

На правах рукописи



ГОРЛОВ ИГОРЬ ВАСИЛЬЕВИЧ

**Методология эффективной эксплуатации трибоэлементов
торфяных машин**

Специальность 05.05.06 – Горные машины

Автореферат
диссертации на соискание учёной
степени доктора технических наук

Москва – 2016 г.

**Работа выполнена в ФГБОУ ВО
«Тверской государственный технический университет»**

Научный консультант:

Рахутин Максим Григорьевич

доктор технических наук, профессор, НИТУ МИСиС Горный институт, заместитель директора по научной работе и общим вопросам, кафедра «Горное оборудование, транспорт и машиностроение», доцент.

Официальные оппоненты:

Захаров Юрий Никитович

доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Московский государственный машиностроительный университет» (МАМИ), кафедра «Техника и технологии нефтегазового производства», профессор.

Михайлов Александр Викторович

доктор технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», кафедра машиностроения, профессор.

Ушаков Леонид Семёнович

доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Приокский государственный университет», кафедра «Подъемно-транспортные, строительные и дорожные машины», профессор.

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Тульский государственный университет" (ТулГУ)

Защита состоится «__» _____ 2016 г. в __ часов на заседании диссертационного совета Д212.132.15 при ФГАОУ ВПО Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Национального исследовательского технологического университета «МИСиС» и на сайте <http://misis.ru>

Автореферат разослан «__» _____ 2016г.

Ученый секретарь диссертационного совета
кандидат технических наук
профессор

Шешко Евгения Евгеньевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Россия обладает самыми большими в мире запасами торфа (175,6 млрд. т. разведанных и оцененных запасов), и только четвертое место по их добыче, этого недостаточно для решения задач, связанных с интенсификацией экономики.

В проекте «Энергетической стратегии России на период до 2035 года» предусмотрено использование местных энергетических ресурсов для повышения энергобезопасности региональных генерирующих систем с акцентом на возобновляемые источники. В большинстве регионов центра России и Сибири таким ресурсом может быть торф, увеличение использования которого, в малой энергетике, позволит решить эту задачу. Ещё одна из важнейших задач – это расширение сельскохозяйственного производства, решение которой невозможно без использования экологически чистых высокоэффективных удобрений на основе фрезерного торфа. Следовательно, в ближайшей перспективе требуется существенное увеличение объёмов добычи торфа, что невозможно без повышения эффективности использования машинотракторного парка торфяных предприятий.

Эксплуатация торфяных машин (ТМ) сезонная (добыча происходит с середины мая до конца августа в регионах центра России), процесс добычи торфа в большой мере зависит от метеорологических условий. В сезоне бывает от 40 до 60 метеоблагоприятных дней для добычи торфа (когда уборка торфа возможна). По статистическим данным более половины операций по восстановлению работоспособности торфяных машин проводится в метеоблагоприятные дни, что приводит к снижению объёма добычи торфа. Наиболее полное использование метеоблагоприятных дней обеспечивает максимальную сезонную производительность, и как следствие высокую эффективность эксплуатации ТМ.

Существенным резервом, позволяющим повысить сезонную производительность ТМ, является предотвращение отказов, которые чаще всего происходят из-за контакта рабочих органов ТМ с древесными включениями, находящимися в торфяной залежи, что в большом количестве случаев связано с повреждениями трибоэлементов (элементов торфяных машин, обладающих триботехническими свойствами). Техническое несовершенство ряда трибоэлементов ТМ, таких как детали фрикционных передач, муфт привода фрезерующих устройств, шарнирных механизмов подвески несущей системы, скребков валкователей и других, требует частых сервисных работ по поддержанию работоспособности, что в целом приводит к высокой длительности нахождения машин в обслуживании и ремонте. По данным многолетних

наблюдений среднестатистические затраты времени на восстановление работоспособности трибоэлементов составляют до 20% от производственного времени. Для разработки календарных планов работ используются устаревшие методики, которые не позволяют анализировать влияние технического состояния ТМ и периодов с неблагоприятными погодными условиями на процесс добычи, что приводит к ошибкам в сроках проведения работ по восстановлению работоспособности трибоэлементов, и как следствие – к снижению объёмов добываемого торфа.

Наиболее высокая сезонная производительность ТМ возможна при полном использовании дней с метеоблагоприятными условиями, что обеспечивается планированием работ по восстановлению работоспособности на основе анализа состояния и динамики изменения параметров трибоэлементов с учётом метеорологического прогноза.

Таким образом, разработка методологии эффективной эксплуатации трибоэлементов торфяных машин является актуальной научной проблемой.

Цель работы. Разработка методологии эффективной эксплуатации трибоэлементов торфяных машин для повышения их производительности.

Идея работы заключается в установлении индивидуальной периодичности операций по восстановлению работоспособности трибоэлементов торфяных машин с учётом изменения их технического состояния, и прогноза неблагоприятных для добычи погодных условий, что позволяет сократить продолжительность простоев из-за отказов и технического обслуживания.

Методы исследований. При выполнении диссертационной работы использовались: теория прогнозирования состояния сложных технических систем, математический аппарат теории вероятностей, теория надёжности, эксплуатационные наблюдения за работой торфяных машин, лабораторные исследования, методы математической статистики, системного анализа и моделирование с использованием информационных технологий.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Имитационная модель надёжности торфяной машины, учитывающая техническое состояние до 430 элементов и данные метеорологического прогноза, с использованием которой осуществляется анализ различных вариантов эксплуатации для выбранного периода, что позволяет наиболее полно использовать дни с метеоблагоприятными условиями, и обеспечивает максимальную сезонную производительность.
2. Обоснована методология эксплуатации торфяных машин, отличающаяся от известных систем поддержания работоспособности техники тем, что

сроки проведения, а также объем технического обслуживания и ремонтов устанавливаются с использованием имитационной модели, учитывающей данные диагностики технического состояния основных трибоэлементов и метеопрогноза благоприятных для работы дней.

3. Обобщённые зависимости производительности торфяных машин от количества трибоэлементов, наработки и количества дней с метеонеблагоприятными условиями.

Аналитически и экспериментально установлено, что при наработке уборочных машин МТФ-43 до 30 – 50% ресурса производительность пропорциональна количеству дней с благоприятными погодными условиями, при большей наработке получена корреляционная зависимость со значением коэффициента 0,5-0,8.

4. Закономерности изменения коэффициента готовности уборочной машины МТФ-43А от наработки и объёма, диагностируемых трибоэлементов, позволяющие определить их рациональное количество с учётом технического состояния и условий эксплуатации. За счёт диагностирования трибоэлементов значение коэффициента готовности может возрасти на 15-20% для машин, выработавших ресурс более чем на 50%.

5. Зависимость эффективности эксплуатации торфяных машин по критерию сезонной производительности от смещения обслуживания и ремонтов на дни с неблагоприятными погодными условиями и трудоёмкости работ по восстановлению работоспособности.

Научная новизна диссертационной работы заключается в следующем:

- разработана имитационная модель эксплуатации торфяных машин, учитывающая изменение технического состояния до 430 элементов;

- разработана методология эксплуатации торфяных машин, в которой на основе имитационного моделирования, учитывающего данные диагностики технического состояния основных трибоэлементов и метеопрогноза благоприятных для работы дней, определяются сроки проведения, а также объем технического обслуживания и ремонтов;

- разработан метод анализа надёжности торфяных машин с использованием предложенной модели и установленных по результатам экспериментов закономерностей изменения технического состояния трибоэлементов;

- предложен показатель эффективности использования метеоблагоприятных дней для добычи торфа, характеризующийся отношением количества дней добычи к количеству метеоблагоприятных дней, который позволяет оценить потенциальные возможности использования торфяных машин с точки зрения обеспечения максимальной сезонной производительности;

- на основе установленных закономерностей изменения состояния моторных масел в процессе эксплуатации выявлен перечень параметров оценки смазочных материалов энергоустановок торфяных машин, который позволяет с достаточной точностью для конкретной машины прогнозировать наработку до замены и проводить регламентные работы с учётом наступления периодов с неблагоприятными погодными условиями;

- разработана методика подбора материалов для трибоэлементов торфяных машин с улучшенными свойствами с точки зрения объёма сервисных работ, что позволяет сократить простои на обслуживание и ремонт более чем на 30%;

- разработаны новые способы восстановления работоспособности трибоузлов торфяных машин, позволяющие улучшать свойства поверхностей трения, что увеличивает их ресурс на 30-40% и снижает затраты на обслуживание и ремонт;

- предложен критерий оценки эффективности мероприятий по совершенствованию эксплуатации торфяных машин, позволяющий с помощью компьютерного эксперимента сравнивать варианты воздействия на техническое состояние торфяных машин.

Научное значение заключается в разработке метода прогнозирования эксплуатации ТМ на основе имитационного моделирования; имитационной модели надёжности торфяной машины, учитывающей техническое состояние до 430 элементов и данные метеорологического прогноза, которые обеспечивают анализ эксплуатации ТМ на интервалах времени от десяти дней до месяца; методов анализа эксплуатации торфяных машин, учитывающих данные диагностики технического состояния основных трибоэлементов и метеопрогноза благоприятных для работы дней, позволяющих определить сроки проведения, а также объем технического обслуживания и ремонтов; методик выбора параметров эксплуатации и восстановления работоспособности основных трибоэлементов ТМ, на основе которых обеспечивается наиболее эффективное использование техники в период добычи торфа.

Практическое значение работы заключается в разработке:

- методики управления надёжностью ТМ на основе анализа эксплуатации с помощью имитационных моделей, позволяющие инженерно-техническим работникам торфопредприятий выбирать наиболее эффективные пути достижения требуемой надёжности торфяных машин;

- методики расчёта периодичности операций по восстановлению работоспособности ТМ с учётом влияния индивидуального технического состояния и неблагоприятных погодных условий, обеспечивающие за счёт заложенных в

имитационную модель алгоритмов получения специалистами торфопредприятий планов-графиков проведения ТО и ремонтов для конкретных условий эксплуатации;

- методики прогнозирования наработки торфяных машин в пределах установленного интервала времени в зависимости от выбранного варианта эксплуатации, позволяющие на основе компьютерного эксперимента выбирать наиболее эффективные варианты эксплуатации с точки зрения максимальной сезонной производительности;

- методики и средства диагностирования трибоузлов торфяных машин с выбором индивидуальных диагностических параметров в зависимости от последствий отказа агрегатов, обеспечивающие специалистам по эксплуатации сбор необходимой информации для определения технического состояния ТМ;

- методики оценки эффективности использования триботехнических материалов в узлах трения торфяных машин с точки зрения сезонной производительности, которые позволяют специалистам по эксплуатации сравнивать различные варианты использования материалов в узлах трения ТМ;

- новых способов восстановления работоспособности трибоузлов ТМ, которые за счёт приобретения в процессе ремонта композиционной структуры обеспечивают повышение ресурса на 30-40% по сравнению с типовыми узлами.

Реализация результатов работы. Система анализа технического состояния, реализующая методики: «Расчёт периодичности операций по восстановлению работоспособности ТМ», «Прогнозирование наработки торфяных технологических машин в зависимости от выбранной стратегии эксплуатации», «Диагностирование узлов торфяных технологических машин с выбором индивидуальных диагностических параметров» принята к использованию в ОАО «Васильевский мох». Методики: «Расчёт периодичности операций по восстановлению работоспособности ТМ», «Прогнозирование наработки торфяных технологических машин в зависимости от выбранной стратегии эксплуатации» приняты к использованию в ООО «ДИАКАР». Методика «Оценки эффективности использования триботехнических материалов в узлах трения» внедрена на ОАО «Тверской вагоностроительный завод».

Основные научные результаты диссертации используются в учебном процессе Тверского государственного технического университета при подготовке бакалавров по направлению 151000 «Технологические машины и оборудование для разработки торфяных месторождений».

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались на научно-практической конференции «Актуальные

проблемы развития машиностроительного комплекса Тверской области» (Тверь, ТвГТУ, 2001 г.), всероссийской конференции «Перспективы развития Волжского региона» (Тверь, ТвГТУ, 2002 г.), всероссийской научной заочной конференции «Перспективы развития Волжского региона» (Тверь, ТвГТУ, 2005 г.), заседании учебно-методического совета УМО по направлению подготовки дипломированных специалистов 653300 (190600.65) Эксплуатация наземного транспорта и транспортного оборудования с приглашением вузов Европейского региона, ведущих подготовку по специальности 230100 (190603.65) Сервис транспортных и технологических машин и оборудования (по отраслям) (Тверь, ТвГТУ, 2008 г.), международной научно-практической конференции посвящённой 60-летию создания автотракторного факультета Белорусского национального технического университета (Минск, БНТУ, 2011 г.), международной заочной научно-практической конференции «Современные тенденции в науке: новый взгляд» (Тамбов 2011 г.), международных научных симпозиумах «Неделя горняка» (Москва, МГГУ, 2012-2015 г.), всероссийской научно-технической конференции «Приоритетные направления развития науки и технологии» (Тула, Тульский государственный университет 2012 г.), международной заочной научно-практической конференции «Теоретические и прикладные проблемы образования в 21 веке» (Тамбов 2012 г.), 9-й международной конференции по проблемам горной промышленности, строительства и энергетики «Социально-экономические и экологические проблемы горной промышленности, строительства и энергетики» (Минск, БНТУ, 2013г.), международной научно-технической конференции «Инновационное развитие АПК России на базе интеллектуальных машинных технологий» (Москва, ФГБНУ ВИМ, 2014 г.), III Международной научно-практической конференции «Инновации на транспорте и в машиностроении» (Санкт-Петербург, Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», 2015г.).

Публикации. Основные результаты исследований отражены в 42 научных трудах, в том числе 2-х монографиях, 14 статьях, опубликованных в научных изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки России, получены 2 патента и авторское свидетельство на программу для ЭВМ.

Структура работы. Диссертация состоит из введения, шести глав, общих выводов, списка литературы и приложений. Работа содержит 313 страниц, 118 рисунков, 23 таблицы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе проведён анализ существующих методов восстановления работоспособности технологических машин, сформулированы задачи иссле-

дования. Для постановки задач исследования был проведён анализ работ по эксплуатации торфяных, горных, строительно-дорожных и сельскохозяйственных машин. Вопросами механизации торфяного производства и надёжности ТМ занимались в своих работах Антонов В.Я., Афанасьев А.Е., Варенцов В.С., Васильев А.Н., Малков Л.М., Самсонов Л.Н., Солопов С.Г. Шпынев В.М., и др. Свой вклад в развитие теории надёжности и технического обслуживания горных машин внесли работы Галкина В.И., Гетопанова В.Н., Дмитриева В.Г., Захарова Ю.Н., Кантовича Л.И., Махно Д.Е., Михайлова А.В., Островского М.С, Подэрни Р.Ю., Радкевича Я.М., Рахутина Г.С., Рахутина М.Г., Солод Г.И., Сысоева Н.И., Ушакова Л.С., Хазановича Г.Ш., Шадрина А.И. Их работы были основаны на трудах Барзиловича Е.Ю., Барлоу Р., Беляева Ю.К., Герцбах И.Б, Гнеденко Б.В., Дружинина Г.В., Каштанова В.А., Кокса Д.Р., Кугеля Р.В., Михлина В.М., Прошана Ф., Смит В.Л., Соловьева А.Д. В области эксплуатации дорожно-строительных машин известны работы Зорина В.А., Коншина В.М., Максименко А.М., Лагерева А.В. и др., в области использования сельскохозяйственной техники Артемьева Ю.Н., Ковалёва Н.Г., Когана Б.И., Лисунова Е.А., Селиванова А.И., Черникова В.Г. и др. Исследования, проведённые специалистами многих отраслей промышленности, и разработанные на их основе методики восстановления работоспособности, не учитывают специфики эксплуатации торфяных машин, так как добыча зависит от метеорологических условий, которые оказывают определяющее значение на технологический процесс.

Технологический цикл добычи торфа фрезерным способом состоит из нескольких операций, самая длительная и ответственная из которых – сушка, она зависит от большого количества факторов: технологических, метеорологических, грунтовых и др. Большое значение имеют метеорологические факторы. В зависимости от них все дни в сезоне добычи можно условно разделить на благоприятные, когда уборка торфа возможна, и неблагоприятные – уборка невозможна.

Торфяную машину с точки зрения надёжности можно представить в виде многоуровневой системы. На верхнем уровне расположены подсистемы, выполняющие определённое назначение (несущая подсистема, технологическая подсистема и др.), далее расположены узловые подсистемы. На самом нижнем уровне находятся структурированные и неструктурированные элементы. Неструктурированные элементы это пневмо- и гидроцилиндры, генератор, компрессор и др. и структурированные – трибоэлементы, свойства которых (периодичность обслуживания, ресурс, вероятность отказа, триботехнические характеристики и др.) определяют условия эксплуатации. По данным многолет-

них наблюдений среднестатистические затраты времени на восстановление работоспособности трибоэлементов значительны, повышая их надёжность и смещая обслуживание и ремонт на дни с неблагоприятными погодными условиями можно повысить эффективность эксплуатации торфяных машин за счёт более полного использования производственного времени.

Поэтому разработка методологии эксплуатации трибоэлементов торфяных машин, обеспечивающей их высокую эффективность за счёт увеличения сезонной производительности на основе повышения надёжности и адаптации системы восстановления работоспособности к метеонеблагоприятным условиям является важной научной проблемой, для реализации которой предусмотрено решение следующих задач:

- провести анализ структуры торфяных машин для фрезерного способа добычи;
- разработать принципы построения структурных моделей надёжности торфяных машин, которые позволят на их основе анализировать изменение состояния трибоэлементов в условиях контролируемого воздействия на основные параметры эксплуатации;
- разработать имитационную модель эксплуатации торфяных машин с использованием гибридного интеллекта, позволяющую осуществлять оперативный анализ технического состояния и прогнозировать его изменение в зависимости от воздействия на трибоэлементы;
- установить закономерности изменения сезонной производительности торфяных машин от наработки и внешних факторов воздействия на технологический процесс;
- установить закономерности изменения коэффициента готовности торфяных машин от объёма диагностирования трибоэлементов, провести диагностическое исследование и осуществить проверку алгоритма управления работоспособностью ТМ в информационной среде на основе полученных результатов;
- разработать критерии подбора антифрикционных материалов с улучшенными свойствами для узлов трения торфяных машин, обеспечивающих минимизацию затрат на поддержание работоспособности в период добычи торфа;
- разработать новые способы восстановления работоспособности узлов трения ТМ, обеспечивающие получение улучшенных триботехнических свойств деталей с минимальными затратами;

- разработать комплекс экспериментального оборудования для моделирования процессов эксплуатации и восстановления работоспособности узлов торфяных машин;

- установить зависимость эксплуатационных свойств торфяных машин от триботехнических параметров узлов и разработать пути их совершенствования с точки зрения периодичности обслуживания.

Во второй главе разработана модель надёжности торфяной машины. Задача повышения эффективности эксплуатации торфяной машины была решена на примере комплексного агрегата имеющего 430 основных элементов, такая модель учитывает структуру узлов большинства ТМ, используемых при фрезерном способе добычи. На самом нижнем уровне модели находятся элементы, которые обеспечивают функционирование системы, от них зависит работоспособность технологического объекта. Для получения модели конкретной торфяной машины необходимо из модели комплексного агрегата удалить элементы, отсутствующие в ней.

Модель M технического состояния комплексного агрегата позволяет определить работоспособность ТМ в любой момент времени

$$M = \begin{cases} y^1(t) = \gamma_1(t, u_{11}(t), u_{12}(t), \dots, u_{1p}(t)) \\ y^2(t) = \gamma_2(t, u_{21}(t), u_{22}(t), \dots, u_{2p}(t)) \\ \dots \\ y^j(t) = \gamma_j(t, u_{j1}(t), u_{j2}(t), \dots, u_{jp}(t)) \end{cases}, \quad (1)$$

где: y – значение характеристики состояния i -того элемента (1 – исправен, $\emptyset$ – неисправен); γ – функция изменения состояния i -того элемента; t – наработка машины с предыдущего состояния; $u_{i\varphi}$ – элемент структурной модели описывающий свойства сопряжений (трибоэлемента) с точки зрения безотказности (может принимать значения 1 , $\emptyset$ или натурального числа – значения описывающего свойство элемента).

Структурная модель комплексного агрегата представляет собой несколько матриц M_i , состоящих из элементов $u_{i\varphi}$, связанных между собой логическими функциями.

На основе проведённых исследований надёжности торфяных машин, был сформулирован ряд основных гипотез для имитационной модели, характеризующих свойства исследуемых процессов.

Гипотеза 1. Все отказы в зависимости от последствий распределялись на три группы сложности.

Гипотеза 2. Необходимые запчасти имеются на складе торфопредприятия.

Гипотеза 3. Основные трибоэлементы разбиты на группы по значимости в зависимости от количества отказов.

Гипотеза 4. Шаг дискретизации модели один час.

В имитационной модели изменение возможности добычи торфа на отрезке времени $[t_m, t_{m+1}]$ выражается через функции

$$f^i(t_m, y^1(t_m), \dots, y^n(t_m), z^1(t_m), \dots, z^r(t_m)), \quad (2)$$

где y^n – значение функции вероятности отказа основных трибоэлементов в зависимости от наработки, z^r – простои по погодным и организационным причинам. Располагая значениями внутренних характеристик можно вычислить значения основных параметров, отвечающих за возможность осуществления технологического процесса добычи торфа при всех t_j

$$\begin{aligned} f^i(t_{m+1}) &= f^i(t_m) + \Delta t f^i(t_m, y^1(t_m), \dots, y^n(t_m), z^1(t_m), \dots, z^r(t_m)), \\ i &= 1, \dots, n, \quad m = 0, 1, \dots, T. \end{aligned} \quad (3)$$

Система (3) определяет значения характеристик элементов изучаемого процесса в дискретные моменты времени $t_m, m = 1, \dots, T$ (время функционирования машины в часах), Δt – шаг дискретизации модели.

Вероятностная модель процесса эксплуатации комплексного агрегата рассматривалась на интервалах 60 часов, так как это самый малый период обслуживания.

Вероятность совпадения событий H – ТО, ремонта и дня с неблагоприятными погодными условиями будет

$$P(H) = P(B) \times (P(C) + P(D) + P(E)) \times P(A), \quad (4)$$

где, A – проведение ТО, B – неблагоприятный для добычи день, C – отказ первой группы сложности, D – отказ второй группы сложности, E – отказ третьей группы сложности. При возможности смещения обслуживания на один день вероятность совпадения ТО и ремонтов за цикл обслуживания будет больше, так как количество дней в цикле обслуживания условно уменьшится

$$P(H) = 1,165 \times P(A) \times P(B) \times (P(C) + P(D) + P(E)). \quad (5)$$

При запуске системы анализа технического состояния ТМ оператор вводит текущую наработку $H_{\phi k}$ машины в моточасах. Если функция изменения технического состояния γ_i неизвестна, то принимается, что предельное состояние наступит при достижении установленной для данного узла среднестатистической наработки. Рассчитывается приращение наработки $\Delta H_{\phi k}$ с предыдущего момента сохранения и определяется остаточный ресурс до следующего ТО $t_{ocm.ikTO}$ и текущего ремонта $t_{ocm.ikP}$ i -того структурного трибоэлемента

$$t_{ocm.i\ k\ TO} = t_{ocm.i\ k-1\ TO} - \Delta H_{\phi k}, \quad (6)$$

$$t_{ocm.i\ k\ P} = t_{ocm.i\ k-1\ P} - \Delta H_{\phi k}. \quad (7)$$

Используя методику, не учитывающую изменение состояния объекта, в процессе эксплуатации могут возникать трудно прогнозируемые отказы, которые приводят к снижению объемов добычи торфа более чем на 15%.

В системе анализа технического состояния торфяной машины предусмотрен вариант определения остаточного ресурса по диагностируемым параметрам. При каждом диагностировании рассчитывается α_i – значение степени функции $\gamma_i = K_i t_i^\alpha$ изменения состояния диагностируемого элемента

$$\alpha_i = \frac{\ln(\Delta X_{ik+1} / \Delta X_{ik})}{\ln(t_{ik+1} / t_{ik})}, \quad (8)$$

рассчитывается остаточный ресурс i -того элемента

$$t_{ост} = \frac{\Delta t (X_{ikPP}^{1/\alpha} - \Delta X_{ik}^{1/\alpha})}{\Delta X_{ik}^{1/\alpha} - \Delta X_{ik-1}^{1/\alpha}}, \quad (9)$$

где $X_{ikPP}^{1/\alpha}$ – предельное значение диагностируемого параметра i -того трибоэлемента, $\Delta X_{ik}^{1/\alpha}, \Delta X_{ik-1}^{1/\alpha}$ – текущее и предшествующее приращения диагностируемого параметра i -того трибоэлемента, t_{ik} – время проведения измерения диагностируемого параметра.

Устанавливается коэффициент K_{ik} , определяющий интенсивность изменения параметра

$$K_{ik} = \alpha_{ik} / \alpha_{ik-1}. \quad (10)$$

В том случае если изменение диагностируемого параметра происходит быстро (при экстраполяции изменения диагностируемого параметра на интервал до следующего обслуживания достигается предельное состояние), то принимается решение о ремонте соответствующего узла.

Совмещая плановое обслуживание с текущим ремонтом и периодами с неблагоприятными погодными условиями можно повысить коэффициент использования метеоблагоприятных дней $K_{уб}$ и увеличить сезонную производительность ТМ

$$K_{уб} = \frac{N_{дооб}}{N_{ном} - N_{мнд}}, \quad (11)$$

где, $N_{дооб}$ – фактическое количество дней добычи, $N_{ном}$ – номинальный годовой фонд времени добычи торфа для центра России (110 дней), $N_{мнд}$ – количество метеонеблагоприятных дней. По данным ОАО «Васильевский мох» при 44 уборочных днях за сезон и 49 с метеонеблагоприятными условиями $K_{уб}$ для уборочных машин МТФ-43А и МТФ-43А-К был 0,72. При подконтроль-

ной эксплуатации группы машин со смещением операций ТО и ремонту на метеонеблагоприятные дни по итогам сезона 2012 года $K_{уб}$ был 0,81. По результатам компьютерного эксперимента с данными по 2012 году при смещении сервисных операций на один день $K_{уб}$ 0,83, а при смещении на два дня 0,87, что обеспечивает повышение производительности машин на 4 и 9% соответственно. При разработке плана добычи на сезон требуется определить уборочные площади месторождений и необходимое количество машин. Количество машин определяется в зависимости от их производительности с учётом коэффициента технической готовности для соответствующего типа оборудования. При этом не учитывается состояние конкретной машины, что может привести к срыву плана добычи. С помощью модели технического состояния торфяной машины на основе компьютерного эксперимента определён коэффициент готовности машин K_z^M имеющих 20, 100, 200 и 400 трибоэлементов

$$K_z^M = \frac{t_n}{t_n + \sum_{i=1}^n \tau_i}, \quad (12)$$

где t_n – наработка машины за установленный период, τ_i – время восстановления работоспособности i -го трибоэлемента с учётом ожидания ремонта. Коэффициент готовности комплексного агрегата с общей наработкой с начала эксплуатации 800 моточасов и количеством элементов 430, при наработке за сезон $t_n=420$ моточасов и суммарных затратах времени на восстановление работоспособности $\sum_{i=1}^n \tau_i = 156$ часов, полученных по результатам компьютерного эксперимента по выражению (12) будет равен

$$K_z^M = \frac{420}{420 + 156} = 0,73.$$

Анализ результатов моделирования коэффициента готовности ТМ показал, что аналитические данные соответствуют экспериментальным, отклонение от средних значений коэффициента готовности не превышает 10%.

В процессе компьютерного эксперимента учитывалось, что элементы ТМ имеют различную значимость с точки зрения безотказности. По результатам наблюдений за эксплуатацией торфяных машин было установлено, что наиболее часто происходили отказы фрикционных муфт, отказы рабочих элементов и элементов трансмиссии из-за перегрузки, а также отказы конструкций подвески технологических устройств при попадании древесных включений в торфяной залежи, отказы шарнирных механизмов подвески, отказы карданных передач, отказы подшипников качения, отказы зубчатых передач и др. Услов-

но отказы были распределены по группам и для каждой из них определён поток отказов (рис 1). Результаты исследования показывают, что большое количество отказов связано с повреждениями элементов машин древесными включениями, встречающимися в торфяной залежи, что происходит из-за несвоевременного ремонта производственных участков добычи. Но даже при полном соблюдении требований технологического процесса добычи торфа невозможно устранить влияние этой причины. Следовательно, для повышения надёжности необходимо воздействовать на элементы, отвечающие за устойчивость машины к воздействиям этих факторов. Такими элементами являются трибоэлементы, отказы которых составляют около 54% от всех отказов ТМ.

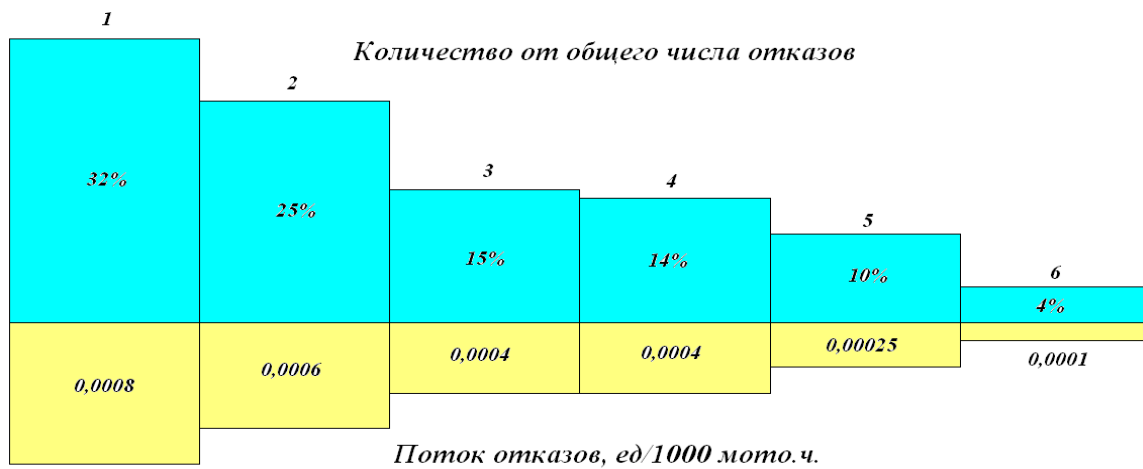


Рис. 1. Распределение отказов по группам элементов

1 – Отказы фрикционных трибоэлементов, 2 – рабочих элементов и элементов трансмиссии из-за перегрузки, 3 - отказы элементов несущей системы, 4 - антифрикционных трибоэлементов скольжения, 5 - антифрикционных трибоэлементов качения, 6 – др. элементы

На рисунке 2 показана номограмма изменения коэффициента готовности от наработки с учётом количества элементов торфяных машин, полученного на основе компьютерного эксперимента и по данным ОАО «Васильевский мох» и объединения «Калининторф». Коэффициенты готовности, полученные в процессе моделирования, несколько завышены, что объясняется влиянием объёмной пнистости на возникновение отказов. Установлено, что при наработке менее 50% от ресурса коэффициент готовности машины существенно не уменьшается и незначительно снижается с увеличением количества элементов.

При наработке машины свыше 50% ресурса коэффициент готовности снижается с ростом наработки, в том числе более интенсивно с увеличением количества элементов. Следовательно, для машин, имеющих 100 и более элементов и выработавших более 50% ресурса, коэффициент готовности необхо-

димо определять индивидуально и учитывать при разработке плана добычи фрезерного торфа.

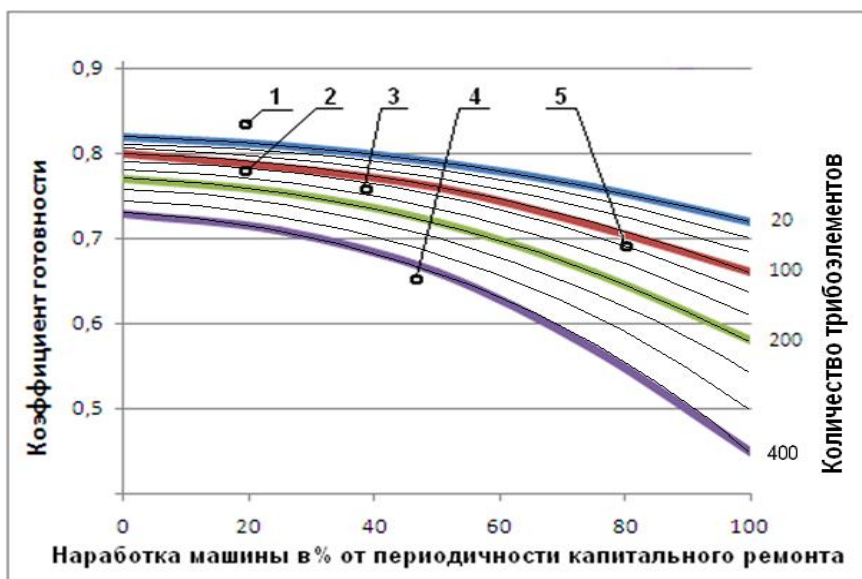


Рис. 2. Номограмма изменения коэффициента готовности от наработки машины
Точки: 1 – ВС-9,5 ($i=22$), 2 – МТФ-43А-К ($i=82$), 3 – Ф-6,500.000А ($i=108$),
4 – БПФ-3М ($i=430$), 5– МТФ-43А ($i=96$)

С помощью разработанной модели был проведён анализ сезонной производительности Q бункерных уборочных машин МТФ-43А и МТФ-43А-К

$$Q = q'((N_{ном} - N'_{мн})t_{од} - \sum_{i=1}^n \tau_i), \quad (13)$$

где q' - часовая условная производительность машины в тоннах, $N'_{мн}$ - количество метеонеблагоприятных дней не совпавших с днями ТО и ремонтов, $t_{од}$ - дневная наработка машины, τ_i - трудоёмкость восстановления работоспособности i -того элемента. Например, при общей наработке с начала эксплуатации 1000 моточасов, и 60 метеонеблагоприятных дней за сезон не совпавших с днями ТО и ремонтов, дневной наработке $t_{од}=8$ часов, часовой производительности $q'=20,46$ т/ч (при эксплуатационной производительности 1,65 га/ч и нормативном цикловом сборе 12,4 т/га) и суммарных затратах времени на ТО и ремонты за сезон $\sum_{i=1}^n \tau_i=46$ часов, производительность Q по выражению (13) будет

$$Q = 20,46((110 - 60)8 - 46) = 7243 \text{ т.}$$

На рис. 3 показано изменение сезонной производительности уборочной машины МТФ-43А-К в зависимости от наработки и количества метеонеблагоприятных дней, полученное на основе компьютерного эксперимента.

Точка 1 на рисунке 2 соответствует средней сезонной производительности уборочных машин МТФ-43А-К полученной по данным ОАО «Васильевский мох» с наработкой за сезон около 240 моточасов, точка 1' расчётная производительность при использовании всех 320 моточасов возможных за сезон (наработка с начала эксплуатации 440 моточасов). Аналогично точки 2 и 2', полученные по результатам другого сезона при наработке 280 моточасов из 424 возможных. Точки 3 и 3' получены для уборочных машин МТФ-43А при наработке за сезон около 200 моточасов из 320 возможных (наработка с начала эксплуатации 1760 моточасов).

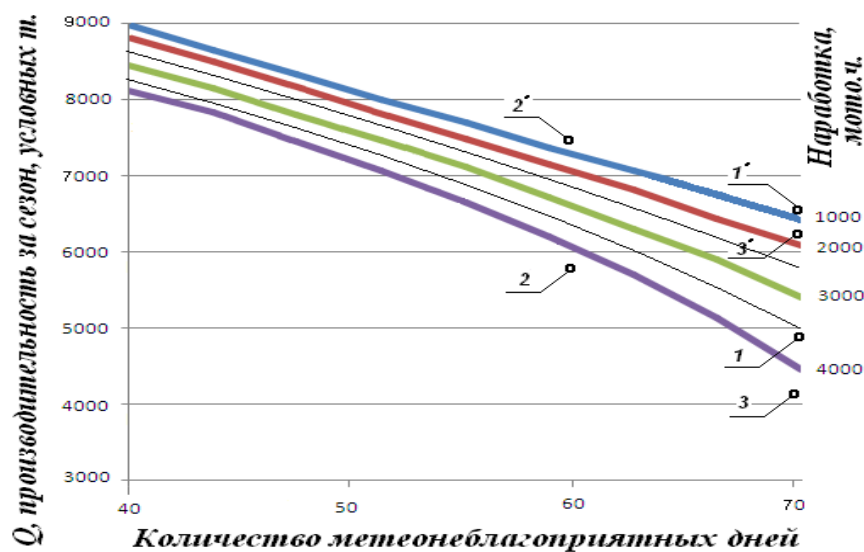


Рис. 3. Номограмма изменения сезонной производительности уборочных машин МТФ-43А-К и МТФ-43А в зависимости от количества метеонеблагоприятных дней и наработки

Исследование на модели показало, что производительность машины может изменяться от выработанного ресурса, трудоёмкости обслуживания, наступления метеонеблагоприятных условий. Для машин, выработавших менее половины ресурса, производительность обратно пропорциональна количеству метеонеблагоприятных дней. С увеличением наработки снижение производительности происходит интенсивнее. При наработке машины, близкой к сроку проведения капитального ремонта, интенсивность снижения производительности из-за уменьшения количества метеоблагоприятных дней удваивается.

Так же установлены зависимости изменения производительности уборочной машины при смещении операций по восстановлению работоспособности

на метеонеблагоприятные дни. В этом случае уменьшается время на восстановление работоспособности в метеоблагоприятные дни $\sum_{i=1}^n \tau_i$ (рис. 4).

Для трибоэлементов с трудоёмкостью работ до 4-х чел.ч. смещение сервисных работ на метеонеблагоприятные дни, как в сторону увеличения наработки, так и в сторону уменьшения от среднестатистического значения, позволяет более полно использовать метеоблагоприятные дни. Изменение сезонной производительности практически пропорционально изменению количества метеоблагоприятных дней.

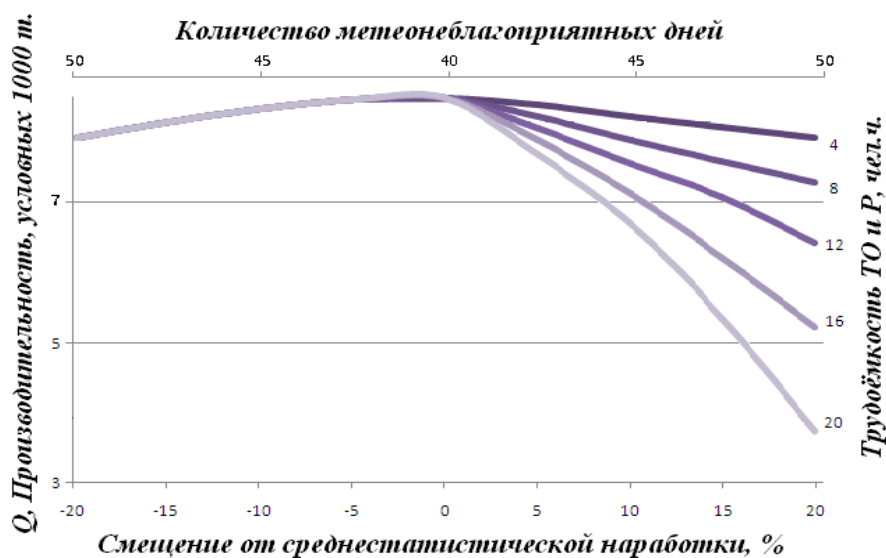


Рис. 4. Изменение производительности уборочной машины МТФ-43А-К при смещении ТО и ремонтов на метеонеблагоприятные дни и в зависимости от трудоёмкости ТО и ремонтов

Для трибоэлементов с трудоёмкостью восстановления более 4-х чел.ч. смещение сервисных работ в сторону увеличения наработки повышает вероятность трудоёмких отказов, и снижает производительность машины из-за простоев в неплановых ремонтах. Смещение трудоёмких операций по восстановлению работоспособности в сторону меньшей наработки обеспечивает более полное использование рабочего времени, при этом производительность машины пропорционально количеству метеоблагоприятных дней. Однако вместе с уменьшением наработки трибоэлементов, растут расходы на поддержание работоспособности ТМ, что требует анализа эффективности эксплуатационных затрат.

Установлено, что при наработке близкой к предельной, потери от простоев из-за увеличения количества метеонеблагоприятных дней растут до двух раз быстрее, чем для машин, выработавших менее половины ресурса.

Исследование на модели показало, что производительность машины может более чем в два раза изменяться от выработанного ресурса, трудоёмкости обслуживания, наступления метеонеблагоприятных условий и смещения обслуживания и ремонтов на метеонеблагоприятные дни, поэтому решение о воздействии на машину должно приниматься индивидуально на основе анализа результатов моделирования.

В третьей главе изложены основные направления формирования системы диагностики ТМ, обеспечивающей переход к определению технического состояния на основе анализа диагностируемых показателей и наполнения информационной базы, позволяющей оценивать взаимное влияние трибоэлементов на надёжность торфяных машин.

Исследования процесса изменения состояния трибоэлементов проводились на модели фрезерующего устройства в зависимости от наработки. Испытания проходили в три этапа по 100 часов каждый на физической модели, выполненной в масштабе 1:5, с использованием вибродиагностики.

На первом этапе исследования проводились на устройстве с новыми опорными подшипниками, на втором – с частично изношенными, а на третьем – с выработавшими ресурс подшипниками (рис.5).

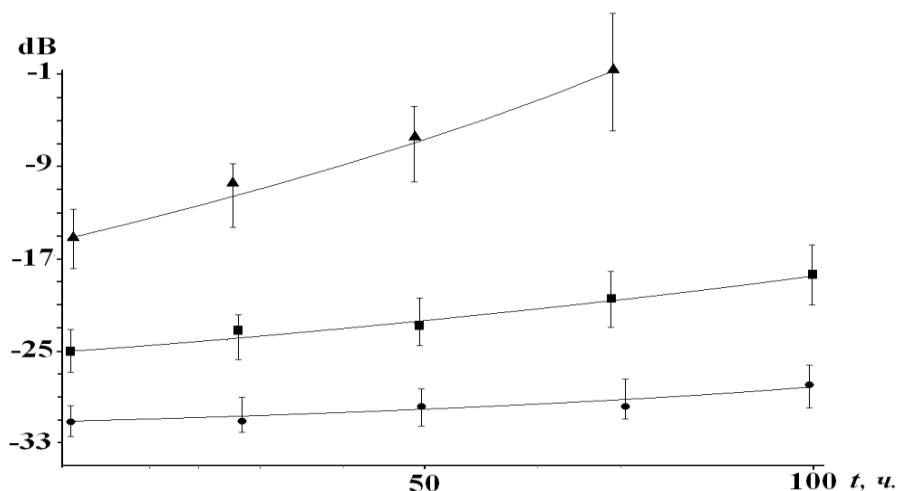


Рис. 5. Изменение виброакустического сигнала от наработки подшипников:

▲ – изношенные подшипники, ■ – частично изношенные, ● – новые

Исследования на втором и третьем этапе показали, что по мере износа подшипника возрастает амплитуда колебаний на высоких частотах, а так же растёт общий уровень виброакустического сигнала, который может быть использован для диагностики устройства. Динамика изменения виброакустического сигнала изношенных подшипников высокая, значение коэффициента K_{ik} в полтора раза превышает величину, полученную для частично изношенных

подшипников, прогнозировать остаточный ресурс с достаточной точностью в этом случае невозможно, требуется замена подшипника.

Для оценки изменения состояния моторных масел (М10ДМ – используется в двигателях СМД-18Н тракторов ДТ-75ДТХС, М8В2 – используется в двигателях Д-240 тракторов МТЗ-80, MANOL TS-3 – используется в двигателях Д-260.2-360 фронтальных погрузчиков ТКМ-250) проводились исследования кинематической вязкости, щелочного и кислотного числа, класса чистоты нефтепродукта, цвета и сульфатной зольности. Так же проводился спектральный анализ загрязнений (рис.6) и триботехнические исследования на трёхшариковой машине трения. Спектральный анализ масел показал, что большинство контролируемых параметров (механических загрязнений) за время эксплуатации торфяных машин не вышли за предельные значения. По содержанию железа видно, что двигатель трактора ДТ-75ДТХС уборочной машины МТФ-43А (используется масло М10ДМ) интенсивно нагружен и наработка до замены масла должна быть уменьшена или для сохранения установленной периодичности нужно применять более качественное масло.

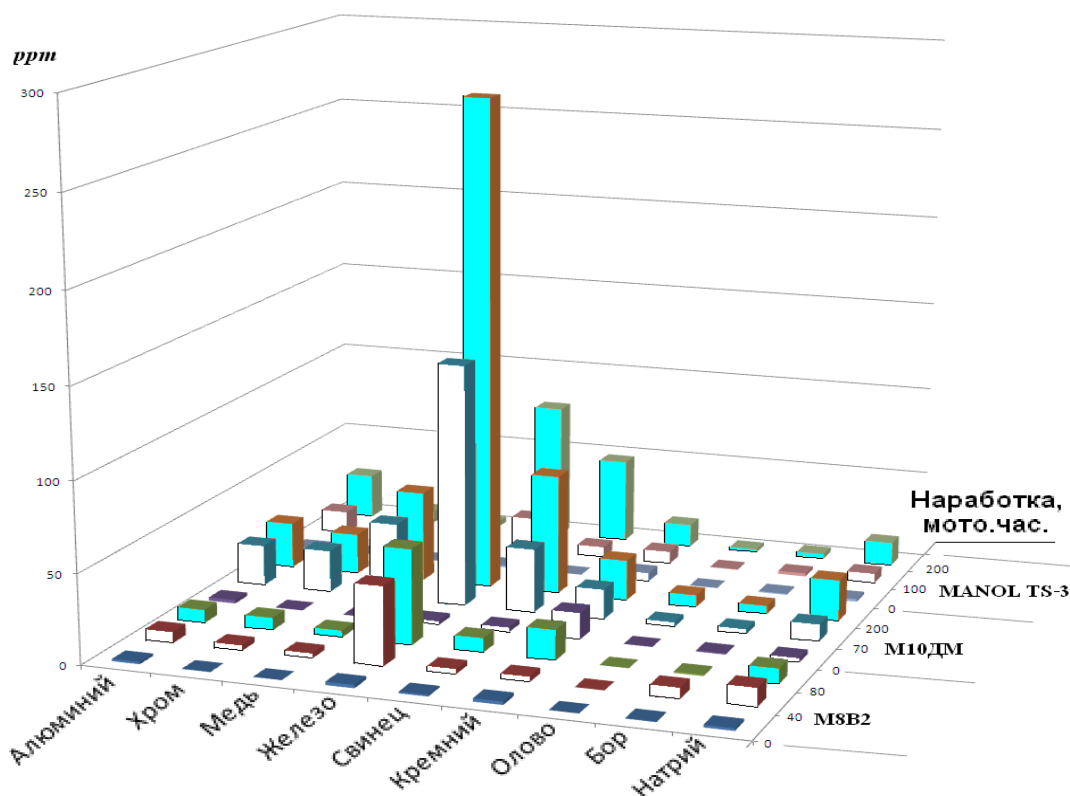


Рис. 6. Гистограмма изменения количества механических загрязнений в моторных маслах в процессе эксплуатации торфяных машин

Исследования показали, что для диагностики состояния моторных масел торфяных машин достаточно контролировать щелочное или кислотное число и содержание железных загрязнений (рис.7).

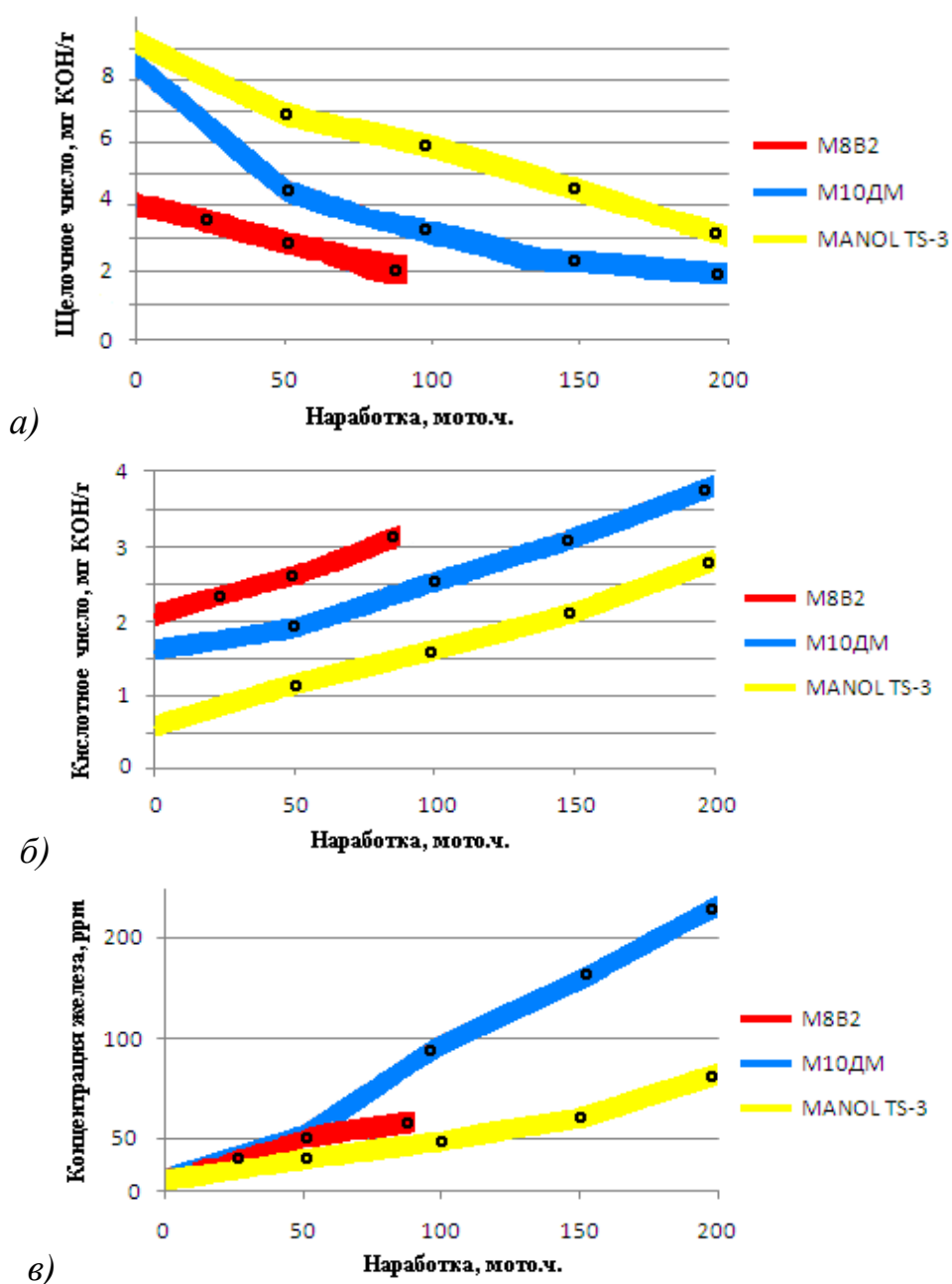


Рис. 7. Изменение щелочного числа *а)*, кислотного числа *б)*, концентрации железа *в)* в моторном масле в процессе эксплуатации

Альтернативой анализа масла по содержанию вредных примесей может стать триботехнический анализ, так как с помощью него можно определить основные параметры смазки, которые отвечают за работоспособность узлов трения. Проводились исследования на машине трения по схеме трения шар – плоскость, на шариковых инденторах диаметром 7,2 мм из стали ШХ-15 твёрдостью HRC 63, трущихся по плоскости из стали ШХ-15 такой же твёрдости с средней высотой микронеровностей поверхности 0,16 – 0,32 мкм. Нагрузка на шары составляла 60 Н, скорость скольжения 0,47 м/с (рис.8) [8]. При испытаниях на отработанном масле М10ДМ наблюдался самый большой разброс коэффициента трения, что объясняется снижением эффективности противоза-

дирных присадок. На отдельных участках рабочих поверхностей инденторов наблюдались повреждения в виде рисок глубиной от 5 до 10 мкм, характерных при возникновении задиров. Так же проводились исследования на пальчиковых образцах в условиях граничной смазки.

Контактное давление на рабочих поверхностях поддерживалось 10 МПа, скорость скольжения составляла 0,45 м/с, температура масла 300 – 320 К. Результаты исследования представлены на рисунке 9.

Проведённые исследования показали, что оценить свойства масла можно на основе изменения коэффициента трения. Если в процессе триботехнических исследований происходит колебание коэффициента трения в широком интервале (в условиях конкретного эксперимента более 20%), то это значит, что действие присадок неэффективно и масло надо менять или дополнительно модифицировать присадками.

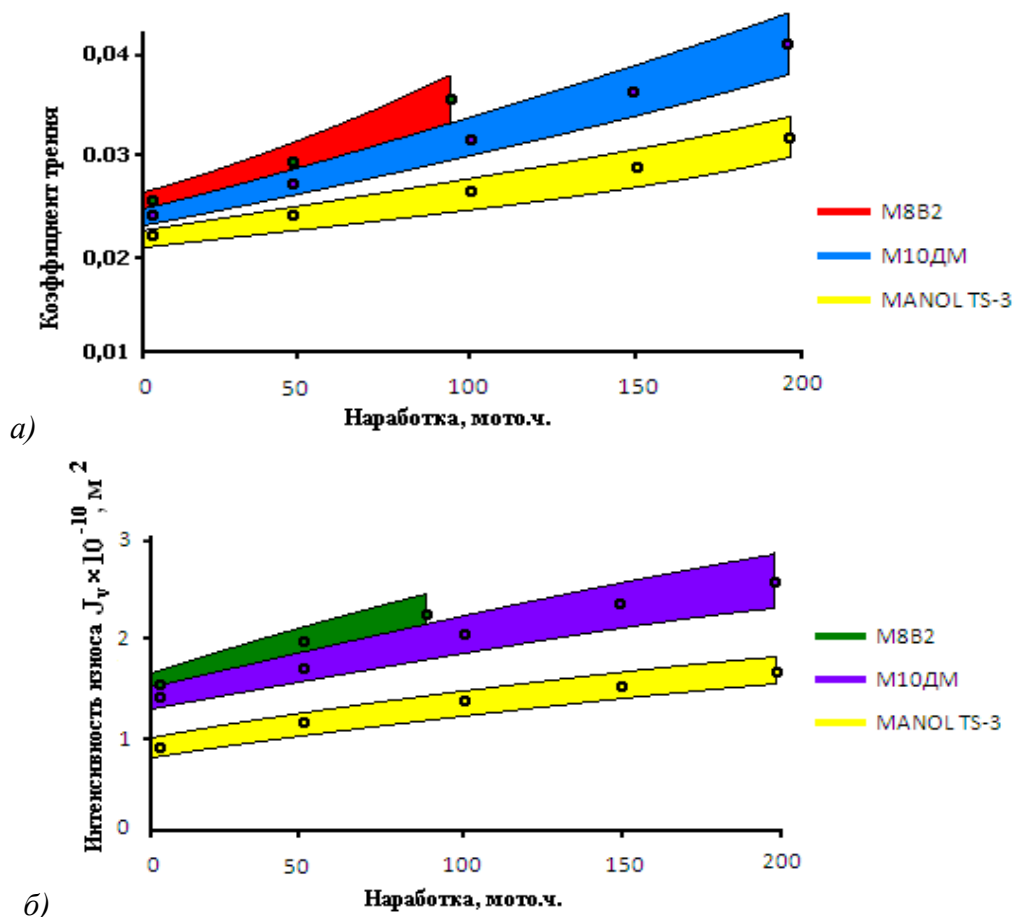


Рис. 8. Изменение коэффициента трения а) и интенсивности объёмного износа б) от наработки масла, полученных на трёх шариковой машине трения (условия трения – $V = 0,47$ м/с, $T \sim 300-310\text{K}$)

При использовании диагностирования с достаточной точностью определяется время достижения предельного состояния какого-либо трибоэлемента и

отпадает необходимость использования статистических вероятностей отказов при анализе параметров эксплуатации. Вместо них нужно использовать вероятность совпадения ремонта $P(Z)$ с одним из шести дней цикла работы торфяной машины, тогда вероятность совпадения ТО, ремонтов и периодов с неблагоприятными погодными условиями будет:

$$P(H) = P(B) \times P(Z) \times P(A). \quad (14)$$

Вероятность $P(Z)$ много больше вероятности $P(C)+P(D)+P(E)$, следовательно, вероятность совмещения плановых ТО и ремонтов с метеонеблагоприятными днями повышается.

Применение диагностики позволяет проводить ремонты в заранее установленные дни, что существенно снижает затраты времени на внеплановые ремонты.

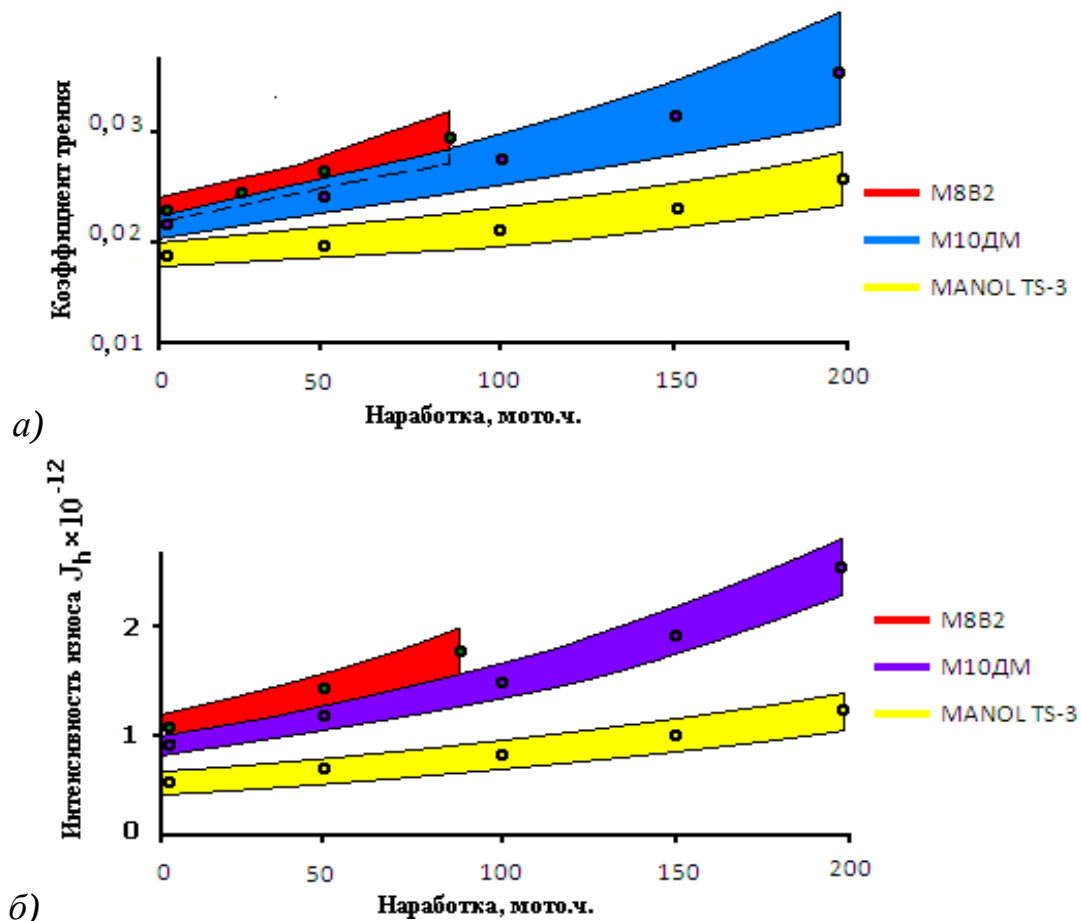


Рис. 9. Изменение коэффициента трения а) и интенсивности линейного износа б) от наработки масла, полученные на пальчиковых образцах (условия трения – $q = 10$ МПа, $V = 0,45$ м/с, $T \sim 300-310$ К)

На модели надёжности уборочной машины МТФ-43А были проведены исследования зависимости коэффициента готовности от количества диагностируемых трибоэлементов (рис.10).

Проведённые исследования показали, что для уборочных машин МТФ-43А с выработанным ресурсом до 20% вероятность отказа незначительная, значение коэффициента готовности существенно не меняется с ростом количества диагностируемых трибоэлементов, поэтому объём диагностических работ должен ограничиваться определением состояния трибоэлементов со значительными затратами на восстановление. Для уборочных машин, выработавших ресурс более чем на 80%, вероятность отказа возрастает в полтора раза. При этом коэффициент готовности можно увеличить на 15-20% за счёт диагностики и проведении ремонта до наступления предельного состояния трибоэлемента. Так же исследования показали, что с увеличением до 20% количества диагностируемых трибоэлементов машин, выработавших ресурс более 80%, коэффициент готовности интенсивно возрастает. При дальнейшем увеличении количества диагностируемых трибоэлементов интенсивность роста коэффициента готовности снижается.

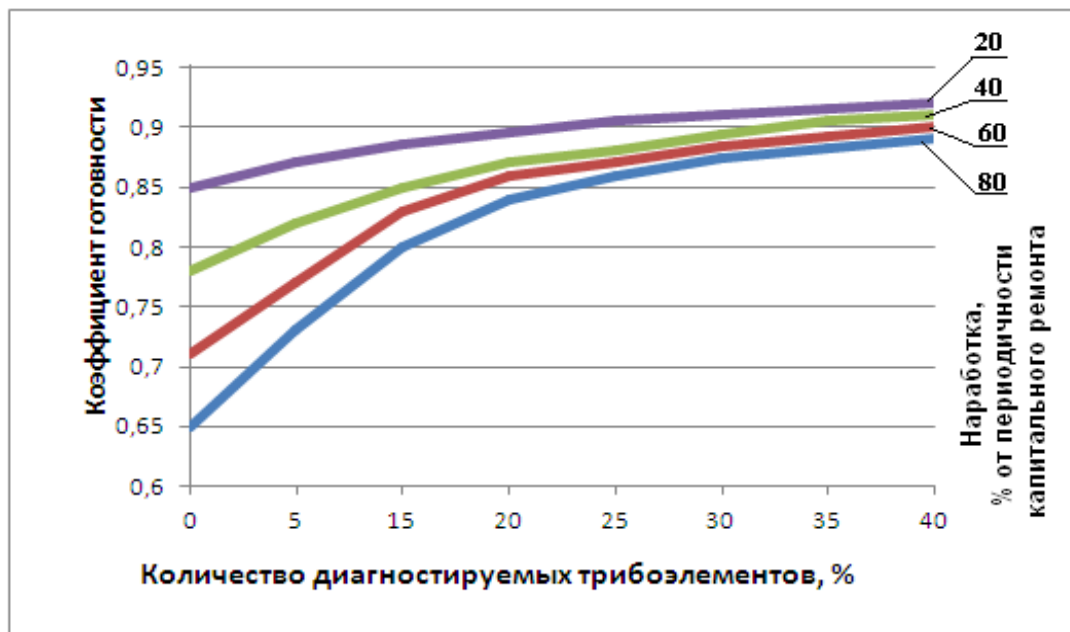


Рис. 10. Номограмма изменения коэффициента готовности уборочной машины МТФ-43А от наработки и количества диагностируемых трибоэлементов

С ростом количества диагностируемых трибоэлементов увеличиваются затраты на диагностику, поэтому решение об увеличении объёмов диагностирования должно быть обосновано.

В четвёртой главе изложены основные направления повышения эффективности эксплуатации торфяных машин на основе модификации трибоэлементов. Основной задачей исследования является определение наиболее значимых параметров трибоэлементов, влияющих на эксплуатационные свойства

ТМ и выработка стратегии воздействия на них для обеспечения условий более эффективного использования в сезоне добычи фрезерного торфа.

Анализ свойств несущей подсистемы показал, что ряд трибоэлементов (сопряжения оси и втулки подвески фрезерующего устройства, опорной каретки гусеничного хода и др.) имеют периодичность обслуживания 60 моточасов. Для улучшения функционирования всей системы необходимо воздействовать на эти трибоэлементы с целью увеличения цикла обслуживания, т.е. выявить основные триботехнические свойства и разработать трибоузлы с улучшенными, с точки зрения обслуживания, характеристиками. Для этих целей нужно использовать самосмазывающиеся материалы или магнитожидкостные смазки. Использование таких материалов, не требующих постоянного обслуживания, обеспечивает существенное сокращение трудоёмкости ТО и повышает надёжность узла. Для сравнения триботехнических свойств антифрикционных материалов, которые могут быть использованы в указанном сопряжении, было разработано и изготовлено специальное устройство, моделирующее работу рассматриваемого узла трения.

На первом этапе исследований проводились испытания образцов из бронзы БрО-10Ц2 (соответствует типовому узлу), узел смазывался консистентной смазкой Солидол С, ГОСТ 4366-76. Максимальный коэффициент трения за цикл испытаний 0,13. Интенсивность линейного износа образцов для принятых условий испытаний $7,48 \cdot 10^{-9}$.

На втором этапе исследования образцы из бронзы испытывались в условиях недостаточного смазывания (например, из-за несвоевременного обслуживания). По мере срабатывания смазки коэффициент трения постепенно возрастал, максимальное значение достигло 0,23. Интенсивность износа на втором этапе исследований при дефиците смазки составила $1,22 \cdot 10^{-8}$. Следовательно, в случае несвоевременного смазывания узла интенсивность износа возрастает в 1,6 раза. Таким образом, периодичность операций по обслуживанию представленного трибосопряжения увеличивать нельзя, а для улучшения узла трения требуется использовать материалы, которым не нужен постоянный контроль и частые сервисные работы. В качестве таких материалов можно использовать углепластики на фенольной основе, фторопласт с армированием, капролон (полиамид-6 блочный) с различным наполнением (материалы устойчивые к фреттингу и фреттингкоррозии в условиях высокой кислотности торфа) и др.

Результаты исследования антифрикционных материалов представлены в таблице 1. По результатам исследований видно, что лучшие параметры для узла трения – сопряжения втулки и пальца подвески имеет модифицирован-

ный капролон-42. Этот же материал можно использовать для узлов с аналогичными свойствами (например, сопряжение муфты привода фрезерующего устройства).

Таблица 1

Результаты испытаний антифрикционных материалов

	BrO-10Ц2 со смазкой Солидол С	АМС-3	Армированный Ф-4	Капролон-42	Капролон маслona- полненный	Модифицированный капролон-42
Коэффициент трения f	0,13-0,23	0,22-0,26	0,16-0,18	0,14-0,16	0,14-0,2	0,12-0,16
Интенсивность износа $J_h \times 10^{-8}$	0,75-1,22	4,3	235	4,05	7,25	3,45

Для определения триботехнических характеристик модифицированного узла были проведены исследования на модели фрезерующего устройства. На первом этапе исследования испытания проводились на типовых материалах (сталь 17ГС – сталь 45), интенсивность массового износа корпуса муфты составила 36 мкг/м. Далее проводились исследования в паре сталь 17ГС и модифицированный капролон-42, интенсивность массового износа составила 5,3 мкг/м, то есть уменьшилась почти на порядок.

Альтернативой использования самосмазывающихся материалов могут стать узлы трения с магнитожидкостной смазкой. Основная задача, которая решалась при создании долговечных магнитожидкостных узлов, заключалась в правильном выборе материалов вала и втулки. Для этого были проведены исследования различных сочетаний материалов вала и втулки: полиамид-сталь, латунь-сталь, бронза-сталь, сталь-сталь, керамика (МДО-покрытие)-сталь. Исследования показали, что наилучшие характеристики имеют магнитожидкостные узлы, втулки которых изготовлены из алюминиевых сплавов, а поверхности трения упрочненными методом МДО (микро дуговое оксидирование).

Применение в трибоузлах торфяных машин современных самосмазывающихся материалов и магнитных смазок может повысить эффективность их использования на 15-20% за счёт сокращения простоев в ТО и ремонтах, а так же повышения ресурса дорогостоящих узлов.

При изменении периода обслуживания трибоэлементов (втулки подвески фрезерующего устройства, опорной каретки с осью) до 960 моточасов, экономия времени обслуживания по результатам анализа с использованием модели составила около 4 чел.ч. за сезон.

Общей тенденцией совершенствования торфяных машин является повышение их надёжности. Вместе с этим, всё актуальнее становится проблема фрикционных передач, как элементов привода ТМ. Для снижения трудоёмкости обслуживания и ремонта в состав фрикционных накладок нужно включать материалы, которые будут обеспечивать повышенный коэффициент трения, и частично переноситься на фрикционный диск, компенсируя износ основного материала. На основе проведённых исследований был разработан фрикционный материал с улучшенными триботехническими свойствами, на который был получен патент. Исследования фрикционного материала показали, что использование разработанного материала во фрикционных муфтах уборочных машин МТФ-43А позволяет увеличить ресурс ведомых дисков на 60%, что обеспечивает снижение трудоёмкости ТО и ремонтов на 16 чел.ч. за сезон.

С помощью модели уборочной машины МТФ-43А на основе выражения (8) был проведён анализ изменения сезонной производительности. На рисунке 11 показана зависимость изменения производительности Q (с наработкой 2000 моточасов с начала эксплуатации при 70 метеонеблагоприятных днях за сезон) при увеличении цикла обслуживания за счёт модификации трибоэлементов.

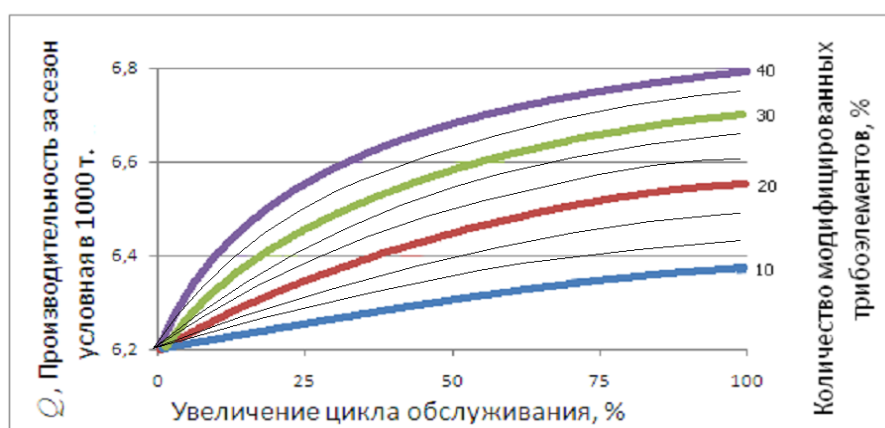


Рис. 11. Номограмма изменения производительности Q за сезон МТФ-43А за счёт модификации трибоэлементов

На основе компьютерного эксперимента было установлено, что увеличение ресурса трибоэлементов с периодом обслуживания менее 240 мото.час. позволяет сократить на треть сервисные работы, что обеспечивает повышение производительности машины на 7-15% в зависимости количества метеонеблагоприятных дней, для трибоэлементов с большим периодом обслуживания производительность практически не меняется.

Выявление наиболее значимых свойств сопряжений, на основе моделирования, и синтез трибоэлементов с улучшенными параметрами, позволяет

управлять изменением технического состояния узлов и машины в целом, что обеспечивает повышение эффективности их эксплуатации.

В пятой главе представлен анализ использования разработанного способа восстановления изношенных контактных поверхностей дорогостоящих трибоузлов ТМ с использованием высокотехнологичных систем, которые обеспечивают повышенный ресурс и снижение затрат на обслуживание и ремонт за счёт приобретения узлами трения качественно новых триботехнических свойств.

Для анализа триботехнических свойств восстановленной детали были проведены исследования на модели фрезерующего устройства. Интенсивность износа сферической части муфты в паре с восстановленной поверхностью уменьшилась более чем на 30%. Это свидетельствует о том, что триботехнические параметры восстановленной поверхности существенно улучшились.

Стоимость восстановления корпуса фрезы в несколько раз меньше стоимости новой детали, что обеспечивает снижение затрат на ремонт детали и обеспечивает повышенный ресурс восстановленной поверхности.

В шестой главе проведён анализ эффективности эксплуатации торфяных машин. Для сравнения эффективности эксплуатации ТМ использовалась относительная эффективность $\Delta Э$, которая определяется как отношение объёма выполненных работ (в денежном эквиваленте – рублях) по результатам моделирования процесса эксплуатации $Э_{mod}$ к объёму работ, выполненных торфяной машиной при полном совпадении операций по восстановлению работоспособности с периодами с неблагоприятными погодными условиями $Э_{100}$.

На рисунке 12 показан график изменения относительной эффективности использования уборочной машины МТФ-43А при смещении обслуживания и ремонтов на метеонеблагоприятные дни.

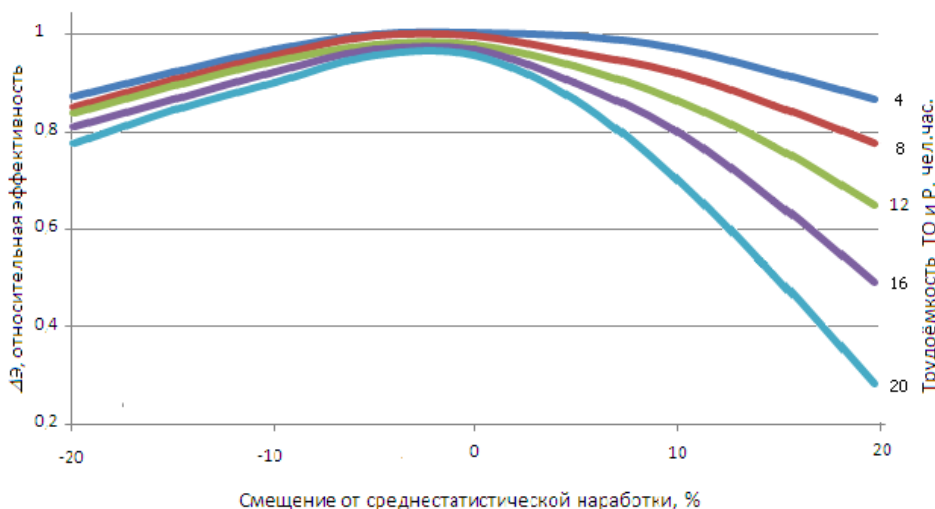


Рис. 12. Изменение относительной эффективности использования уборочной машины МТФ-43А при реализации методологии эффективной эксплуатации трибоэлементов

Исследование показало, что смещение ТО и ремонтов в сторону уменьшения ресурса незначительно снижает эффективность эксплуатации машины, так как трибоэлементы не полностью вырабатывают ресурс и затраты на эксплуатацию несколько возрастают. Для трибоэлементов с трудоёмкостью восстановления работоспособности до 4-х чел.ч. допустимо смещение сервисных работ, как в большую, так и в меньшую сторону от среднестатистической наработки. Для трибоэлементов с трудоёмкостью восстановления работоспособности 16 – 20 чел.ч. последствия отказа значительны, что нарушает цикл добычи и снижает эффективность эксплуатации вдвое. Следовательно, превышение среднестатистической наработки таких трибоэлементов должно быть обосновано, а последствия отказа необходимо подвергать анализу с помощью модели надёжности машины.

На основе проведённых исследований разработаны: методы оценки надёжности торфяных машин с использованием имитационных моделей, позволяющие на основе компьютерного моделирования устанавливать индивидуальную периодичность проведения сервисных работ, что обеспечивает снижение на 30-50% потерь времени на проведение работ по восстановлению работоспособности в метеоблагоприятные дни; методы управления надёжностью ТМ за счёт модификации трибоэлементов, позволяющие на основе анализа эксплуатации, компьютерных и лабораторных исследований выявлять узлы, требующие частых сервисных работ и невысокий ресурс, и за счёт их улучшения сократить на 30% затраты времени на обслуживание и ремонт; методы прогнозирования объёмов добычи торфяных машин в зависимости от технического состояния и метеорологических условий на основе компьютерного эксперимента, позволяющие определить необходимое количество используемых торфяных машин для реализации сезонного плана добычи. Для машин, выработавших менее половины ресурса, сезонная производительность пропорциональна количеству дней с благоприятными погодными условиями, при большей наработке возникает корреляционная зависимость со значением коэффициента 0,5-0,8.

Определение с помощью моделирования индивидуальной периодичности операций по восстановлению работоспособности торфяных машин с учётом технического состояния и внешних факторов воздействия, даёт возможность наиболее полно использовать метеоблагоприятные дни для добычи торфа и с помощью разработанных методик осуществлять объективный выбор наилучших решений по воздействию на машину для достижения максимальной про-

изводительности, что позволит повысить эффективность торфяного производства.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе решена крупная научно-техническая проблема в области надёжности, заключающаяся в разработке методологии эффективной эксплуатации трибоэлементов торфяных машин, включающей теорию и модели, методы, систему показателей определяющих динамику изменения состояния технического объекта, что повышает сезонную производительность, и как следствие, эффективность торфяного производства, имеет важное хозяйственное значение для торфодобывающей отрасли и вносит значительный вклад в развитие страны.

Основные научные выводы и результаты, полученные лично автором, заключаются в следующем:

1. Разработана методология эффективной эксплуатации трибоэлементов торфяных машин с адаптацией к метеонеблагоприятным условиям, которая обеспечивает снижение простоев из-за технических обслуживаний и ремонтов в метеоблагоприятные дни на 30-50%, что позволяет повысить производительность торфяных машин за счёт наиболее полного использования производственного времени.

2. Разработана модель надёжности торфяных машин, учитывающая техническое состояние до 430 элементов и данные метеорологического прогноза. Установлено, что для уборочных машин МТФ-43А и МТФ-43А-К, имеющих 82 и 96 основных трибоэлементов, с наработкой до 50% ресурса производительность изменяется от 6100 до 8600 условных тонн и зависит в большей мере от количества метеонеблагоприятных дней. С увеличением наработки более 80% ресурса производительность снижается на 15 – 50% в зависимости от количества метеонеблагоприятных дней, что обусловлено ростом количества отказов, которые вдвое увеличивают потери по сравнению с новыми машинами.

3. Установлены зависимости производительности торфяных машин от объёма трибоэлементов, выработанного ресурса и количества дней с метеонеблагоприятными условиями, при наработке машины менее половины ресурса производительность обратно пропорциональна количеству дней с неблагоприятными погодными условиями, при большей наработке имеет место корреляционная зависимость со значением коэффициента 0,5-0,8.

4. Установлены закономерности изменения коэффициента готовности уборочной машины МТФ-43А при использовании диагностики. С увели-

чением количества диагностируемых трибоэлементов на 20% значение коэффициента готовности может возрасти на 15-20% для машин, выработавших ресурс более чем на 80%. Диагностика позволяет предотвращать трудоёмкие отказы и вдвое сократить простои на техническое обслуживание и ремонт машин, выработавших более половины ресурса.

5. Установлено увеличение сезонной производительности уборочных машин МТФ-43А на 7-15% от увеличения цикла обслуживания трибоэлементов за счёт их модификации. Использование предложенных материалов (модифицированный капролон-42, материал для фрикционных деталей – патент RU №2457268) обеспечивает снижение интенсивности износа до восьми раз, что позволяет сократить простои из-за ремонтов и технического обслуживания машин МТФ-43А на 30-50%.

6. Установленные зависимости эффективности эксплуатации торфяных машин от трудоёмкости работ по восстановлению трибоэлементов, а также смещения технического обслуживания и ремонтов на дни с неблагоприятными погодными условиями, позволяют оценить потенциальные возможности совершенствования процесса эксплуатации и повышения производительности, в т.ч. за счет наиболее полного использования метеоблагоприятных дней.

Система анализа технического состояния, реализующая методики: «Расчёт периодичности операций по восстановлению работоспособности ТМ», «Прогнозирование наработки торфяных технологических машин в зависимости от выбранной стратегии эксплуатации», «Диагностирование узлов торфяных технологических машин с выбором индивидуальных диагностических параметров» приняты к использованию в ОАО «Васильевский мох». Методики: «Расчёт периодичности операций по восстановлению работоспособности ТМ», «Прогнозирование наработки торфяных технологических машин в зависимости от выбранной стратегии эксплуатации» приняты к использованию в ООО «ДИАКАР». Методика «Оценки эффективности использования триботехнических материалов в узлах трения» внедрена на ОАО «Тверской вагоностроительный завод». Основные научные результаты диссертации используются в учебном процессе Тверского государственного технического университета при подготовке специалистов по направлению 151000 «Технологические машины и оборудование для разработки торфяных месторождений».

Основные положения диссертации изложены в следующих работах:

В изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки России:

1. Болотов А.Н., Григорьев С.Н., Горлов И.В. Магнитопорошковый метод герметизации абразивных сред // Трение и износ. Всесоюзный научно-

теоретический журнал. Том 10, №6. Минск: «Наука и техника», 1989. С. 1075-1078.

2. Болотов А.Н. Триботехнические материалы для магнитожидкостных подшипников горнодобывающего оборудования [Текст] / А.Н. Болотов, И.В. Горлов, О.О. Новикова, М.В. Васильев // Горный информационно-аналитический бюллетень. М.: МГГУ, 2011. № 12. С. 201-209.

3. Болотов А.Н. Экспериментальное моделирование коррозионных процессов на смазанной маслом поверхности трения [Текст] / А.Н. Болотов, И.В. Горлов, Е.А. Щербаков // Трение и смазка в машинах и механизмах. 2012. № 9. С. 23-27.

4. Болотов А.Н. Исследование структурной стабильности магнитных масел для узлов трения [Текст] / А.Н. Болотов, В.В. Новиков, О.О. Новикова, И.В. Горлов // Известия Московского государственного технического университета "МАМИ" № 2(20), 2014, т.4. С. 15-18.

5. Горлов И.В. Управление геометрическими параметрами поверхностей восстановленных локальным деформированием при ремонте горных машин [Текст] / И.В. Горлов, А.Н. Болотов, Б.Ф. Зюзин // Горный информационно-аналитический бюллетень. М.: МГГУ, 2011. № 12. С. 216-222.

6. Горлов И.В. Информационная составляющая системы управления работоспособностью торфяных машин [Текст] / И.В. Горлов, А.Н. Болотов. // Горный информационно-аналитический бюллетень. М.: МГГУ, 2013. № 1. С. 216-221.

7. Горлов И.В. Управление безотказностью технологической машины на основе анализа структурной модели [Текст] / И.В. Горлов, Е.В. Полетаева // Горный информационно-аналитический бюллетень. М.: МГГУ, 2013. № 9. С. 223-226.

8. Горлов И.В. Комплексные исследования изменения состояния моторных масел торфяных машин в процессе эксплуатации [Текст] / И.В. Горлов, А.Н. Болотов, Е.А. Щербаков // Трение и смазка в машинах и механизмах. 2013. № 9. С. 12-15.

9. Горлов И.В. Прогнозирование эксплуатации технологической машины на основе агрегативной модели [Текст] / И.В. Горлов, Е.В. Полетаева // Горный информационно-аналитический бюллетень. М.: МГГУ, 2013. № 10. – С. 218-222.

10. Горлов И.В. Анализ состояния технологического объекта на основе структурной модели [Текст] / И.В. Горлов, Е.В. Полетаева // Горный информационно-аналитический бюллетень. М.: МГГУ, 2014. № 1. С. 146-149.

11. Горлов И.В. Выбор материалов для узлов трения торфяных машин [Текст] / И.В. Горлов, А.Н. Болотов // Трение и смазка в машинах и механизмах. 2014. № 2. С. 29-35.

12. Горлов И.В. Изменение механических свойств изношенной поверхности восстановленной пластическим деформированием [Текст] / И.В. Горлов, А.Н. Болотов. // Упрочняющие технологии и покрытия. 2014. № 7. С. 3-7.

13. Горлов И.В. Анализ параметров эксплуатации торфяной машины с помощью имитационной модели [Текст] // Горный информационно-аналитический бюллетень. М.: МГГУ, 2014. № 7. С. 173-178.

14. Ковалёв Н.Г. Автоматизированная система управления эффективной эксплуатацией торфяных машин [Текст] / Н.Г. Ковалёв, И.В. Горлов. // Мелиорация и водное хозяйство. 2014. №4. С.12-15.

В монографиях:

15. Болотов А.Н. Восстановление изношенных деталей / А.Н. Болотов, И.В. Горлов. Монография. Тверь. ТвГТУ, 2008. 108 с.

16. Горлов И.В. Инновационные технологии восстановления работоспособности машин торфяного комплекса [Текст] / И.В. Горлов, А.Н. Болотов. Монография. Тверь: Издатель Кондратьев А.Н., 2012. 170 с.

В прочих изданиях:

17. Болотов А.Н. Алгоритм восстановления локально изношенных подшипников скольжения пластическим деформированием [Текст] / А.Н. Болотов, И.В. Горлов // Механика и физика процессов на поверхности и в контакте твердых тел и деталей машин. Межвузовский сборник научных трудов. Выпуск 2. Тверь. ТвГТУ, 2006. С. 224-229.

18. Болотов А.Н. Восстановление локально изношенных подшипников скольжения [Текст] / А.Н. Болотов, И.В. Горлов // Механика и физика процессов на поверхности и в контакте твердых тел и деталей машин. Межвузовский сборник научных трудов. Выпуск 3. Тверь. ТвГТУ, 2007. С. 46-51.

19. Болотов А.Н. Механические свойства фрикционных поверхностей, полученных пластическим деформированием [Текст] / А.Н. Болотов, И.В. Горлов // Механика и физика процессов на поверхности и в контакте твердых тел и деталей технологического и энергетического оборудования. Межвузовский сборник научных трудов. Выпуск 1. Тверь. ТвГТУ, 2008. С. 39-42.

20. Болотов А.Н. Механические свойства поверхности, восстановленной пластическим деформированием [Текст] / А.Н. Болотов, И.В. Горлов, А.Н. Лукьянчиков // Материалы заседания учебно-методического совета УМО по направлению подготовки дипломированных специалистов 653300

(190600.65) Эксплуатация наземного транспорта и транспортного оборудования с приглашением вузов Европейского региона, ведущих подготовку по специальности 230100 (190603.65) Тверь. ТвГТУ, 2008. С. 31-37.

21. Болотов А.Н. Анализ результатов эмпирического исследования пластического деформирования [Текст] / А.Н. Болотов, И.В. Горлов, М.В. Васильев // Механика и физика процессов на поверхности и в контакте твердых тел и деталей технологического и энергетического оборудования. Межвузовский сборник научных трудов. Выпуск 2. Тверь. ТвГТУ, 2009. С.25-29.

22. Болотов А.Н. Геометрические параметры деформирующего инструмента [Текст] / А.Н. Болотов, И.В. Горлов, А.И. Горлов // Механика и физика процессов на поверхности и в контакте твердых тел и деталей технологического и энергетического оборудования. Межвузовский сборник научных трудов. Выпуск 3. Тверь. ТвГТУ, 2010. С. 153-158.

23. Болотов А.Н. Исследование процессов регенерации в тормозных системах [Текст] / А.Н. Болотов, И.В. Горлов, А.И. Горлов // Механика и физика процессов на поверхности и в контакте твердых тел и деталей технологического и энергетического оборудования. Межвузовский сборник научных трудов. Выпуск 3. Тверь. ТвГТУ, 2011. С. 47-50.

24. Болотов А.Н. Повышение надёжности трибосопряжений за счёт композиционных алмазосодержащих покрытий [Текст] / А.Н. Болотов, В.В. Новиков, О.О. Новикова, И.В. Горлов // 10 Всероссийская научно-техническая конференция «Приоритетные направления развития науки и технологий» Тула, 2011 г. С. 237-238.

25. Горлов И.В. Моделирование процесса пластического деформирования [Текст] / И.В. Горлов // Вестник Тверского государственного технического университета: научный журнал. Тверь, 2007. Вып. 12. С. 124-129.

26. Горлов И.В. Новый способ восстановления изношенных поверхностей [Текст] / И.В. Горлов, Б.Ф. Зюзин, А.Н. Болотов // Современные проблемы гидропневмосистем машин. Материалы международной научно-практической конференции посвящённой 60-летию создания автотракторного факультета Белорусского национального технического университета. Минск: БНТУ, 2011. С.17.

27. Горлов И.В. Восстановление машин для добычи и переработки торфа [Текст] / И.В. Горлов, А.Н. Болотов // Международной заочная научно-практическая конференция «Современные тенденции в науке: новый взгляд». Часть 3. Тамбов 2011. С.46.

28. Горлов И.В. Оптимизация задачи управления ресурсом при эксплуатации машин для добычи и переработки торфа [Текст] / И.В. Горлов, А.Н.

Болотов, А.И. Горлов // Механика и физика процессов на поверхности и в контакте твердых тел и деталей технологического и энергетического оборудования. Межвузовский сборник научных трудов. Выпуск 5. Тверь: ТвГТУ, 2012. С. 76-79.

29. Горлов И.В. Оптимизация задачи использования ресурсов при эксплуатации торфяных машин [Текст] / И.В. Горлов // Международная заочная научно-практическая конференция «Теоретические и прикладные проблемы науки и образования в 21 веке». Тамбов, 2012. С. 43-44.

30. Горлов И.В. Инновационная система управления работоспособностью машин для добычи и переработки торфа // Международная научно-практическая конференция «Перспективы развития науки и образования». Часть 5. Тамбов, 2012. С. 35-36.

31. Горлов И.В. Магнитожидкостные подшипники горнодобывающего оборудования [Текст] / И.В. Горлов, А.Н. Болотов, Б.Ф. Зюзин // Минск: Наука и техника. 2012. №6. С. 17 – 23.

32. Горлов И.В. Информационная система управления работоспособностью машин [Текст] / И.В. Горлов, А.Н. Болотов, Д.И. Горлов // Механика и физика процессов на поверхности и в контакте твердых тел и деталей технологического и энергетического оборудования. Межвузовский сборник научных трудов. Выпуск 6. Тверь: ТвГТУ, 2013. С. 89-95.

33. Горлов И.В. Принятие решения по воздействию на техническое состояние технологической машины на основе использования агрегативной модели [Текст] / И.В. Горлов, Е.В. Полетаева // «Социально-экономические и экологические проблемы горной промышленности, строительства и энергетики». Материалы 9-й международной конференции по проблемам горной промышленности, строительства и энергетики Минск: БНТУ, 2013. С.17.

34. Горлов И.В. Последствия отказа технологических машин при фрезерной добыче торфа [Текст] / И.В. Горлов, С.П. Рыков // Механика и физика процессов на поверхности и в контакте твердых тел и деталей технологического и энергетического оборудования. Межвузовский сборник научных трудов. Выпуск 7. Тверь: ТвГТУ, 2014. С. 255-261.

35. Горлов И.В. Испытания материалов для тяжело нагруженных узлов трения / И.В. Горлов, А.Н. Болотов, В.В. Мешков, Д.И. Горлов // Механика и физика процессов на поверхности и в контакте твердых тел и деталей технологического и энергетического оборудования. Межвузовский сборник научных трудов. Выпуск 7. Тверь: ТвГТУ, 2014. С. 81-85.

36. Горлов И.В. Устройство для испытания материалов для тяжело нагруженных узлов трения [Текст] / И.В. Горлов, А.Н. Болотов, В.В. Мешков,

А.И. Горлов // Механика и физика процессов на поверхности и в контакте твердых тел и деталей технологического и энергетического оборудования. Межвузовский сборник научных трудов. Выпуск 7. Тверь: ТвГТУ, 2014. С.73-81.

37. Ковалёв Н.Г. Система управления эксплуатацией торфяных машин [Текст] / Н.Г. Ковалёв, И.В. Горлов. // Сборник докладов международной научно-технической конференции «Инновационное развитие АПК России на базе интеллектуальных машинных технологий». М.: ФГБНУ ВИМ, 2014. С. 386-391.

38. Ковалёв Н.Г. Анализ состояния фрезерного агрегата торфяной машины на основе вибродиагностики [Текст] / Н.Г. Ковалёв, И.В. Горлов. // Сборник докладов международной научно-технической конференции «Инновационное развитие АПК России на базе интеллектуальных машинных технологий». М.: ФГБНУ ВИМ, 2014. С. 412-417.

39. Сутягин О.В. Технология нанесения антифрикционных композиционных покрытий на основе полимерных материалов [Текст] / О.В. Сутягин, И.В. Горлов // Механика и физика процессов на поверхности и в контакте твердых тел и деталей технологического и энергетического оборудования. Межвузовский сборник научных трудов. Выпуск 5. Тверь: ТвГТУ, 2012. С. 120-122.

Патенты и авторские свидетельства:

40. Пат. РФ, МКП 23 Р 6/00. Способ восстановления локально изношенной поверхности детали корпусных деталей, изготовленных из пластичных материалов и материалов с ограниченной пластичностью, и устройство для его осуществления / А.Н. Болотов, И.В. Горлов, А.И. Горлов – RU №2447981 С2; Заявл. 12.04.2010; Оpubл. 20.04.2012; Бюл. № 11. – 9с.

41. Пат. РФ, МКП С22С 1/05, С22С 9/00. Материал для фрикционных деталей / А.Н. Болотов, И.В. Горлов, А.И. Горлов – RU №2457268 С1; Заявл. 10.05.2011; Оpubл. 27.07.2012; Бюл. № 21. – 6с.

42. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2013660019. Программа анализа технического состояния технологической машины/ И.В. Горлов, А.Е. Алонзов, А.И. Горлов. Заявка №2013616449. Дата поступления 22.07.2013. Дата государственной регистрации 22.10.2013.