревообрабатывающая промышленность. – 2023. – № 1. – С. 28–43.

183. Герц Э. Ф. Средащадящие технологии разработки лесосек в условиях Свердловской области / Э. Ф. Герц, О. А. Куницкая, В. А. Макуев [и др.] // Деревообрабатывающая промышленность. – 2023. – № 1. – С. 52–63.
184. Рябухин П. Б. Обоснование технологических процессов и систем машин для лесосечных работ / П. Б. Рябухин, О. А. Куницкая, О. И. Григорьева // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. – 2023. – № 2 (392). – С. 88–105.
185. Куницкая О. А. Основные правила безопасной эксплуатации универсальных лесозаготовительных машин / О. А. Куницкая, А. А. Кривошеев, А. С. Швецов, О. И. Григорьева // Безопасность и охрана труда в лесозаготовительном и деревообрабатывающем производствах. – 2023. – № 6. – С. 33–42.
186. Дмитриев А. С. Экологическая безопасность лесных машин на полугусеничном ходу / А. С. Дмитриев, И. С. Должиков, О. А. Куницкая, О. И. Григорьева // Безопасность и охрана труда в лесозаготовительном и деревообрабатывающем производствах. – 2023. – № 5. – С. 44–51.
187. Gerts E. F. Forest preservation techniques in the Urals / E. F. Gerts, O. A. Kunitskaya, E. M. Runova [et al.] // International Journal of Environmental Studies. – 2023. – Vol. 80, No. 4. – P. 1055–1064.
188. Трелевочный трактор ТДТ-55, лесохозяйственный гусеничный трактор ЛХТ-55: руководство по эксплуатации. – Петрозаводск: ПО "Онежский тракторный завод", 1989. – 153 с.
189. Шиловский В. Н. Надежность лесозаготовительных машин и оборудования: учебное пособие / В. Н. Шиловский, А. В. Питухин, В. М. Костюкевич. – СПб. : Лань, 2022. – 288 с.
190. Морковина С. С. Анализ инвестиционной привлекательности предприятий холдингового типа / С. С. Морковина, А. И. Рубцова // Общество и экономическая мысль в XXI в.: пути развития и инновации :

материалы IX Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 65-летнему Юбилею филиала. – 2021. – С. 140–144.

191. Кожемякин Д. Ю. Механизмы привлечения инвестиций в лесном комплексе России / Д. Ю. Кожемякин, В. В. Манмарева, С. С. Морковина // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. – 2019. – Т. 7, № 3 (46). – С. 78–84.

192. Морковина С. С. Применение рискового подхода в анализе инвестиционной деятельности предприятий / С. С. Морковина, Т. П. Ермоленко // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. – 2018. – Т. 6, № 7 (43). – С. 356–362.

193. Морковина С. С. Инновационный потенциал предприятия: оценка и матрица возможностей / С. С. Морковина, Ю. Н. Степанова // Вестник Ростовского государственного экономического университета (РИНХ). – 2020. – № 2 (70). – С. 156–171.

194. Морковина С. С. Инструментарий оценки уровня инвестиционной привлекательности стартапов / С. С. Морковина, Е. А. Колесниченко // Эффективные HR-технологии и практики в современных компаниях России : материалы Всерос. науч.-практ. конф. (заочной) / отв. ред. Е. А. Колесниченко. – 2014. – С. 107–123.

195. Морковина С. С. Развитие механизмов инвестирования малых инновационных предприятий / С. С. Морковина, Ю. Н. Степанова // Социально-экономические явления и процессы. – 2015. – Т. 10, № 2. – С. 60–65.

196. Морковина С. С. Управление инновационным поведением предприятий малого бизнеса / С. С. Морковина, Е. А. Панявина, В. Л. Костенко // Экономическая теория, прикладная экономика и хозяйственная практика: проблемы эффективного взаимодействия : материалы Всерос. науч.-практ. конф., посвящ. 90-летию д-ра экон. наук, проф., засл. деятеля науки РСФСР,

зав. каф. полит. экономики ЯрГУ с 1970-1986 год А. И. Кащенко. – Ярославль, 2006. – С. 192–194.

197. Безрукова Т. Л. Система финансового менеджмента на предприятиях лесной отрасли / Т. Л. Безрукова, С. С. Морковина // Совершенствование управления в экономических и технологических системах : материалы регион. науч. конф. ВГЛТА / пред. редколлегии В. П. Бычков. – Воронеж, 2006. – С. 78–89.

198. Безрукова Т. Л. Сущность механизма управления инвестиционным поведением предприятий / Т. Л. Безрукова, А. Н. Борисов, С. С. Морковина, В. Л. Костенко // Место и роль России в мировом хозяйстве : сб. ст. междунар. науч.-практ. конф.: в 2 ч. – 2006. – С. 71–74.

199. Борисов А. Н. Механизмы оценки эффективности инвестиционной политики предприятий и комплексов / А. Н. Борисов, С. С. Морковина, Т. Л. Безрукова // Место и роль России в мировом хозяйстве : сб. ст. междунар. науч.-практ. конф.: в 2 ч. – 2006. – С. 82–84.

200. Бутко Г. П. Инвестирование в контекст инновационной активности / Г. П. Бутко // Конкурентоспособность субъектов хозяйствования в условиях новых вызовов внешней среды: проблемы и пути их решения : сб. материалов XX Междунар. науч.-практ. конф. / под общ. ред. Н. В. Мальцева. – 2018. – С. 51–56.

201. Мурашкин Н. В. Экономическая оценка разработки, производства и потребления лесозаготовительной техники: дис. ... д-ра экон. наук / Мурашкин Николай Васильевич. – СПб. : СПбГЛТА, 1992. – 377 с.

202. Куницкая О. А. Анализ проблем безопасности труда на предприятиях лесного профиля / О. А. Куницкая, В. А. Абрашкин // Безопасность и охрана труда в лесозаготовительном и деревообрабатывающем производствах. – 2023. – № 6. – С. 43–64.

203. Богданов А. С. Динамика статистик производственного травматизма в лесном хозяйстве / А. С. Богданов, О. А. Куницкая // Безопасность и охрана



труда в лесозаготовительном и деревообрабатывающем производствах. – 2023. – № 1. – С. 32–36.

204. Курочкин П. А. Новые подходы к проектированию лесопромышленного оборудования с учетом рисков в области безопасности и охраны труда / П. А. Курочкин, И. В. Григорьев, О. И. Григорьева // Перспективные ресурсосберегающие технологии развития лесопромышленного комплекса: материалы Междунар. науч.-практ. конф. молодых ученых и студентов. – Воронеж, 2023. – С. 72–77.

205. Курочкин П. А. Разработка новых методических подходов к проектированию специальной техники и оборудования с учетом рисков в области безопасности труда и влияния человеческого фактора (на примере инвестиционных проектов по освоению лесов) / П. А. Курочкин, И. В. Григорьев, О. И. Григорьева // Безопасность и охрана труда в лесозаготовительном и деревообрабатывающем производствах. – 2023. – № 5. – С. 20–28.

206. Григорьев И. В. Постановка задачи экономической оценки улучшения условий труда и безопасности работы операторов лесных машин / И. В. Григорьев, О. И. Григорьева // Безопасность и охрана труда в лесозаготовительном и деревообрабатывающем производствах. – 2022. – № 4. – С. 43–48.

207. Григорьев И. В. Оценка мероприятий, направленных на улучшение условий труда персонала на лесосечных и лесохозяйственных работах / И. В. Григорьев, О. И. Григорьева, А. И. Мотовилов, С. А. Серяков // Безопасность и охрана труда в лесозаготовительном и деревообрабатывающем производствах. – 2022. – № 6. – С. 51–60.

208. 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.

209. 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.

210. Особенности эксплуатации гусеничных лесных машин в криолитозоне и пути повышения ее эффективности / Ю. А. Карасев, В. М. Дьяченко, В. А. Марков [и др.] // Безопасность и охрана труда в лесозаготовительном и деревообрабатывающем производствах. – 2024. – № 3 (15). – С. 32–45.

ООО «ИНЖГЕО»

ул. Миклухо-Маклая д. 36А  
г. Москва 117279  
Телефон: (989) 972 27 90

« 16 » 05 2024 г. № 15/24/Б

«Утверждаю»  
Генеральный директор



И.Кроль

### Акт промышленной апробации

В ходе проведения эксплуатационных испытаний подвижных соединений с применением присадочных материалов, для смазки балансира трактора марки ТДТ-55 применялось трансмиссионное масло Тсп-10:

- с 2,5 % концентрацией Аэрогеля МТСМ – для 2-х осей катка;
- с 2,5 % концентрацией Серпентинита – для 2-х осей катка;
- без присадочных материалов – для 4-х осей катка.

Подшипники в паре трения использовались новые, марки 7615А.

Испытания проводились на тракторе ТДТ-55 с заводским номером 5432 в условиях реальной эксплуатации. За период наблюдений наработка трактора составила 300 моточасов.

Суммарный средний износ соединения составил:

- при применении Аэрогеля МТСМ – 0,07 мм;
- при применении Серпентинита – 0,065 мм;
- без присадочных материалов – 0,1 мм.

Механик (мастер) \_\_\_\_\_ М.Лисовенко

« 16 » 05 2024 г.

С результатами ознакомлен \_\_\_\_\_ Карасев Ю.А.