

ТВЕРСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

На правах рукописи

Экз. № .

ГОРЛОВ ИГОРЬ ВАСИЛЬЕВИЧ

**Методология эффективной эксплуатации трибоэлементов
торфяных машин**

Специальность 05.05.06 – Горные машины

Диссертация на соискание учёной
степени доктора технических наук

Научный консультант
доктор технических наук, профессор
Рахутин Максим Григорьевич

Тверь 2015 г.

ОГЛАВЛЕНИЕ.

ОГЛАВЛЕНИЕ	2
ВВЕДЕНИЕ.....	5
1 СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	13
1.1 Анализ методов оценки технического состояния торфяных машин.....	13
1.2 Анализ особенностей фрезерного способы добычи торфа	27
1.3. Анализ параметров износа трибоэлементов торфяных машин.....	35
1.4. Методы и средства испытаний на износ	39
Выводы по главе и постановка задач исследования.....	41
2. РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ НАДЁЖНОСТИ ТОРФЯНОЙ МАШИНЫ.....	43
2.1 Исследование параметров надёжности торфяных машин	43
2.2 Предпосылки создания модели надёжности торфяных машин	51
2.3 Разработка алгоритма функционирования системы восстановления работоспособности торфяных машин.....	58
2.4 Разработка структурной модели надёжности торфяной машины	65
2.5 Разработка имитационной модели функционирования торфяной машины	88
Выводы по главе	112
3. МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ НАДЁЖНОСТИ ТОРФЯНОЙ МАШИНЫ ЗА СЧЁТ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ.....	114
3.1 Основные направления диагностики торфяных машин.....	114
3.2 Виброакустическая диагностика фрезерующего устройства.....	123
3.3 Определение предельного состояния моторных масел торфяных машин на основе анализа загрязнений смазки.....	130
3.4 Определения предельного состояния моторных масел торфяных машин на основе трибодиагностики.....	142

Выводы по главе	155
4. МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ ЗА СЧЁТ МОДИФИКАЦИИ ТРИБОУЗЛОВ.	157
4.1 Анализ трибоузлов торфяных машин	157
4.2 Повышение износостойкости трибоузлов торфяных машин с использованием полимерного антифрикционного материала	160
4.3 Модификация трибоузлов с использованием магнитных смазок.....	188
4.4 Магнитопорошковая герметизация узлов торфяных машин в абразивных средах	192
4.5 Модификация трибоузлов торфяных машин с использованием нового фрикционного полимерного материала.....	197
4.6 Исследование мероприятий по модификации трибоэлементов на имитационной модели.....	205
Выводы по главе	207
5. РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ВОССТАНОВЛЕНИЕ ТРИБОЭЛЕМЕНТОВ МЕТОДОМ ПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ	208
5.1 Разработка способа восстановления изношенных поверхно- стей	208
5.2 Исследование процесса восстановления пластическим дефор- мированием.....	227
5.3 Триботехнические исследования восстановленной поверхности.....	247
5.4 Разработка устройства для восстановления изношенной поверхности муфты торфяной фрезы	261
Выводы по главе	267
6. АНАЛИЗ ЭФФЕКТА ОТ РЕАЛИЗАЦИИ МЕТОДОЛОГИИ ЭФФЕКТИВНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ ТРИБОЭЛЕМЕНТОВ ТОРФЯНЫХ МАШИН	269
6.1 Эффективность эксплуатации технологических машин	269

6.2 Технико-экономическая оценка процесса восстановления корпуса торфяной фрезы	272
6.3 Сравнение различных вариантов эксплуатации трибоэлементов торфяных машин с помощью имитационной модели	276
Выводы по главе	283
ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ	285
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	291
ПРИЛОЖЕНИЯ	314

ВВЕДЕНИЕ

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, нахо-

дящимися 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% производственного времени, 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 метеоблагоприятных дней. 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 торфяных машин, обеспечивающей на основе прогнозирования наиболее полное использование благоприятных дней для добычи торфа за счёт смещения операций по восстановлению работоспособности трибоэлементов на метеоблагоприятные дни, уменьшения трудоёмкости их обслуживания за счёт модификации и современных способов ремонта, 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 научные 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 боль-

шей 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 получение 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» 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». Методики «Оценки эффективности использования триботехнических материалов в узлах трения» внедрены 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».

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), III Международной научно-практической конференции «Инновации на транспорте и в машиностроении» (Санкт-Петербург, Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», 2015г.).

1 СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЯ

1.1 АНАЛИЗ МЕТОДОВ ОЦЕНКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ТМ

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 Дмитриева В.Г., Галкина В.И., Гетопанова В.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. [10, 49 - 51, 80, 85, 95, 97, 104, 105, 114, 120, 127, 132, 154, 156, 175, 179, 180, 188, 199].

Исследования, проведённые специалистами многих отраслей промышленности, и разработанные на их основе методики восстановления работоспособности, не учитывают специфики эксплуатации торфяных машин, так как при добыче необходимо учитывать влияние неблагоприятных метеорологических условий на технологический процесс.

В настоящее время во многих отраслях промышленности и строительства используются различные методики поддержания работоспособности технологических машин. Для оценки технического состояния ТМ могут использовать-

ся несколько методов – расчетно-теоретический, экспертный, статистический, и др.

Расчетно-теоретическая оценка формируется на основе исследования технического состояния конкретной машины, как в целом, так и отдельно для всех её элементов. Для этого необходимо формализовать процесс определения технического состояния этой машин на основе теоретических и эмпирических исследований. Такая оценка используется чаще всего при установлении показателей надежности вновь сконструированных машин.

Экспертная оценка используется при недостаточной достоверности представленной информации, когда применение, каких либо других методов, невозможно или нецелесообразно. В таких случаях, в условиях неопределенности, группа экспертов дает оценку, которая в дальнейшем обрабатывается с целью определения группового мнения. Мнение специалистов в большинстве случаев целесообразно анализировать в несколько этапов. В процессе анализа результатов исследования на всех этапах участники экспертизы информируются с оценками всех экспертов.

Статистическая оценка надежности основывается на анализе отказов машин в процессе эксплуатации. В этом случае для прогнозирования изменения показателей надежности вновь спроектированных машин применяют данные о надежности соответствующих объектов, полученные при эксплуатации. При этом определяется коэффициент пересчета среднестатистической наработки на отказ для одной детали и принимают, что этот коэффициент будет одинаковым для всех узлов машины. Статистическая оценка достаточно проста и чаще всего легкодоступна, но для определения показателей надежности машин информация запаздывает, и прогнозирование носит ориентировочный характер.

Качество сбора и анализа статистической информации влияет на оценку надежности машины, она должна удовлетворять ряду требований: достоверности, непрерывности, полноты [159].

Достоверность статистической информации обеспечивается учетом наработки технического объекта, временем на устранение отказов и их трудоемкостью, однородностью условий эксплуатации и квалификацией работников, собирающих эти данные.

Полнота сбора информации заключается в её достаточности для решения задач прогнозирования:

- выявление причин отказов;
- установление показателей надежности;
- выявление деталей, лимитирующих параметры надежности элементов машин;
- определение зависимости режимов эксплуатации машины и квалификации оператора на надежность;
- обоснование расхода запасных частей при эксплуатации, периодичности проведения технического обслуживания (ТО), ремонтов и их количества;
- определение влияния конкретных условий эксплуатации на надежность;
- определение эффективности используемых мероприятий на повышение надежности.

Информацию на основе статистических данных об отказах ТМ можно получать при нормальной, подконтрольной или рядовой эксплуатации.

Эксплуатация ТМ в условиях торфяных месторождений связана с воздействием огромного количества факторов: климатических, вида выполняемых работ, режима работы, грунтовых, уровня ТО и ремонта. Преимуществом статистических данных, полученных при эксплуатации на торфяных месторождениях, является то, что они учитывают влияние реальных условий использования машин. Иногда могут возникать дополнительные погрешности при получении статистических данных, в том случае если не соблюдались правила технического обслуживания и ремонтов, а также технические условия или режимы работы. Такие недостатки можно устранить при использовании подконтрольной эксплуатации. В этом случае устанавливается число машин работающих в полном соответствии со всеми требованиями технической доку-

ментации, а диагностика и контроль технического состояния таких машин производится специальной бригадой. Подконтрольную эксплуатацию необходимо организовывать на образцовых торфопредприятиях.

Для осуществления наиболее качественного сбора статистической информации во время эксплуатацией ТМ, используют инструментальный метод контроля. При инструментальном методе контроля информацию собирают с использованием специальной контрольно-измерительной техники. Недостатками данного метода контроля являются сложность и относительно высокая стоимость.

Для выявления основных элементов системы эксплуатации ТМ влияющих на определение показателей надежности часто применяется хронометраж, который осуществляется специалистом фиксирующим интенсивность использования машин в течение цикла добычи, наработку на отказ, продолжительность восстановления работоспособности, а так же предполагаемые причины возникновения отказов, способов и времени их устранения.

Еще один метод сбора информации, основан на анализе эксплуатационной документации, он требует значительного объема обработки данных для повышения достоверности исследования.

Для оптимизации сроков получения информации в требуемом объеме и обеспечения высокой эффективности выполняемых исследований необходимо сочетание всех возможных способов контроля состояния машин.

Надежность ТМ в большой мере зависит от качества конструкций, а так же совершенства технологического процесса при изготовлении и условий эксплуатации. Большое количество факторов, влияющих на эксплуатацию ТМ, приводит к тому, что у машин с разным техническим состоянием, работающих в одинаковых условиях, значения показателей надежности случайны. Для оценки влияния случайных величин используется функция $F(t)$ распределения и вероятность безотказной работы $P(t)$, а так же плотность вероятностей её возникновения $f(t)$. О виде конкретной функции распределения случайной величины можно делать заключение на основе эмпирической функции, при-

чем при большом количестве испытаний (N) значения функций приблизительно одинаковы.

При оценке надежности ТМ требуется определить, к какому из известных законов распределения случайной величины близки экспериментальные данные. Наиболее часто при определении надежности ТМ используются законы распределения случайных величин: экспоненциальный, нормальный или Вейбула-Гнеденко.

В случае использования экспоненциального распределения случайной величины функция вероятности отказа, вероятность безотказной работы и плотность её вероятности соответственно можно представить в виде:

$$F(t) = 1 - e^{-\lambda t}, \quad P(f) = e^{-\lambda t}, \quad f(t) = \lambda e^{-\lambda t}, \quad (1.1)$$

где λ — параметр закона экспоненциального распределения; t — наработка конкретной машины.

При использовании экспоненциального закона применяется однопараметрическая функция, которая позволяет достаточно просто получать характеристики распределения. Однако такое распределение показывает хорошую сходимость с эксплуатационными данными, только при условии стационарности и ординарности, при отсутствии последствий отказов. Стационарность показывает, что количество отказов (например, отказ ламп накаливания) не зависит от предыдущей работы машины. Ординарность показывает, что за относительно малый интервал времени практически невозможно появление нескольких отказов. Отсутствие последствий в общем потоке отказов говорит о том, что вероятность наступления отказов в относительно малый интервал времени не зависит от предыдущих отказов. Соблюдение первого, а так же третьего условия является несколько идеализированным потому, что машины в процессе эксплуатации обязательно стареют и вероятности безотказной работы у них снижаются, так как выход из строя одной детали чаще всего оказывает влияние на отказ смежных деталей.

Статистическая обработка результатов исследований возникновения отказов начинается с упорядочивания исходных значений, полученных во время испытаний. Вначале значения распределяют в вариационный ряд, затем проверяют однородность результатов наблюдений. Для выявления закономерности распределения результатов, полученных в процессе исследования, при числе наблюдений $N > 30$ вариационный ряд разбивают на интервалы. В каждом интервале рассматривается не отдельное значение, а их количество n_i .

Для расчётов на практике принимают число интервалов (k) равным 7...12, а величину интервала определяют по формуле

$$\Delta x = \frac{x_{\max} - x_{\min}}{1 + 3,3 \lg N} \quad \text{или} \quad \Delta x = \frac{x_{\max} - x_{\min}}{k}. \quad (1.2)$$

Основные статистические характеристики распределения определяются по следующим формулам:

- математическое ожидание

$$\bar{x} = \sum_{i=1}^k x_{cpi} m_i, \quad (1.3)$$

где x_{cpi} – среднее значение наработки на i -том интервале, m_i – частость;

$$m_i = n_i / N \quad (1.4)$$

- среднеквадратичное отклонение

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}{N - 1}}; \quad (1.5)$$

- коэффициент вариации

$$V = \sigma/\bar{x}. \quad (1.6)$$

В зависимости от значения коэффициента вариации предполагают, какой либо закон распределения. При $V < 0,3$ принимают нормальный закон распределения, при $V > 0,5$ можно использовать экспоненциальный или Вейбулла-Гнеденко. В интервале $0,3 < V < 0,5$ могут применяться все три закона. После этого требуется проверить выдвинутую гипотезу по критерию согласия Пирсона, Колмогорова, или Мизеса.

При неизвестных параметрах распределения наиболее удобным для оценки надежности выборки можно использовать критерий Пирсона χ^2 :

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(m_i - m'_i)^2}{m_i}, \quad (1.7)$$

где m'_i — значения теоретической частоты, полученной по принятому закону распределения случайной величины.

Если значение χ^2 близко к нулю, тогда соответствующие эмпирические и теоретические частоты совпадают. Если значение не близко к нулю, то его нужно сравнивать с критическим значением. Критическое значение χ^2_{β} требуется выбрать из специальных таблиц в соответствии с уровнем значимости β и числа степеней свободы. Принятое значение числа степеней свободы (r) определяется:

$$r = k - b, \quad (1.8)$$

где b — сумма установленных параметров закона, найденных с помощью теоретического распределения (для нормального закона распределения 3 параметра, среднеквадратичное отклонение, математическое ожидание и наработка, для закона Вейбулла-Гнеденко и экспоненциального 2 параметра).

Если значение $\chi^2 < \chi_\beta^2$, то расхождение между эмпирическими и теоретическими частотами можно считать несущественными. То есть предполагаемую гипотезу нужно принять. В обратном случае принятую гипотезу отвергают и проводят повторные исследования. Далее для выявленных значений математического ожидания устанавливают границы доверительного интервала. Доверительный интервал определяет, что с вероятностью β математическое ожидания укладывается в пределах $x_H < \bar{x} < x_B$, где x_H , x_B — нижнее и верхнее предельные значения наработки.

Доверительная вероятность принимается в зависимости от точности исследований, и достоверности выводов, следующих из них. Для определения закономерностей в общем виде допустимо принять $\beta = 0,67$, в том случае, если проводятся исследования, связанные с конструкцией реальных машин $\beta = 0,90$.

Предельные отклонения для средневзвешенного значения определяемой величины определяются:

$$x_H = \bar{x} - \frac{\sigma t_\beta}{\sqrt{N}}, \quad x_B = \bar{x} + \frac{\sigma t_\beta}{\sqrt{N}}, \quad (1.9)$$

где t_β — коэффициент Стьюдента, который для нормального распределения случайной величины с вероятностью $\beta = 0,997$ находится в интервале $\bar{x} \pm 3\sigma$.

Количество машин, для установления показателей надежности ТМ, определяется в зависимости от выбранного распределения случайной погрешности, рассеяния результатов эксперимента, от необходимой точности и достоверности результатов. В любом случае погрешность исследования всегда меньше, при большем объеме выборки, однако это может существенно удорожать и усложнять исследование.

В зависимости от доверительной вероятности, а так же частного относительной погрешности и коэффициента вариации, от принятого закона рас-

пределения случайного значения устанавливается допустимое минимальное количество наблюдений, а в случае неизвестного распределения рассчитывают по формуле

$$N_{\min} = \frac{\ln(1-\beta)}{\ln P(t)}, \quad (1.10)$$

где $P(t)$ вероятность безотказной работы и β доверительная вероятность задаются [52, 111].

Показатели надежности ТМ устанавливаются с учетом параметров распределений случайных величин. В этом случае определяется достоверность и точность результатов по выборкам, начиная с закона распределения случайной величины и относительной погрешности, которая сравнивается с эталонной $\varepsilon_{\text{эт}}$:

$$\varepsilon = \pm \frac{t_{\beta} \sigma}{x \sqrt{N}} \leq \varepsilon_{\text{эт}}. \quad (1.11)$$

После чего рассчитывается доверительный интервал величины:

$$x_B = \bar{x}(1 + \varepsilon), \quad x_H = \bar{x}(1 - \varepsilon). \quad (1.12)$$

ТМ состоят из большого количества деталей и узлов, поэтому безотказность машины, целиком зависит от безотказности каждого её элемента, причём машину нужно рассматривать как сложную систему, надежность которой можно определить, используя различные структурные схемы.

При последовательном соединении элементов машины вероятность безотказной эксплуатации будет равна произведению вероятностей безотказной эксплуатации всех отдельных элементов [11, 12, 83, 101]:

$$P(t) = P_1 P_2 \dots P_n = \prod_{i=1}^n P_i. \quad (1.13)$$

Если влияние элементов на безотказность принять по экспоненциальному закону, эта зависимость сохранится целиком для всей системы,

$$P_1 = \exp(-\lambda_1 x), P_2 = \exp(-\lambda_2 x), \dots P_n = \exp(-\lambda_n x), \quad (1.14)$$

тогда

$$P(t) = \prod_{i=1}^n \exp(-\lambda_i x) = \exp(-\lambda_0 x), \quad (1.15)$$

где

$$\lambda_0 = \lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_n = \sum_{i=1}^n \lambda_i. \quad (1.16)$$

В то же время на практике для каждого элемента имеется индивидуальная зависимость от времени вероятности безотказной работы, это требуется учитывать при определении надежности сложных машин.

Простота использования для сложных систем экспоненциальной зависимости может приводить к существенным ошибкам, поэтому предварительно необходимо проводить анализ возникающих отказов.

В тоже время работоспособность ТМ зависит от различных параметров эксплуатации, выполнения системы ТО и ремонтов, а так же от применяемых условий работы и других факторов воздействия [2, 14, 125, 164, 171, 172, 190].

Для наиболее полной реализации ресурса заложенного в ТМ необходимо соблюдать технические условия по эксплуатации, определять изменение выходных диагностируемых параметров машин в процессе работы и своевременно проводить работы по восстановлению работоспособности. При этом точное определение остаточного ресурса при проведении плановых мероприятий по обслуживанию и ремонту позволит исключить отказы машины на торфяных месторождениях.

К наиболее актуальному направлению повышения эффективности эксплуатации ТМ относится:

- прогнозирование надежности с использованием информационных моделей;

- методология проектирования ТМ устойчивая к субъективным ошибкам эксплуатации;

- проектирование ТМ с учётом безопасности объектов во время возникновения природных и техногенных воздействий.

Данное направление повышения эффективности ТМ является наиболее перспективным для научных исследований и позволяет применить результаты таких работ для обоснования современных норм надежности в процессе проектирования и эксплуатации ТМ.

Ещё одним из перспективных направлений повышения работоспособности машин торфяного комплекса является использование специальных средств, обеспечивающих диагностирование технического состояния ТМ, что позволяет оптимизировать параметры технического обслуживания и ремонта, и обеспечивает своевременный переход на щадящие режимы эксплуатации в зависимости от повреждений элементов с фиксацией перегрузок систем.

В тоже время затраты на представленные мероприятия могут быть достаточно большими и в процессе использования ТМ не возмещаться, что не обеспечивает высокий экономический эффект от эксплуатации машины с учетом всех затрат на производство и техническую эксплуатацию.

Восстановление работоспособности ТМ чаще всего производится на уровне торфопредприятий осуществляющих техническую эксплуатацию машин. При оптимизации сервиса регламентированного нормативами и правилами технического обслуживания существенное значение придаётся научному обоснованию периодичности проведения технического обслуживания и ремонтов ТМ.

В соответствии с выработанным ресурсом, техническим состоянием (уточнённым по результатам диагностики) и наработкой, запланированной на рассматриваемый период, составляются годовые и месячные планы-графики ТО и ремонтов, а так же проверяется наличие имеющихся на балансе предприятия технических средств, в том числе расходных материалов и узлов, используемых для агрегатного ремонта. В зависимости от вида конкретного ТО

или ремонта, расстояния от торфяного месторождения до ремонтной базы и возможности эвакуации машин рассчитывается необходимое количество средств транспортирования техники, обслуживания и ремонта [2, 98, 102, 110].

Выполнение установленных графиков технического обслуживания и ремонта в большой мере зависит от производственной структуры предприятий, поэтому наиболее высокая организация технической эксплуатации обеспечивается объединением небольших торфопредприятий. Эти объединения централизованно ремонтируют несложную технику, а так же выполняют капитальный ремонт сборочных единиц ТМ. Капитальный ремонт сложных машин и сборочных единиц выполняется на специальных ремонтных заводах.

Трудоемкость операций по восстановлению работоспособности ТМ зависит от:

- своевременности проведения работ и достаточности по объему;
- применения материалов при ремонте и обслуживании в соответствии с требуемым качеством;
- обеспечение герметичности различных систем, а так же поддержание оптимального режима эксплуатации;
- использования по возможности механизмов, не требующих регулировки;
- ремонтпригодности ТМ;
- исключения перегрузки торфяных машин.

Существенно повышает эффективность эксплуатации ТМ использование системы прогнозирования остаточного ресурса узлов на основе диагностики текущих значений контролируемых параметров. Но реализовать эту задачу возможно только при внедрении строгого индивидуального учёта наработки по каждой машине в моточасах, а также определении показателей надежности в соответствии с наработкой машины с начала эксплуатации.

Влияние диагностирования при восстановлении работоспособности ТМ может существенно изменяться в зависимости от индивидуальных требова-

ний, а также применения информационных технологий и наличия технических средств диагностики при эксплуатации торфяных машин.

Системный подход к обеспечению технической эксплуатацией машин торфяного комплекса предусматривает четыре основных возможных пути достижения требуемой работоспособности (рис. 1.1) [130, 131].

Первый путь обеспечения работоспособности имеет место при недостаточности или отсутствии диагностирования, в этом случае реализуются работы по проведению ТО и ремонта (текущий или капитальный) в соответствии с нормативами установленными заводами-изготовителями.

Второй путь предусматривает наличие нормативно-технической базы диагностики, при этом обслуживание и ремонт проводят с периодичностью, установленной изготовителем техники, а использование расходных материалов, запчастей и узлов устанавливается в зависимости от технического состояния и результатов диагностики.

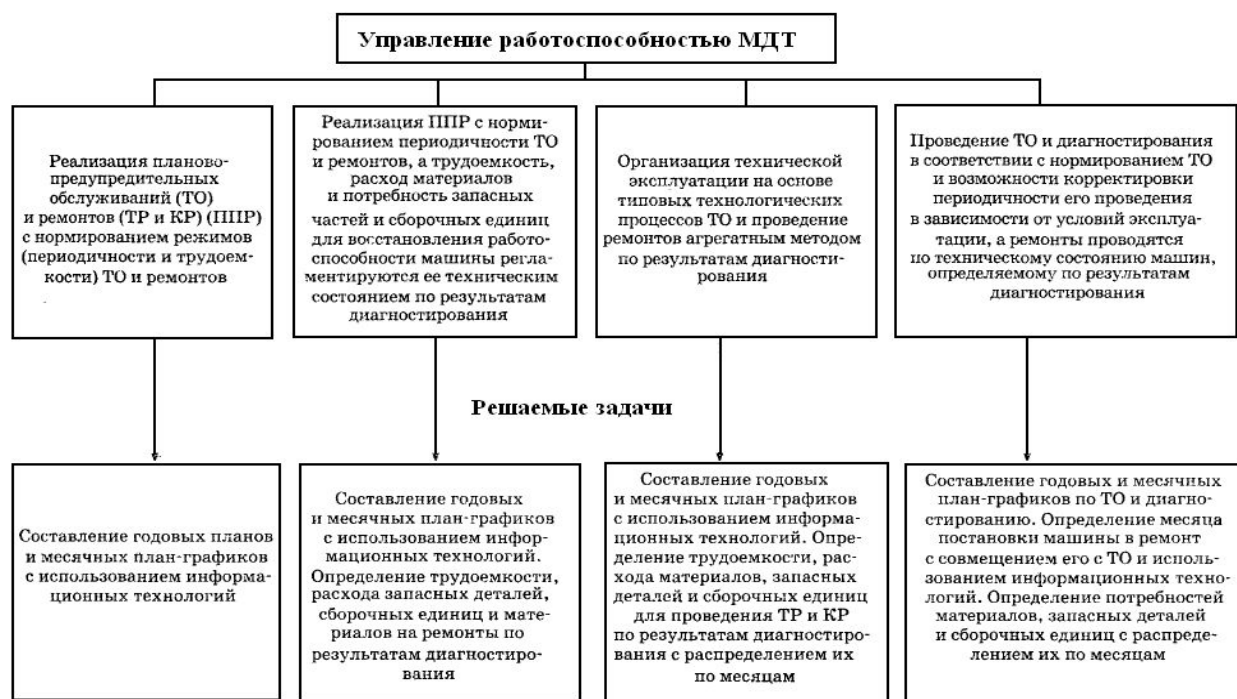


Рис. 1.1. Схема обеспечения работоспособности ТМ

Третий путь обеспечивает организацию технической эксплуатации с использованием типовых технологических процессов технического обслуживания и ремонтов агрегатным способом на основе диагностирования.

Четвертый путь основан на проведении ТО с периодичностью, установленной предприятием-изготовителем, которая изменяется с учетом конкретных условий эксплуатации, а ремонты производятся в зависимости от технического состояния машины, которое определяется диагностированием, совмещённым с плановым обслуживанием. При этом наиболее точно определяется дата ремонт машины, а так же потребность в материалах и запасных частях, необходимых для восстановления работоспособности. Данные задачи в последнее время за рубежом и в нашей стране решаются с помощью автоматизированных систем управления системой ТО и ремонтов – ERP- и EAM-системы.

В середине прошлого века задачи управления материальными объектами на уровне предприятий были достаточно простыми, требовалось получить календарный план производства продукции, на основе договоров поставки и прогноза реализации. Исходя из прогнозируемого плана производства, устанавливалась потребность в сырье, материалах, комплектующих, требующихся для производства. Поставленные задачи решались с помощью автоматизированных систем MPS (Master Production Scheduling) – объемно-календарного планирования.

Дальнейшим развитием этого направления стали ERP (Enterprise Resource Planning) и EAM (Enterprise Asset Management) системы. Термины были введены в 1990 и в 1998 году аналитической компанией Gartner Group и используются во всём мире. Данные термины используются для обозначения, с одной стороны, определенных совокупных методов (методологии) управления материальными активами предприятия, а с другой стороны, наименования определённого класса информационных систем, отвечающих за автоматизацию функций менеджмента и информационную поддержку производства.

Производители ERP систем, пытаясь максимально занять рынок автоматизированного управления материальными активами предприятий, дополнили свои системы программными модулями, отвечающими за управление ТО и

ремонт оборудования. Так, например, модуль ТО и Р (корпорации Oracle) был использован в ERP-системе Oracle E-Business Suite в 2002 году.

ЕАМ системы формировались как независимые информационные продукты, направленные на решение задач, связанных с управлением производственными фондами, а так же ТО и ремонтом.

Ещё одна задача, решение которой требует особого внимания это прогнозирование изменения технического состояния оборудования, без чего невозможно точно планировать производство. Решение этой задачи в большинстве случаев может опираться на использование имитационных моделей – универсальных средств исследований сложных технических систем, представленных логико-алгоритмическим описанием функционирования структурных элементов и правилами взаимодействия между ними, отражающими последовательность каких либо событий, протекающих в реальной системе [86, 113].

Разработчики информационных систем ТО и ремонта, часто создают информационные системы исходя из собственных представлений об их возможностях и приоритетах, из-за этого иногда возникают трудности при их использовании. Для оптимального сочетания интересов потребителей и разработчиков необходима интеграция информационных систем, специально разработанных для решения определённого круга задач. В сфере торфяного производства при реализации представленных методов восстановления работоспособности не учитываются специфические условия эксплуатации торфяных машин, а без их учёта невозможно создать оптимальную систему эксплуатации ТМ.

1.2 АНАЛИЗ ОСОБЕННОСТЕЙ ФРЕЗЕРНОГО СПОСОБА ДОБЫЧИ ТОРФА

Добыча торфа фрезерным способом применяется в промышленности уже давно. Фрезерный способ характеризуется послойно-поверхностной уборкой высушенной до требуемой влажности торфяной крошки. При этом способе добычи торфяная залежь разрабатывается не на всю глубину, а отдельными

слоями с поверхности месторождения, высушивается, а затем убирается в пределах технологического цикла, который может продолжаться один или два дня.

Фрезерная добыча торфа в сравнении с большинством других методов имеет меньшую трудоемкость, это обеспечивает сравнительно невысокую стоимость продукции. Месторождения торфа, которые используются для фрезерной добычи, вначале осушают, а потом подготавливают на них эксплуатационные площадки, которые могут планироваться по нескольким типовым схемам. Чаще всего производственный участок для фрезерной добычи торфа формируют из восьми карт размером 20×500 метров или четырёх карт 40×500 метров [121-123, 177, 178].

Добыча торфа фрезерным методом состоит из трёх основных операций: фрезерование залежи на глубину от пяти до двадцати миллиметров для образования торфяной крошки, после чего производится сушка отфрезерованного слоя до требуемой эксплуатационной влажности, затем просушенный торф собирается уборочными машинными и перемещается к полевым складочным штабелям.

Эффективность просушивания торфяной крошки на открытых площадях месторождений зависит от большого числа факторов, таких как: метеорологические, технологические и почвенные [9, 41-44, 47]. При полевой сушке затраты времени зависят от влагообмена грунта с просушиваемым торфом, на интенсивность которого влияет как влагосодержание так и структурные параметры торфяной крошки и грунта. Кроме того сушка зависит от положения грунтовых вод, уровень которых должен быть не выше нормативных значений. При разработке торфяных месторождений необходимо учитывать метеорологические условия – величину солнечной радиации, длительность светового дня, влажность, давление и температуру окружающего воздуха, наличие облачности, ветра, а так же количество осадков и их интенсивность.

ВНИИТП установлено, при добыче торфа с влажностью 45% технологический процесс с двухдневным циклом прерывается в случае осадков за сутки

более 3 кг/м^2 , при однодневном цикле – более $1,6 \text{ кг/м}^2$, с уборочной влажностью 55...60 % при осадках более 5 кг/м^2 [164]. Время возобновления фрезерования после окончания осадков можно планировать по величине испаряемости с поверхности почвенного испарителя [129]. Рыхление отфрезерованного торфа ворошилками рекомендуется выполнять при количестве осадков в сумме не более $8-10 \text{ кг/м}^2$, при большем количестве осадков необходимо выполнить повторное фрезерование.

Количество добываемого торфа зависит от категории сушки, начальной влажности и других условий. На первом этапе рассчитывается цикловой сбор по (3.2) [6, 15]

$$q_{ц.і} = q_{ц.н} K_{и.τ} K_w, \quad (1.17)$$

где $q_{ц.н}$ – расчётный нормативный цикловой сбор, т/га; $K_{и.τ}$ - коэффициент, который позволяет учесть прогноз испаряемости и запланированную продолжительность цикла; K_w - коэффициент, который учитывает прогнозируемое влагосодержание в сравнении с нормативным.

$$K_{и.τ} = \left(\frac{i_u \tau_u}{i_{у.ср}} \right)^{0,75}, \quad (1.18)$$

где i_u - планируемая испаряемость, кг/м^2 (3.1) [15]; τ_u - запланированная длительность уборочного цикла; $i_{у.ср}$ – значение многолетней средней эффективной испаряемости в течение нормативного цикла, кг/м^2 .

$$K_w = \left(\frac{a_0 + a_1 W_n}{a_0 + a_1 W_{пл}} \right)^{0,75}, \quad (1.19)$$

где a_0, a_1 – значения эмпирических коэффициентов (табл. 3.1 и 3.2) [15]; W_n – установленное нормативами влагосодержание поверхности залежи, кг/кг ; $W_{пл}$ – установленное при разработке планов влагосодержание фрезерной

крошки, которое зависит от дальнейшего использования торфяной продукции, кг/кг. Влагосодержание рассчитывается по формуле

$$W = \frac{\omega}{100 - \omega} \quad (1.20)$$

где ω - относительная влажность, %.

Значение нормативной влажности определяется по таблице 2.1 [15].

Запланированное влагосодержание для первого цикла после выпадения осадков принимается равным нормативному значению W_n . Для второго и последующих циклов после завершения осадков оставшийся сухим объём крошки снижает планируемое влагосодержание $W_{пл}$:

$$W_{пл} = (W_n - W_{уб}) \alpha_c + W_{ср}, \quad (1.21)$$

где $W_{уб}$ – значение влагосодержания торфа соответствующее параметрам уборки, кг/кг; α_c – рассчитанный при планировании работ коэффициент сбора торфа; $W_{ср}$ - среднее влагосодержание торфа по уборочному слою, кг/кг [15].

При использовании валкования торфа машинами скреперного типа в процессе уборки слой сушится до уборочной влажности, при этом $W_{ср} = W_{уб}$, если уборка производится машинами пневматического типа, то весь слой высушивать до уборочного влагосодержания необязательно и значение $W_{ср}$ выбирают по таблице 3.3 [15].

Интенсивность сушки в течение дня может существенно изменяться: в утренние часы интенсивность испаряемости с 9 до 12 часов возрастает, а с 12 ч до 17...18 ч остаётся постоянной, затем медленно уменьшается. Для практических расчётов с достаточной точностью можно принять линейную зависимость интегрального хода испаряемости в утренние и вечерние часы [129].

Активная сушка в течение суток при облачности до 3-х баллов [178] составляет: до 22.05 – с 10 до 18 часов; 23.05...21.07 – с 9 до 19 часов; 22.07...14.08 – с 10 до 18 часов; 15.08 – с 11 до 17 часов.

При облачности 4-6 баллов время сушки снижается на 1,5 часа, а при облачности 7-10 баллов – на 2,5 часа. Технологическими регламентами установлено, что окончание ворошения должно прекращаться за 1...2 часа до конца активной сушки, таким образом, начало ворошения можно планировать в 9-10 часов, а окончание в 17-18 часов.

Например, если цикловая испаряемость составляет $9,0 \text{ кг/м}^2$, а начальная влажность верхового торфа – 74,2%. То необходимо использовать два ворошения за цикл (см. табл.3.6) [15].

В этом случае требуется начать первое ворошение в 17 часов первых суток или 9 часов вторых. Второе ворошение следует выполнить в 14 часов вторых суток. Уборку торфа можно запланировать примерно в 10 часов 40 минут третьих суток. Установленные расчётом сроки ворошения требуется выдерживать, так как отклонения от установленных значений приводят к увеличению длительности сушки. Расчет количества технологических циклов производят по методике ВНИИТП за 10 дней до нормативного срока добычи, также устанавливают категорию сушки (D): при испаряемости за сутки $i_n \leq 1,50 \text{ кг/м}^2$ дни относят к нулевой категории D-0 (сушки нет); при испаряемости 1,51...3,40 – D-1 (слабая сушка); при испаряемости 3,41...5,20 – D-2 (средняя сушка); при испаряемости свыше 5,20 кг/м^2 – D-3 (хорошая сушка).

В дни с осадками более $3,0 \text{ кг/м}^2$ (для торфяной продукции групп Г-2; Г-3; Г-4) и свыше $5,0 \text{ кг/м}^2$ для группы Г-1 уборка не планируется и расчетный коэффициент цикличности C_t принимают равным нулю [178].

Длительность периода ликвидации последствий осадков в большой мере зависит от положения грунтовых вод и категории дней сушки. Для ликвидации последствий осадков свыше $5,0 \text{ кг/м}^2$ обычно требуется более чем одни сутки. При этом в день выпадения осадков превышающих 5 кг/м^2 , после прекращения

дождя в условиях активной сушки на их ликвидацию может потребоваться 12 часов.

Количество планируемых для выполнения уборочных циклов можно считать на любую декаду, месяц или сезон в целом

$$n_{ц.ф} = \frac{\sum F_{с.ф}}{F_n - F_{н.р}}, \quad (1.22)$$

где $\sum F_{с.ф}$ - суммарная площадь участков месторождения запланированная для уборки за анализируемый период, га; F_n , $F_{н.р}$ - общая площадь нетто и плановая величина площади, выводимая в ремонт, га [15].

Помимо метеорологических факторов на сушку оказывает влияние размер и форма частиц торфа, степень переработки, фракционный состав, а также начальная и конечная влажность. В течение уборочного технологического цикла производят от одного до трёх ворошений. При сушке торфа в полевых условиях происходит постепенное снижение влагосодержания от семидесяти пяти - восьмидесяти процентов до сорока - шестидесяти. При двухсуточном уборочном цикле ворошение проводят два-три раза. Ворошение торфа ускоряет сушку на 25-40%. Через три-четыре часа сушки после фрезерования осуществляют первое ворошение, а последнее не позднее, чем за три-четыре часа до уборки **торфа**.

В течение сезона добычи может проводиться около 22-28 двухдневных уборочных циклов в зависимости от свойств торфяной залежи, оборудования используемого для добычи, а также погодных условий. Разработка месторождения может производиться от пяти до пятнадцати лет в зависимости от размеров торфяного пласта, а так же остаточного слоя, который требуется при дальнейшем использовании выработок. Выполнение всех необходимых операций при добыче торфа фрезерным способом осуществляется технологическим оборудованием, объединённым в комплексы, в соответствии с заранее выработанными схемами и графиками работ. Выбор конкретной схемы добы-

чи зависит от дальнейшего использования добытого торфа и применяемых для уборки машин [178]. Наиболее часто при фрезерном способе добычи используются четыре основные схемы работ при производстве торфа.

Процесс добычи, построенный по первой технологической схеме, состоит из операции фрезерования торфяной выработки барабанными фрезерами на глубину от одиннадцати до двадцати миллиметров, с последующими двумя-тремя ворошениями (количество зависит от погодных условий, а так же свойств торфа). После чего проводится валкование сухого торфа и последующая уборка продукции машинами бункерного типа, далее происходит штабелированием собранного торфа штабелирующими машинами. Фрезерование карт проходит по замкнутым схемам с последующим сдвигом на ширину обработанной полосы. Бункерные машины производят уборку одновременно на четырёх картах низинной залежи шириной по сорок метров или восьми картах верховой или смешанной залежи шириной по двадцать метров. Собранный торф укладывается в штабели, расположенные за пределами карт в направлении перпендикулярном осушительным каналам. Комплекс из четырёх или восьми бункерных машин осуществляет загрузку из валков предварительно собранного валкователем торфа двумя колоннами, движущимися по замкнутым траекториям в направлении навстречу часовой стрелки. Цикл уборки торфа по первой технологической схеме проходит обычно в течение двух дней [164, 178].

При использовании второй схемы добычи, уборка торфа производится из наращиваемых валков. Данная схема добычи представляет собой несколько усовершенствованную разновидность первой технологической схемы. При этом на первом этапе совмещаются операции фрезерования залежи с валкованием предварительно высушенного до требуемой влажности торфа с использованием специального фрезер-валкователя. В этом случае фрезерование, совмещённое с валкованием, проводится однократно в течение дня, с последующим ворошением. Уборка торфяной крошки из сформированных валков производится погрузочными машинами в прицепы-самосвалы, доставляющие

убранный торф к складочным штабелям. При реализации второй схемы добычи в центре карты формируется наращиваемый при последующих трёх-пяти циклах валок. Сбор торфяной крошки из укрупнённых валков осуществляется за пределами цикла добычи, который продолжается чаще всего два дня. Такая схема добычи позволяет существенно повысить эффективность производства фрезерного торфа, так как меньше зависит от погодных условий, что способствует более полному использованию метеоблагоприятных для уборки дней. Производительность при второй схеме уборки обычно в два раза выше, чем при других вариантах фрезерной добычи торфа. Так как по представленной технологической схеме завершающий этап уборки торфяной крошки вынесен за пределы уборочного цикла, то при этом можно размещать складочные штабели за пределами технологических площадей. Места расположения штабелей лучше располагать в непосредственной близости от постоянно действующих дорог, что бы обеспечить круглогодичную доставку потребителю торфяной продукции [164, 178].

Третья схема добычи торфа осуществляется с применением перевалочных машин. Данная технологическая схема реализуется за счёт совмещения операций валкования с фрезерованием с использованием специального агрегата, двух ворошений и сбора фрезерной крошки. Уборка высушенного торфа производится перевалочными машинами, работающими индивидуально по челночной схеме, последовательно из пяти-шести валков расположенных с двух сторон штабеля, который формируется параллельно осушительным каналам. Такой способ уборки исключает операцию штабелирования. Цикл уборки может продолжаться один-два дня [164, 178].

При четвёртой технологической схеме уборки используются пневмоуборочные машины. Уборочный цикл состоит из фрезерования залежи на глубину пять-восемь миллиметров, одного ворошения, последующей уборки высушенного в расстиле торфа и штабелирования. Пневмоуборочные ТМ движутся отдельными колоннами, состоящими из четырёх или восьми машин по часовой стрелке с интервалами более двадцати метров. Собранный торф транспорти-

руется в бункерах пневмоуборочных машин к штабелям, размещены на краях уборочной площадки в направлении перпендикулярном осушительным каналам. При использовании пневмоуборочных комбайнов, которые совмещают сбор высушенной торфяной крошки из расстила с фрезерованием, цикл добычи реализуется с помощью всего двух типов машин (комплексный агрегат и ворошилка). Уборочный цикл в этом случае продолжается в течение одного дня [164, 178]. При фрезерной добыче торфа технологические машины объединяются в комплексы, с помощью которых реализуются различные схемы уборки. Внутри комплекса торфяные машины связаны друг с другом в одну технологическую цепочку, нарушение которой приводит к снижению объёмов добычи торфа, а отказ, какой либо машины в начале цепочки, может даже остановить процесс добычи.

1.3 АНАЛИЗ ПАРАМЕТРОВ ИЗНОСА ТРИБОЭЛЕМЕНТОВ ТМ

Практика показывает, что износ большинства трибоэлементов ТМ носит локальный характер, в зоне максимальных нагрузок наблюдается значительный износ. Для определения износа различных узлов наиболее часто используется ряд параметров: объемный износ ΔV ; линейный износ Δh ; масса изношенного материала Δm ; износ трибосопряжения $\Delta h_1 + \Delta h_2$ (с помощью измерения зазора); изменение эксплуатационных характеристик трибопары (изменение утечки); $I_h = \Delta h/S$ интенсивность изнашивания (т.е. линейный износ, отнесённый к длине скольжения); $\Delta h/t$ скорость изнашивания, которая находится с использованием дифференциального или интегрального представления зависимости износа от времени; работа при проскальзывании (в муфтах, определяется по углу проскальзывания, а также крутящему моменту); условия изменения температуры на трибоповерхности T_p , $\delta T/\delta x$ в фрикционных узлах; контактное напряжение (как критерий усталости шестерён); определение сроков использования подшипников качения на основе эквивалентных нагрузок.

В большинстве случаев предпочтительными будут безразмерные величины I_h и I_m интенсивности изнашивания, позволяющие сопоставлять различные механизмы изнашивания, сравнивать время эксплуатации трибосопряжений и действующие в них механизмы трения. Эти параметры в большинстве случаев можно достаточно легко определить.

При проектировании новых трибоузлов, а также при анализе возникновения отказов различных трибоэлементов следует пользоваться возможностями, вытекающими из основных положений триботехники. Особенно при теоретической оценке величин износа, которая получается с минимальными затратами по сравнению с лабораторными или натурными исследованиями.

Расчет основных параметров трения и износа для большинства конкретных случаев используют относительно редко, вследствие недостаточности соответствия расчетных и экспериментальных значений. Однако часто рекомендуют оценивать теоретически трение и изнашивание, так как это позволяет получить нужную информацию для осуществления мероприятий, связанных с модернизацией узлов трения [183].

Достаточно часто затруднительно определить основные факторы, оказывающие влияние на износ, и приходится использовать общие закономерности, так как значения износа и интенсивности изнашивания меняются в процессе работы трущихся поверхностей.

В процессе изнашивания бывает три основных стадии рис.1.2 [112, 193]. На первом этапе достаточно быстро происходит приработка, в этом случае происходит изменяющийся режим изнашивания с достаточно высокой, и постепенно уменьшающейся скоростью износа.

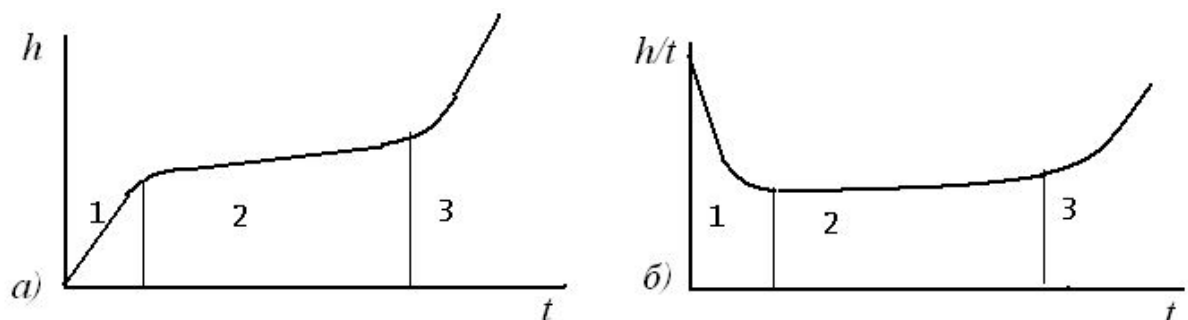


Рис.1.2. Графики изменения во времени: а) абсолютного износа и б) его скорости

Следующая стадия более продолжительная, при ней процесс изнашивания стабилизируется, скорость износа относительно небольшая и приблизительно одинаковая. Данный участок работы соответствует нормальной эксплуатации узла после завершения приработки.

Изменение параметров трибопары может привести к существенному ухудшению параметров эксплуатации, как следствие, скорость износа может интенсивно возрастать, и наступает катастрофический износ, которым характеризуется третья стадия износа, когда прогнозирование остаточного ресурса затруднительно.

В большинстве случаев в трибопарах возникает механическое изнашивание. Оно бывает абразивное (для режущих элементов фрезерующих устройств, скребков валкователей и др.), за счет эффекта схватывания (для деталей фрикционных передач, шарнирных механизмов подвески и др.), усталостное (для подшипников качения, зубчатых передач и др.), коррозионно-механическое (для трибоузлов работающих при повышенной влажности и кислотности в условиях торфяных месторождений), электрическое и др. В подавляющем количестве случаев ведущим является абразивное изнашивание. Природа возникновения этого изнашивания была предметом глубокого анализа в работах М.М.Хрущева, М.А.Бабичева, В.Н.Кашеева, М.М.Тененбаума, Г.М.Сорокина, А.А.Петросянца, У.Икрамова и других. М.М.Хрущев считал, что в процессе абразивного изнашивания происходит микро резание с отделением частиц за счет пластических деформаций, сопровождающихся оттеснением навалов, возникающих при внедрении частиц в поверхность трения [203]. П.Н.Львов считал, что эти навалы представляют собой непрочный материал с большим количеством дефектов. При повторном взаимодействии с навалами абразивные частицы их разрушают с отделением отдельных частиц материала, которые отвечает за массовый и объемный износ.

Абразивное изнашивание может происходить как при воздействии закрепленными частицами (твёрдые частицы, внедрённые в смежную деталь), так и незакрепленными свободными частицами. Например, в подшипниках сколь-

жения жидкого трения изнашивание происходит незакреплёнными твёрдыми частицами, которые попадают в смазку. При неустановившемся режиме смазывания во время запуска или остановки возможен жесткий контакт с этими частицами. Так как в процессе абразивного изнашивания происходит микроцарапание, то данному эффекту было посвящено внимание большого количества исследователей. Процесс абразивного изнашивания можно представить в виде модели, когда происходит взаимодействие конического индентора с пластической плоскостью. Модель воздействия конического индентора под воздействием нормальных N и тангенциальных сил T показана на рис.1.3 [203].

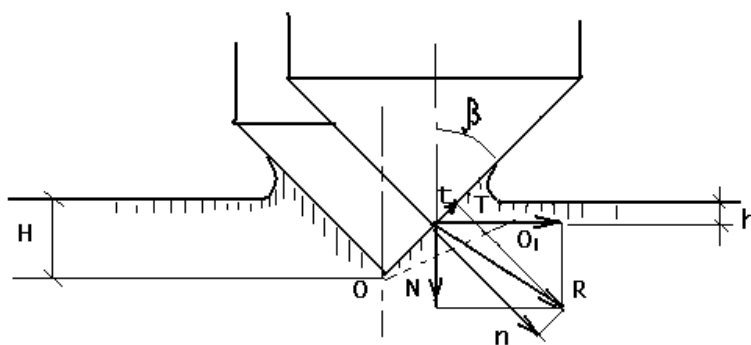


Рис. 1.3. Модель возникновения микроцарапины

При воздействии силы N индентор углубляется в материал на некоторую глубину H . При наложении тангенциальной силы T происходит скольжение конического индентора вверх под действием некоторой силы t . По мере движения конического индентора из материала сила T может стать достаточной для разрушения поверхностного слоя материала на глубине h , после этого происходит процесс отделения микро частиц. Исследованиями Н.Н. Давиденко было установлено, что сила достаточная для царапания пластичных материалов коррелирует с их прочностью на разрыв, которая в свою очередь мало зависит от степени деформационного упрочнения. Следовательно, ширина микро царапины для небольших нагрузок практически не зависит от величины наклёпа, это было определено в ряде проведённых исследований.

Отделение микрочастиц при абразивном виде изнашивании связано не только с самим процессом резания, но и с усталостными свойствами пластиче-

ски деформируемых поверхностей трения как на макро-, так и микро-участках, из-за многоциклового нагружения контактной зоны. При упругом взаимодействии происходит многоцикловая усталость, а в случае пластического контакта – разрушение, которое чаще всего связано с величиной малоциклового усталости.

При пластическом разрушении материала происходит несколько стадий. Вначале образуется физический контакт поверхностей (первый этап), далее возникают активные центры, на которых создаются прочных связи с последующим развитым пластическим течением соседних кристаллитов (происходит второй этап). В процессе трения при образовании отдельных связей происходит одновременный рост площади контактной поверхности. При этом глубинные повреждения могут иметь большие площади, и процесс переходит в сторону образования единичного задира и дальнейшего заедания (происходит третий этап процесса разрушения), что связано с пластической деформацией относительно большого объёма поверхности трения. Например, при высокочастотных колебаниях, возникающих в шарнирных элементах подвески торфяных машин, часто при недостатке смазки происходит схватывание и заедание из-за фреттинга. При этом часто процесс схватывания идет по пути переноса отдельных частиц металла на контр тело. Эффект переноса на сопряженную поверхность трения при отделении относительно тонких слоев бывает полезен, так как обеспечивает защиту от последующих глубинных разрывов и определяет антифрикционные свойства поверхностей скольжения.

1.4 МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ НА ИЗНОС

Любую машину с точки зрения надёжности можно структурно разбить на системы нескольких уровней, на самом нижнем уровне находятся сопряжения трения - трибозлементы. Диагностику которых, можно осуществлять при проведении лабораторных, стендовых и эксплуатационных испытаний. Для наиболее ответственных узлов торфяных машин износ можно определять

непосредственно при эксплуатации для того, чтобы устанавливать предельное состояние трибоэлементов в реальных условиях.

В конкретных условиях эксплуатации торфяных машин измерение величины износа может проводиться несколькими методами [3, 36, 39, 84, 138, 161, 198].

При подготовке эксперимента бывает важно заранее определить его рамки, установить, как он будет проводиться, каким будет пассивным или активным, много или однофакторным. В случае однофакторного эксперимента можно получить результаты с достаточной точностью, но затруднительно учесть возможный синергетический эффект от действия других составляющих анализируемого при исследованиях процесса. Активный эксперимент в большинстве случаев начинается со сбора информации и обязательно заканчивается интерпретацией результатов, полученных во время исследования. Для этих целей широко используются математические методы анализа. Основной задачей использования различных математических методов при планировании экспериментов является получение математического описания функции отклика, связывающей какие либо результирующие параметры описания процесса с варьируемыми факторами, на основе анализа математической модели процесса. Ещё одним существенным фактором, оказывающим непосредственное влияние на подготовку экспериментов и проведение запланированных исследований, является материальное обеспечение, которое зависит от технического состояния конкретных объектов анализа и используемого контрольно-измерительного оборудования. Состав измерительных систем зависит от конструкции торфяных машин и условий их эксплуатации. Выбор большинства конкретных диагностических систем зависит от достаточно большого количества факторов, но в подавляющем количестве случаев для диагностирования машин лучше применять измерительную аппаратуру, позволяющую проводить измерения без вывода торфяных машин из эксплуатации.

В настоящее время для проведения исследований триботехнических характеристик имеется широкий ряд типовых контрольно-измерительных ма-

шин, которые предпочтительно использовать для определения параметров трения и износа. Эти машины отличаются по назначению, принципу действия и конструкции [84, 126]. Однако при проведении лабораторных испытаний могут использоваться и специальные установки, разработанные для конкретных экспериментов целевого назначения, это позволяет добиться максимально полного соответствия условий испытаний с реальной эксплуатацией.

ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЯ

Эксплуатация ТМ связана с воздействием большого количества факторов: климатических, грунтовых, режима работы, характера выполнения работ, уровня технического обслуживания и ремонта.

Анализ состояния рассматриваемой проблемы показал, что эксплуатация торфяных машин имеет ряд особенностей, без учёта которых невозможно добиться высокой эффективности их использования. 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.

2 РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ НАДЁЖНОСТИ ТОРФЯНОЙ МАШИНЫ

2.1 ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ НАДЁЖНОСТИ ТОРФЯНЫХ МАШИН

Одной из задач, которые могут решаться с помощью автоматизированных систем управления эксплуатацией, является прогнозирование отказов, что позволяет анализировать их последствия на технологический процесс добычи торфа. Наиболее значительные потери рабочего времени ТМ происходят при возникновении непредвиденных отказов 2-ой и особенно 3-ей групп сложности, когда для ремонта машины требуется её эвакуация с производственного участка добычи. По исследованиям, проведённым в ОАО «Васильевский мох» количество отказов торфяных машин растёт с увеличением наработки. Для выявления основных закономерностей эксплуатации торфяных машин было проведено исследование. Статистические данные получены для бункерных уборочных машин МТФ-43А и МТФ-43А-К, фрезерных барабанов Ф-6,5 и ворошилок ВС-9,6 (для представленных машин был проведён анализ их структуры на основе технической документации, выявлены основные элементы (от 22 до 108), влияющие на безотказность). Машины эксплуатировались на производственных участках, расположенных на верховом типе залежи со средней степенью разложения торфа 25%, объёмной пнистостью 1-2%, второго года эксплуатации. Условная влажность собираемого торфа 40%, глубина фрезерования залежи 0,011 м, эксплуатационная влажность 80%.

Рассматривались три группы машин: в первую входили четыре уборочных машины МТФ-43А, два фрезерных барабана Ф-6,5, ворошилка ВС-9,6 и валкователь ВТ-9.8; во вторую и третью по четыре уборочных машины МТФ-43А-К, два фрезерных барабана Ф-6,5, ворошилки ВС-9,6 и валкователи ВТ-9.8.

При планировании экспериментального исследования надёжности ТМ была произведена оценка минимального количества наблюдений. По формуле

1.10 минимальное количество наблюдений 22 при вероятности безотказной работы $P(t)$ 0,9 и доверительной вероятности β 0,9. Так как по результатам эксплуатации ТМ в ОАО «Васильевский мох» в 2011 году для фрезерных барабанов и ворошилок число наблюдений было недостаточным, то исследования были продолжены в 2012 году.

За два года исследований в ОАО «Васильевский мох» наблюдалось 30 торфяных машин. Эксплуатация исследуемого типа машин рассматривалась в периодах наработки до 1200 моточасов. Так как число наблюдений по каждому типу машин превышало 30, то в соответствии с методикой, представленной в разделе 1.1 для анализа статистических характеристик, периоды наблюдений были разделены на интервалы (для уборочных машин по 80 моточасов, для фрезерных барабанов и ворошилок по 40 моточасов). На каждом интервале фиксировалось среднее количество отказов на машину, средняя наработка на отказ, время восстановления. По результатам анализа наблюдений рассчитывалось среднее время безотказной работы, среднее квадратическое отклонение наработки на отказ, среднее время восстановления с учётом ожидания ремонта. В процессе анализа результатов исследования рассчитывался коэффициент готовности исследуемых машин

$$K_g = \frac{t_{cp}}{t_{cp} + t_g}, \quad (2.1)$$

где t_{cp} – время средней наработки на отказ, t_g – среднее время восстановления оборудования, включая время ожидания ремонта, ч (таб. 2.1).

Таблица 2.1

Статистические характеристики эксплуатации машин

Тип машин	Среднее время безотказной работы t_{cp} , ч.	Среднее квадратическое отклонение σ	Коэффициент асимметрии A_s	Экссесс E_{xx}	Среднее время восстановления t_g , ч.	Среднее квадратическое отклонение от среднего времени восстановления σ_g , ч.	Коэффициент готовности K_g
МТФ-43А	12,5	11,2	1,9	5,0	6,1	5,9	0,67
МТФ-43А-К	19,5	18,9	1,7	3,5	4,6	4,7	0,81
Ф-6,5	17,2	12,6	2,3	3,1	6,0	4,9	0,74
ВС-9,6	81,3	79,5	3,2	2,8	6,1	3,3	0,93

При эксплуатации уборочных машин МТФ-43 часто происходит остановка из-за заклинивания элеватора древесными остатками, в среднем одна остановка на 8 часов уборки. Если после освобождения элеватора машина могла продолжать работу, то отказ считался несущественным и не учитывался. В некоторых случаях происходили отказы предохранительной муфты элеватора (в среднем один на 14 часов работы машины). Отказы были как первой группы сложности (требовалась регулировка фрикционной муфты), так и второй группы (требовалась замена фрикционных накладок и других деталей механизма). Следующим по частоте возникновения был сход цепи элеватора со звёздочек из-за попадания древесных остатков (один на 26 часов работы), отказы карданных передач (один на 34 часа работы), поломка муфты включения механизма выгрузки (одна на 46 часов работы), разрыв цепи элеватора (один на 65 часов работы) и др. Отказы машин, выработавших ресурс свыше 1000 моточасов, происходили более чем в два раза чаще, чем у машин, выработавших ресурс менее 400 моточасов.

При работе фрезерных барабанов наиболее часто происходила остановка фрез из-за буксования предохранительных муфт (в среднем один отказ на 36 часов работы), отказы карданных передач (один отказ на 56 часов работы), отказ редуктора привода фрез (один отказ на 96 часов работы), поломка режущих элементов и др. Большинство отказов возникали при попадании в обрабатываемой залежи древесных остатков. Для фрезерных барабанов с небольшой наработкой (до 200 моточасов) последствия от взаимодействия с древесными включениями менее значительны, отказов вдвое меньше, чем для фрезеров с большим ресурсом.

Выход из строя ворошилок происходил из-за попадания древесных включений в залежи. Наиболее часто гнулись лопатки ворошилки, деформировались рамы секций, так же происходило заедание в шарнирных механизмах подвески и др.

Усреднённые данные, полученные по результатам исследования (см. таб. 2.1) дают чрезмерно широкие интервалы рассеяния времени безотказной рабо-

ты и восстановления работоспособности, поэтому для уточнения влияния конкретных отказов на производительность соответствующей машины был проведён анализ параметров работоспособности с разделением по сложности, что позволило учитывать особенности технического состояния исследуемых ТМ.

При моделировании процесса эксплуатации учитывался не только коэффициент готовности соответствующей ТМ, но и распределение отказов по сложности, так как это оказывает определяющее влияние на время восстановления работоспособности конкретной машины.

При проведении исследований в ОАО «Васильевский мох» не было достоверной информации для ряда машин во всём интервалах наблюдений (для уборочных машин на интервале наработки от 440 до 960 моточасов, для фрезерных барабанов от 400 до 640 моточасов), поэтому для указанных интервалов использовались данные полученные другими специалистами в Объединении «Калининторф» для аналогичных машин [91]. В таблице 2.2 представлены результаты исследования безотказности торфяных машин с разделением отказов по сложности, полученные по наблюдениям аналогичных машин за несколько сезонов добычи в Объединении «Калининторф» и ОАО «Васильевский мох».

После распределения отказов по сложности были установлены средние наработки между ними, что позволило использовать полученные данные при моделировании эксплуатации рассматриваемых торфяных машин. Так же были определены основные статистические параметры распределения наработки ТМ (таб. 2.3), которые позволяют выбрать закон распределения случайной величины. Для уборочных машин и фрезерных барабанов коэффициент вариации находится в пределах от 0,3 до 0,5, для распределения случайных величин может использоваться как закон нормального распределения, так и экспоненциальный или Вейбула-Гнеденко (закон Вейбула-Гнеденко является наиболее универсальным). Для ворошилок значение коэффициента вариации было более 0,5, поэтому может использовался экспоненциальный закон или Вейбулла-Гнеденко.

Таблица 2.2

Параметры безотказности торфяных машин по данным
Объединения «Калининторф» и ОАО «Васильевский мох»

Наработка моточасов	Число машин	Отказы 1-й группы сложности		Отказы 2-й группы сложности		Отказы 3-й группы сложности	
		Среднее число отказов	Средняя наработка на отказ	Среднее число отказов	Средняя наработка на отказ	Среднее число отказов	Средняя наработка на отказ
Бункерные уборочные машины МТФ-43А, МТФ-43А-К							
0—80	24	1,33	60.1	1,16	69	0,5	160
80—160	22	1,5	53,3	1,33	60,1	0,54	148
160—240	24	1,29	62	1,33	60,1	0,83	96,4
240—320	22	1,6	50	1,36	59	1	80
320—400	22	1,95	41	1,45	55,2	0,83	96.4
400—480	4	2,5	32	1,5	53.3	0,81	98,7
480 – 560	4	2,5	32	1,5	53,3	0,75	106,7
560 – 640	3	2,4	33	1,33	60.1	1	80
640 – 720	3	2,4	33	1,33	60.1	0,67	419,7
720 – 800	2	3	26,7	1,5	53.3	1	80
880 – 960	8	2,5	32	1,25	64	1	80
960—1040	8	2	40	1.5	53.3	1	80
1040—1120	8	2,5	32	2,25	35,5	1,25	64
1120—1200	8	2,25	35,5	2	40	1.5	53,3
Фрезерные барабаны Ф-6,5							
0—40	17	0,7	57	0,82	48,8	0,9	44,4
40—80	16	1,06	37.7	1,19	33,6	1,25	32
80—120	15	1,07	37.4	0,8	50	1,47	27,2
120—160	14	1,42	28,2	1,5	26,7	0,85	47
160—200	8	1,12	35,7	1,25	32	1,5	26,7
200—240	8	1,25	32	1,5	26,7	2	20
240—280	8	1,75	22,8	1,25	32	1,5	32
280—320	6	1,67	23,9	1,33	30	2	20
320—360	6	1,67	23,9	1,67	23,9	2	20
360—400	5	1,8	22,2	1,4	28,6	2	20
640—680	4	1,5	32	2	20	1,75	22,9
680—720	4	1,5	32	1	40	2	20
720—760	4	2,5	16	2,5	16	2	20
Ворошиллки ВС-9.6							
0—40	12	0,08	500	0,08	500	0,33	121,2
40—80	10	0,1	400	0,1	400	0,5	80
80—120	12	0,25	160	0,25	160	0,5	80
120—160	12	0,16	250	0,25	168	0,67	59,7
160—200	10	0,4	100	0,4	100	0,5	80
200—240	9	0,5	80	0,33	121,2	0,5	80
240—280	9	0,44	90,9	0,33	121,2	1	40
280—320	6	0,5	80	0,5	80	0,83	48,2
320—360	5	0,56	71,4	0,4	100	1,6	25

Принятые гипотезы были проверены с помощью критерия Пирсона. Так как при уровне значимости β равном 0,95, 5-и и 4-х степенях свободы после объединения интервалов, значение критерия $\chi^2_{набл}$ (по результатам наблюдений от 5,3 до 8,5) меньше $\chi^2_{кр}$ (критического 11,1 и 9,5 соответственно), значит, предлагаемые гипотезы не противоречат опытным данным. Так же для

полученных значений математического ожидания по результатам эмпирического исследования были определены доверительные интервалы.

Таблица 2.3

Статистические характеристики эксплуатации машин, распределённые по сложности

Тип машин	Сложность отказа	Среднее время безотказной работы $t_{ср}$, ч.	Среднее квадратическое отклонение σ	Доверительный интервал, ч.	Вариация V	Коэффициент асимметрии A_s	Экссесс E_{xx}	Среднее время восстановления $t_{в}$, ч.	Среднее квадратическое отклонение от среднего времени восстановления $\sigma_{в}$, ч.
МТФ-43	1	36,5	11,7	7,2	0,32	0,73	1,24	1,8	0,64
	2	54,1	16,9	7,9	0,31	0,06	0,9	5,9	1,7
	3	119	95,3	66	0,8	9,8	3	19,2	4,5
Ф-6,5	1	29,6	10,7	7,3	0,36	4,1	1,6	2,2	0,75
	2	31,4	10	8,2	0,31	0,08	0,64	6,3	1,95
	3	76,1	9,4	5,4	0,34	0,7	1,3	21,3	4,3
ВС-9,6	1	119,5	95,6	72	0,8	0,32	1,2	1,75	1,1
	2	194,5	149,6	83	0,8	1,24	1,6	6,1	1,86
	3	168,2	128,5	62,2	0,76	0,39	0,3	19,8	5,1

После проведения исследований в ОАО «Васильевский мох» отказы были классифицированы по сложности и рассчитаны показатели потока отказов в зависимости от наработки торфяных машин (таб. 2.4), также был проведён анализ структуры исследуемых машин, выявлены основные элементы оказывающие влияние на их надёжность и построены гистограммы зависимости потока отказов от количества таких элементов и наработки.

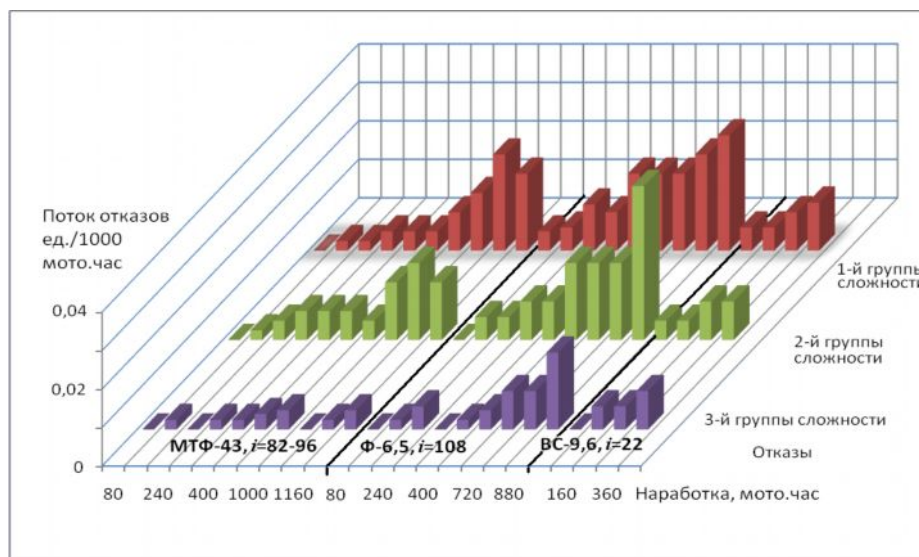


Рис. 2.1. Изменение потока отказов ТМ от наработки
(i – количество элементов, влияющих на безотказность ТМ)

Из гистограммы, представленной на рис. 2.1 видно, что число отказов зависит не только от наработки, но и от количества элементов влияющих на

безотказность. Количество отказов коррелирует с числом элементов отвечающих за безотказность машины.

Таблица 2.4

Показатели безотказности торфяных машин по данным ОАО «Васильевский мох»

Наработка моточасов	Число машин	Отказы 1-й группы сложности		Отказы 2-й группы сложности		Отказы 3-й группы сложности	
		Среднее число отказов	Поток отказов, 1/ моточ.	Среднее число отказов	Поток отказов, 1/ моточ.	Среднее число отказов	Поток отказов, 1/моточ.
Бункерные уборочные машины МТФ-43А, МТФ-43А-К							
0—80	8	—	—	—	—	—	—
80—120	8	1,25	0,031	—	—	—	—
120—160	8	—	—	—	—	—	—
160—200	8	1,25	0,031	1,25	0,031	1,25	0,031
200—240	16	0,56	0,014	0,56	0,014	—	—
240—280	16	1,25	0,031	—	—	—	—
280—320	16	1,37	0,034	1,25	0,031	—	—
320—360	16	1,37	0,034	1,37	0,034	0,56	0,014
360—400	16	1,5	0,037	1,5	0,037	1,25	0,031
400—440	16	1,5	0,037	1,5	0,037	—	—
960—1000	8	2,5	0,06	1,25	0,031	1,25	0,031
1000—1040	8	1,5	0,037	1,5	0,037	1,37	0,034
1040—1120	8	1,5	0,037	2,25	0,056	—	—
1120—1160	8	2,25	0,056	2	0,05	1,5	0,037
Фрезерные барабаны Ф-6,5							
0—40	8	—	—	—	—	—	—
40—80	8	1	0,025	—	—	—	—
80—120	8	0,5	0,0125	0,25	0,006	—	—
120—160	8	1,25	0,031	—	—	0,25	0,006
160—200	6	0,5	0,0125	1	0,025	—	—
200—240	6	1	0,025	—	—	—	—
240—280	6	1,33	0,033	1	0,025	1	0,025
280—320	4	1	0,025	1	0,025	—	—
320—360	4	1	0,025	2	0,05	—	—
360—400	4	1,5	0,037	—	—	2	0,05
640—680	4	1,5	0,037	2	0,05	—	—
680—720	4	1,5	0,037	1	0,025	—	—
720—760	4	2,5	0,06	2,5	0,06	2	0,05
Ворошилки ВС-9.6							
0—40	3	—	—	—	—	—	—
40—80	3	—	—	—	—	—	—
80—120	6	0,16	0,004	0,16	0,004	—	—
120—160	6	—	—	—	—	0,16	0,004
160—200	6	0,33	0,008	0,33	0,008	—	—
200—240	6	0,5	0,0125	0,33	0,008	—	—
240—280	6	0,33	0,008	0,33	0,008	0,33	0,008
280—320	4	0,5	0,0125	0,5	0,0125	—	—
320—360	4	—	—	—	—	0,5	0,0125

Статистические данные, полученные при исследовании параметров надёжности торфяных машин в ОАО «Васильевский мох» соответствуют аналогичным данным полученным другими специалистами [91] и позволяют опре-

делить изменение потока отказов ТМ от наработки и количества трибоэлементов, что использовалось при моделировании.

На рисунке 2.2 показано изменение потока отказов первой группы сложности в зависимости от наработки машин в % от интервала до капитального ремонта.

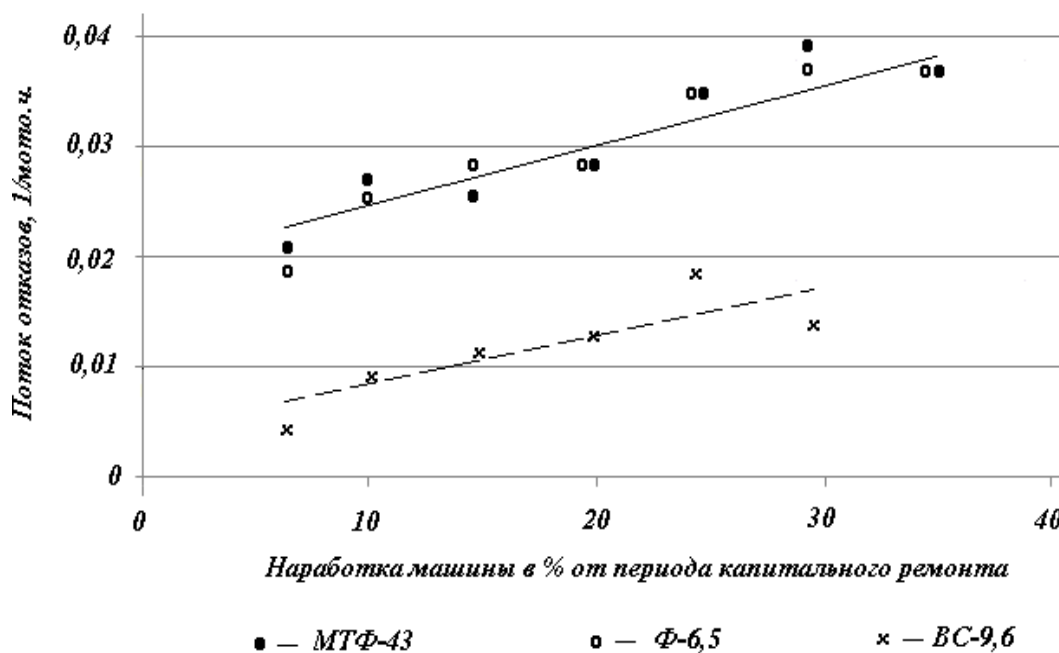


Рис. 2.2. Изменение потока отказов первой группы сложности ТМ в зависимости от наработки, полученное по результатам исследования в ОАО «Васильевский мох»

Из данных представленных на рис. 2.2 видно, что с ростом наработки поток отказов увеличивается для рассматриваемых машин и зависит от группы сложности количества основных трибоэлементов. Сплошная прямая на рис. 2.2 — обобщенная зависимость изменения потока отказов первой группы сложности от наработки для машин МТФ-43 и фрезерных барабанов Ф-6,5, пунктирная прямая для ворошилок ВС-9,6.

Таким образом, для уточнения теоретической зависимости необходимо использовать выражение, в котором учитываются эти характеристики

$$n = vi(1 + \omega t / T_{\text{кр}})t, \quad (2.2)$$

где n – количество отказов, v – коэффициент, связывающий количество основных трибоэлементов и начальный поток отказов, в зависимости от группы сложности (для отказов первой группы $2,2 \times 10^{-4}$, для отказов второй группы 9×10^{-5} , для отказов третьей группы 6×10^{-5}), ω – эмпирический коэффициент изменения потока отказов от наработки (0,45).

Для машин МТФ-43 по выражению 2.2 при наработке 120 мото.ч. среднее количество отказов первой группы сложности получено 2,44, при наработке 200 мото.ч. 4,09. Для выбранного интервала теоретическое значение частоты отказов получено 1,65, для соответствующего интервала эмпирическое значение 1,25. По выражению 1.7 i -тое значение критерия Пирсона получено 0,13. Аналогично получены значения для других интервалов и рассчитано суммарное значение $\chi^2 = 0,78$. Так как значение близко к нулю, то эмпирические и теоретические частоты совпадают, и выражение 2.2 может быть использовано при реализации имитационной модели.

2.2 ПРЕДПОСЫЛКИ СОЗДАНИЯ МОДЕЛЕЙ НАДЁЖНОСТИ ТОРФЯНЫХ МАШИН

При описании производственного участка добычи торфа со стороны объёма выполняемых работ, его можно представить в виде множества C – суммарного объёма выполняемых работ технологическими машинами за сезон добычи торфа (рис. 2.3). Значение C рассчитывается в условных единицах, где одна единица это объём работ выполненных какой-либо технологической машиной, приходящийся на количество торфа добытого за один день. Множество C определяется прямым произведением множества A – производительности технологических машин a_k в условных единицах на множество B_{Ik} – дней работы k -той технологической машины в сезон добычи торфа.

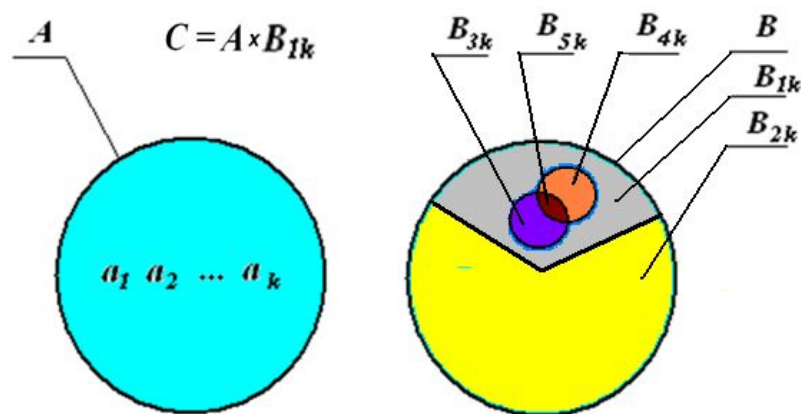


Рис. 2.3. Множества A – производительности торфяных технологических машин и соотношение объёмов множества дней в году

(B_{1k} – дни добычи торфа, B_{2k} – дни между сезонами добычи, B_{3k} – дни ТО и ремонта, B_{4k} – дни с неблагоприятными погодными условиями, B_{5k} – дни ТО и ремонта приходящиеся на дни с неблагоприятными погодными условиями)

Так как производительность торфяных машин в основном определяется их конструкцией, то суммарный объём выполняемых за сезон добычи работ в большей мере будет зависеть от количества дней добычи B_{1k} .

Количество дней добычи в году B_{1k} зависит от времени нахождения машины в ТО и ремонте, а также от неблагоприятных погодных факторов. В том случае, если торфяная машина будет обслуживаться и ремонтироваться в дни с неблагоприятными погодными условиями, то количество дней добычи B_{1k} в году увеличится, а, следовательно, вырастет объём добычи торфа.

Продолжительность конкретного цикла добычи зависит от метеорологических условий, состояния машин, обеспеченности персоналом, их квалификацией, а так же материально-технического снабжения и других факторов. По данным ОАО «Васильевский мох» в 2007 году за сезон добычи было проведено в среднем 22 двухдневных цикла уборки, добыто свыше 50000 тонн фрезерного торфа. При этом за период добычи было 17 дождливых дней, суммарное количество осадков 217 мм, дней с категорией сушки $D0$ – 16, $D1$ – 29, $D2$ – 40, $D3$ – 19 (рис. 2.4).

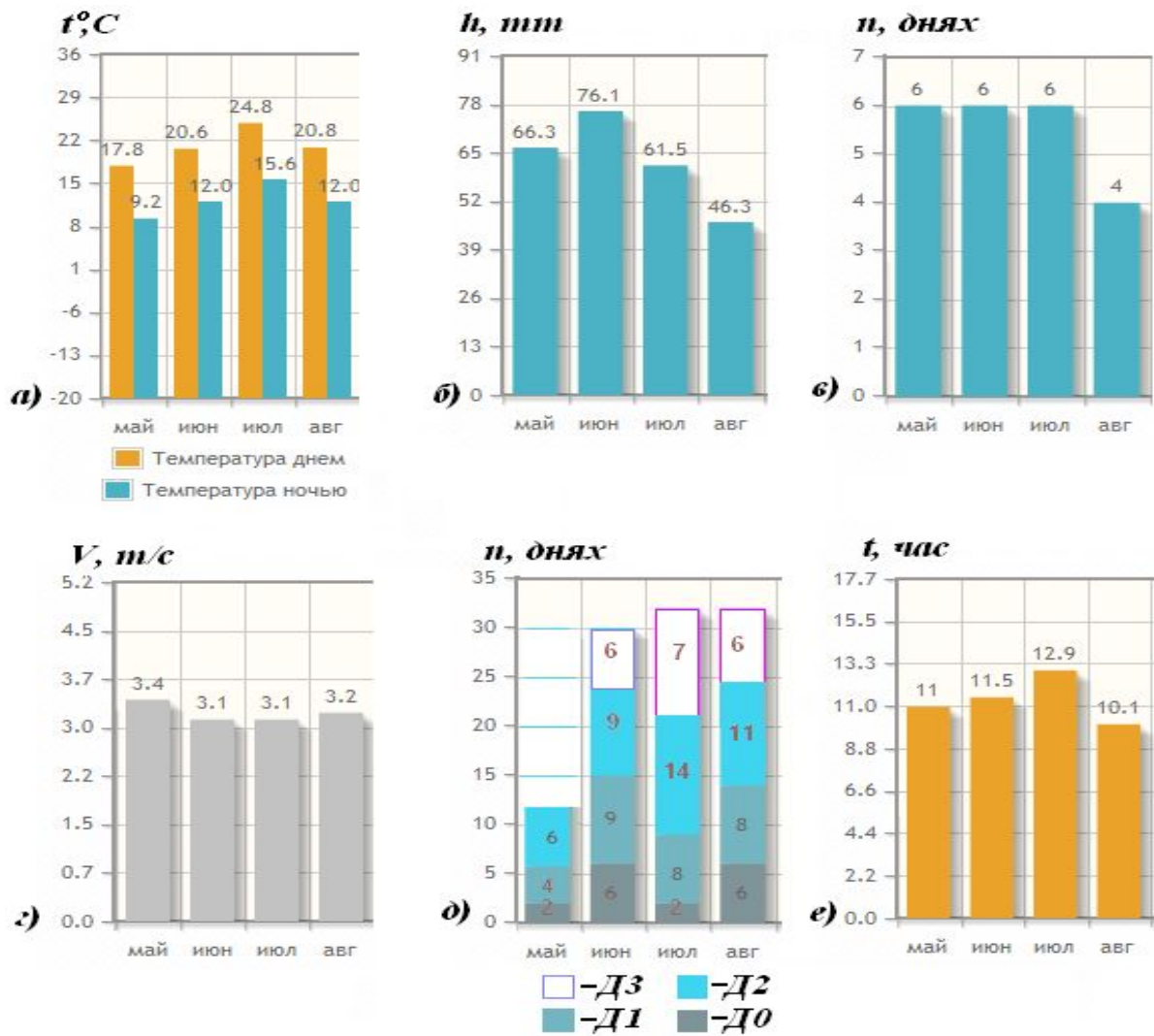


Рис. 2.4 Метеорологические условия на месторождениях ОАО «Васильевский мох» в 2007 году; а) средняя температура, б) количество осадков, в) количество дней с осадками, г) скорость ветра, д) категории сушки торфа, е) средняя продолжительность солнечной погоды за день

Среднюю фактическую продолжительность цикла уборки, анализируемого периода можно рассчитать

$$\tau_{\text{вц.ф}} \approx \frac{T_y - t_{\text{н.у}}}{n_{\text{ц.ф}} - \sum C_{\text{н.ф}}}, \quad (2.3)$$

где T_y - суммарное число дней, когда уборка торфа выполнялась; $t_{\text{н.у}}$ - дни с неблагоприятными метеорологическими условиями, когда уборка торфа проводилась на площади менее 25% от имеющейся при механическом, и менее 50 % при пневматическом принципах сбора; $n_{\text{ц.ф}}$ - фактическое количество вы-

полненных циклов; $\sum C_{н.ф}$ - суммарное значение коэффициентов цикличности за дни с неполной уборкой при неблагоприятных метеорологических условиях [15, 129, 136, 137]. Фактический коэффициент цикличности можно определить:

$$C_{н.ф} = \frac{F_{с.ф}}{F_n - F_{н.р}}, \quad (2.4)$$

где $F_{с.ф}$ – фактически убранная площадь за сутки, га.

Представленные характеристики позволяют анализировать уже осуществлённый процесс добычи торфа, но не дают возможности прогнозирования производственного процесса в зависимости от метеорологических условий, изменения технического состояния ТМ и возможного совмещения, ТО и ремонтов с метеонеблагоприятными днями, что может повысить эффективность использования торфяных машин.

Время выполнения, какой либо i -той операции по добыче торфа, можно определить исходя из объёма выполняемых работ, производительности и количества технологических машин

$$t_i = \frac{Q}{n \times q}, \quad (2.5)$$

где Q – объём выполняемых работ на операции в га,

q – производительность технологической машины в га/ч,

n – количество технологических машин участвующих в технологической операции.

При отказе технологической машины необходимо учитывать потери рабочего времени на восстановление работоспособности, так как технологический цикл имеет строгие границы, за пределы которого выходить не рекомендуется, вследствие нарушения процесса добычи торфа.

Так, например, уборка торфа может производиться пневмоуборочными машинами. Активная сушка торфяной фрезерной крошки происходит, начиная с 9 часов утра до 17 часов, а уборка должна производиться не позднее 20-22

часов. Поэтому при благоприятных погодных условиях с 9 часов утра в течение 3-4 часов происходит сушка предварительно фрезерованного слоя, затем производится ворошение в 12-13 часов дня, а после второй сушки производится уборка высушенного торфа пневмоуборочными машинами из расстила в районе 16-19 часов вечера.

При отказе какой-либо технологической машины требуется время на устранение неисправности, в результате чего происходит смещение последующих технологических операций на более позднее время. Если в результате смещения уборка производится до времени наступления неблагоприятных условий, то потери от отказа можно считать несущественными. Если уборка не может быть завершена до наступления неблагоприятных условий, то неубранный остаток переносится на следующий уборочный цикл, что приводит к дополнительным затратам, величина которых определяется индивидуально. Ущерб от простоя машины при отказе должен определяться с учётом влияния на весь технологический процесс добычи торфа в целом.

Для раскрытия сущности взаимодействия процессов добычи торфа во времени, допустим, что на производственном участке при двух дневном цикле необходимо добыть 320 тонн торфа. Производственный участок эксплуатируется четвёртый год, расположен на низинном типе залежи со средней степенью разложения 28%, пнистостью 0,9%, условной влажностью добытого торфа 55%. Необходимое количество технологических машин для реализации процесса добычи определяется исходя из их производительности (таб. 2.5).

Для первой технологической схемы добыча на производственном участке площадью 64 га с картами 40×500 метров может реализовываться с помощью нескольких машин, например: четырёх фрезерных барабанов МТФ-10 ($4a_3$ – в соответствии с обозначением в таблице 2.3), одной ворошилки ВС-9.6 (b_1), одного валкователя ВТ-9.8 (c_1), восьми бункерных уборочных машин МТФ-43А-К ($8d_1$). В этом случае комплект машин G_1 для добычи торфа можно представить в виде

$$G_1 - (4a_3), (b_1), (c_1), (8d_1).$$

Таблица 2.5

Производительность торфяных машин по добыче фрезерного торфа

Машина	Марка	Тягач	Ширина Захвата, м	Скорость, км/ч	Ширина карты, м	Производитель- ность q , га/ч	Обозначение ма- шины в технологи- ческом комплексе
Фрезерные барабаны	Ф-6.500.000А	ДТ-75ДТХС	6,5	7,1	40 20	5,2	a_1
						5,5	a_2
	АТФ-10	МТЗ-1221	9,8	5-8	40 20	4,7	a_3
						7,2	a_4
Ворошилки	ВС-9.6	РТ-М-160У	9.6	10,8	40 20	7,9	b_1
						7,7	b_2
	КÄ-18	РТ-М-160У	18	10,8	40 20	15,4	b_3
						16,7	b_4
	JPI-9	ДТ-75ДТХС	8,85	10	40 20	10	b_5
						8	b_6
		РТ-М-160У	8,85	15	40 20	15	b_7
						12	b_8
	АТВР-19	РТ-М-160У	19 19,5	7,6 12,9	40 20	13,5	b_9
						24,5	b_{10}
Валкователь	ВТ-9.8	ДТ-75ДТХС	9,9 9,3	10,3	40 20	9,05	c_1
						8,9	c_2
Фрезер- валкователь	МТФ-96	ДТ-75ДТХС	5.0	6,08	-	1,79	c_3
		Т-4А	5.0	8.53	-	2,5	c_4
		РТ-М-160У	5.0	10,5	-	3,08	c_5
Бункерная машина	МТФ-43А-К	ДТ-75ДТХС	3,2- 4,75	9,4	40 20	1,92	d_1
						1,92	d_2
Прицепная пневмоубо- рочная машина	МПТУ-30	МТЗ-1221	3,65	4-8	40 20	1,37	d_3
						2,74	d_4
	I-40 V	РТ-М-160У	4	6 8	40 20	1,7	d_5
						3,4	d_6

Аналогично можно представить другие возможные комплекты машин для добычи торфа с использованием разных технологических схем, и отразить их в виде

$$G_n = \begin{cases} 4a_3, b_1, c_1, 8d_1; \\ 3a_3, b_5, c_1, 4d_1; \\ b_1, 4c_3; \\ 2a_1, b_1, 4d_6; \\ \dots \end{cases}.$$

Условно при моделировании, для учёта доли работ каждой машины в объёме часовой добычи торфа, суммарная валовая производительность уборочных машин делилась на число машин в комплекте и умножалась на коэффициент K_p , учитывающий затраты на ремонт площадей (0,95 при объёмной пнистости до 0,5%, 0,9 до 1% и 0,85 более 1%)

$$q' = K_p \frac{Q'}{4+1+1+8}, \quad (2.6)$$

где Q' - суммарная производительность уборочных машин в комплекте в т/ч,
 q' - часовая условная производительность машины в т/ч,
 числа в знаменателе – количество различных машин в комплекте (например, для первого комплекта).

Установив значение сбора и стоимость добытого торфа, можно определить условный ущерб от отказа, какой-либо машины участвующей в технологическом процессе, что необходимо для анализа последствий отказа каждой машины при моделировании.

Существенные последствия от отказа машин, которые функционируют в начале технологического процесса и представлены одной единицей, например ворошилка ВС-9.6 или валкователь ВТ-9.8. При отказе этих машин технологический процесс затормаживается вплоть до устранения отказа.

При отказе машин, которые функционируют в конце технологического процесса, если таких машин участвует в техпроцессе несколько, потери могут быть менее значительные.

Например, при использовании четвёртой технологической схемы для уборки фрезерного торфа из расстила с шестнадцати гектаров четырьмя пневмоуборочными машинами МПТУ-30 потребуется приблизительно 2,6 часа. При отказе одной из машин остальным для уборки шестнадцати гектар потребовалось бы 3,4 часа, то есть потери времени составили бы 0,8 часа.

В том случае, если в течение цикла добычи не возникнет изменений погодных условий, приводящих к остановке добычи, то значимых потерь из-за отказа одной машины не возникнет. Если в конце цикла добычи возникнут неблагоприятные погодные условия, то потери из-за отказа машины могут быть существенными.

2.3 РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ ВОССТАНОВЛЕНИЯ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ТОРФЯНЫХ МАШИН

К новому направлению повышения надежности с учетом эффективной эксплуатации ТМ относится:

1 - прогнозирование надежности с использованием информационных моделей построенных на основе гибридного интеллекта, максимально приближенных к технологическим объектам;

2 - управление работоспособностью на основе использования новейших технологий восстановления работоспособности обеспечивающих качественно новые параметры эксплуатации ТМ, с целью максимально эффективного использования ресурса торфяных машин в сезон добычи;

3 - создание автоматизированных систем управления надёжностью, устойчивых к субъективным ошибкам эксплуатации.

Информационные технологии при эксплуатации ТМ позволяют оперативно с учетом характера изменений технического состояния по каждой торфяной машине определить целесообразность дальнейшего использования при любой наработке с начала эксплуатации и стимулировать у персонала ответственное отношение к сохранению ресурса техники [65, 66, 172].

Система управления работоспособностью ТМ реализуется с помощью алгоритма (рис.2.5), который предусматривает создание баз данных [200], меняющихся в процессе наработки для каждой технологической машины по соответствующей диагностируемой подсистеме.

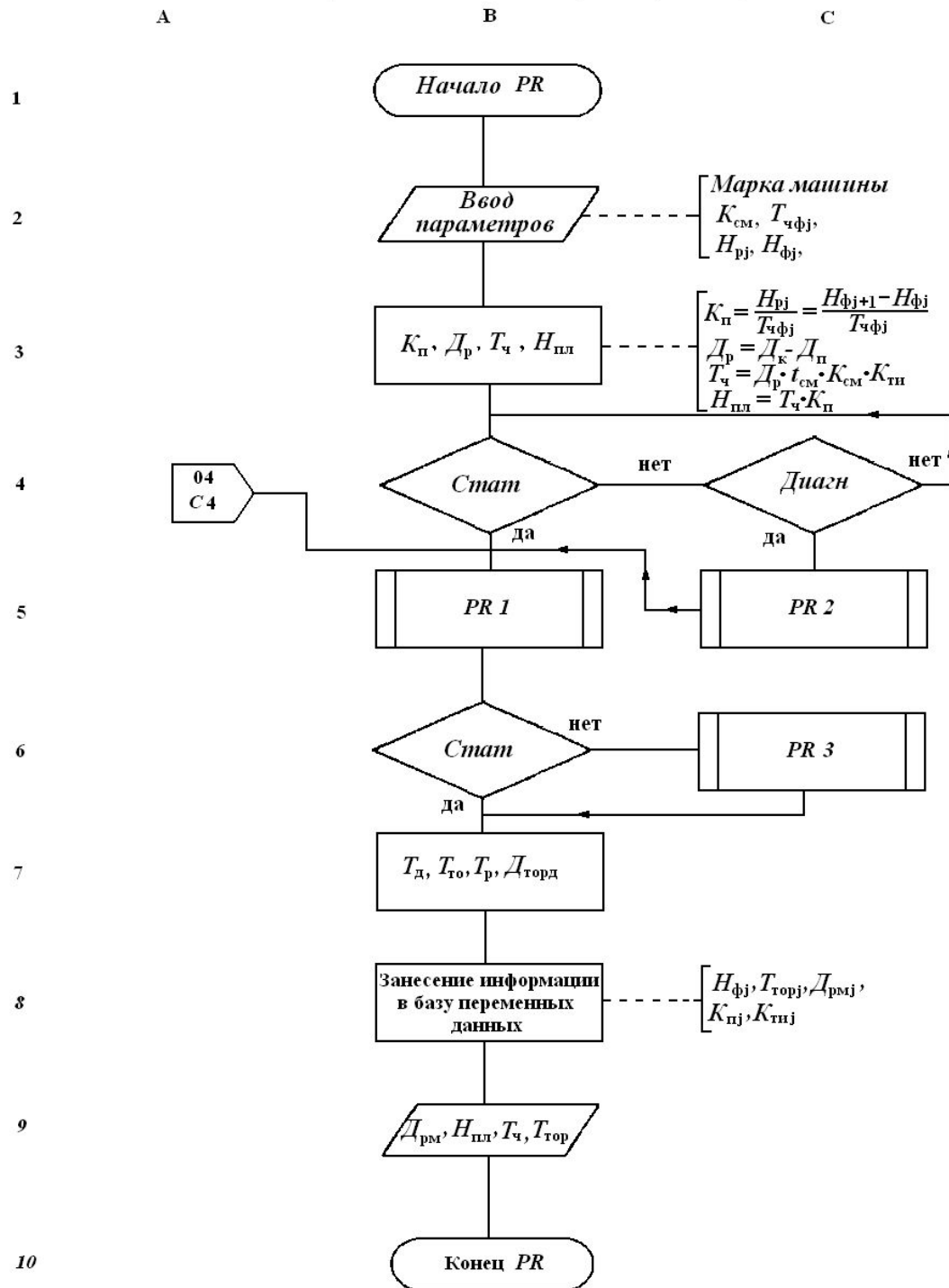


Рис. 2.5. Алгоритм поддержания работоспособности ТМ

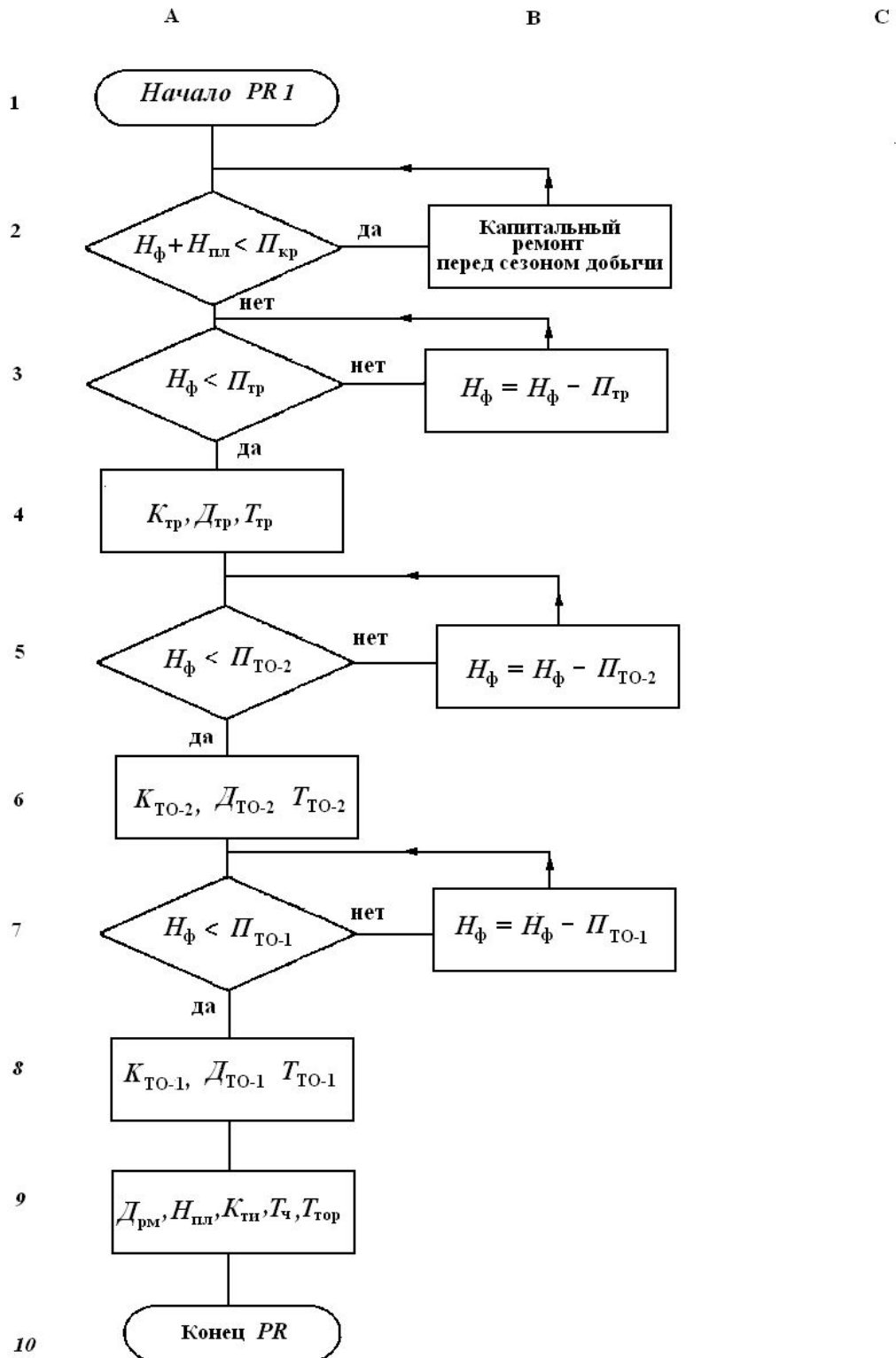
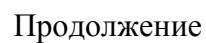


Рис. 2.45. Алгоритм поддержания работоспособности ТМ.

Продолжение



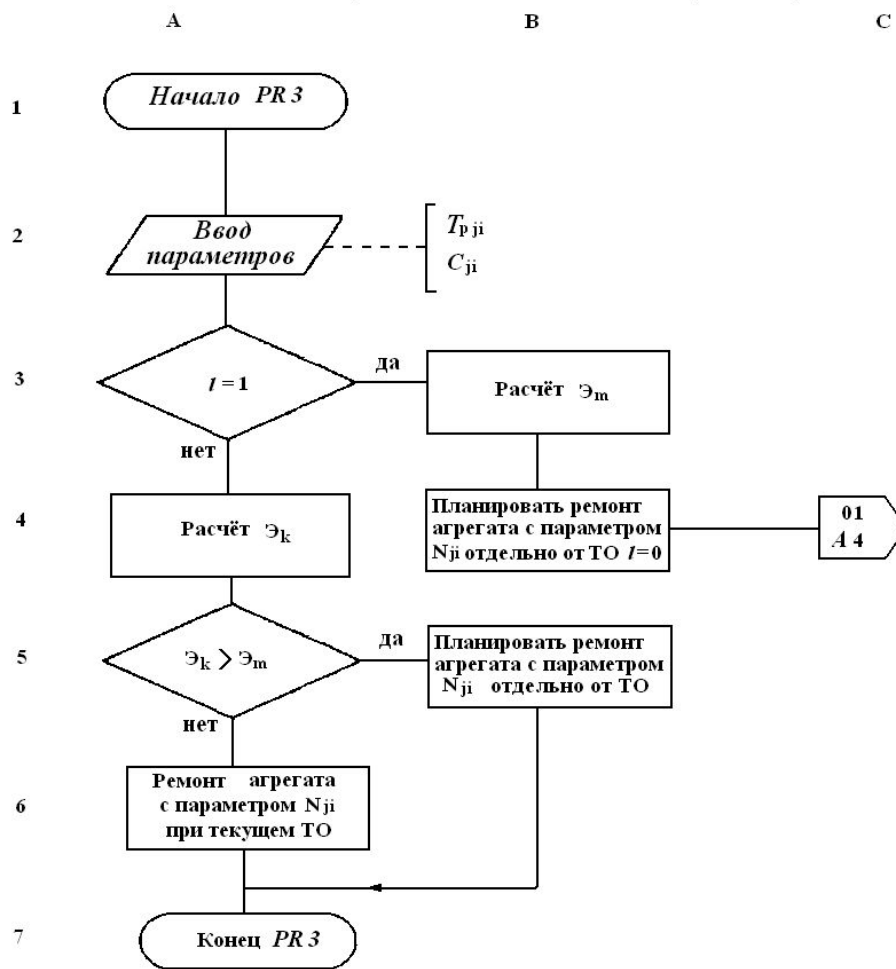


Рис. 2.5. Алгоритм поддержания работоспособности ТМ

Окончание. Примечания

$K_{тji}$ и $H_{рj}$ комплексный показатель надёжности – коэффициент технического использования и наработка фактическая за предшествующий сезон;

$K_{см}$ – коэффициент сменности машины;

$T_{чфj}$ – фактическое количество часов тоработанного времени за предыдущий сезон;

$K_{п}$ – коэффициент перехода позволяющий учитывать не количество часов рабочего времени торфяной машины, а наработку по счетчику моточасов;

$H_{фj}$ – наработка, установленная с начала эксплуатации i -й машины фактически;

$D_{р}$ – количество дней нахождения торфяной машины в ремонте и ТО;

$D_{к}$ – количество календарных дней в сезоне добычи;

$D_{п}$ – количество дней простоев за сезон добычи без учета простоев в ТО и Р;

$T_{ч}$ – количество рабочего времени торфяной машины, рассчитанное в часах на планируемый сезон;

$H_{пл}$ – плановая наработка торфяной машины на сезон добычи в моточасах;

$K_{тр}$, $K_{то-2}$, $K_{то-1}$ – расчетное количество ремонтов и обслуживаний на планируемый сезон добычи;

$D_{TP}, D_{TO-2}, D_{TO-1}$ – количество дней простоев в ремонтах и обслуживании в планируемом сезоне;

$T_{TP}, T_{TO-2}, T_{TO-1}$ – трудоемкость ремонтов и обслуживания в планируемом сезоне;

$P_{TP}, P_{TO-2}, P_{TO-1}$ – периодичность проведения ремонтов и обслуживаний;

D_{PM} – расчётное суммарное количество дней простоев в ремонтах и обслуживании в планируемом сезоне;

T_{TOP} – расчётная суммарная трудоемкость ремонтов и обслуживаний в планируемом сезоне;

D_{TOP} – расчётное суммарное количество дней ремонтов, обслуживаний и диагностики в планируемом сезоне;

N_{ji} – текущее значение i -го контролируемого параметра j -машины;

$t_{ост}$ – остаточный ресурс, соответствующий N_{ji} ;

$N_{допji}$ – допустимое значение i -го контролируемого параметра;

$H_{фj+1}$ – показания счетчика моточасов с начала эксплуатации на конец планируемого сезона (на начало следующего сезона);

T_d, T_{TO}, T_r – трудоемкость диагностики, обслуживания и ремонтов соответственно;

$D_{торд}$ – число дней простоев при выполнении операций ТО, ремонта и диагностики.

В информационную базу данных по каждой машине вносится:

- количество дней простоев D_p (выходные и праздничные дни, дни простоев по метеоусловиям, дни, затраченные на перебазирование машины в течение сезона добычи, дни простоев по организационным причинам);

- нормативные данные по ТО и ремонтам (периодичность, трудоемкость проведения каждого вида работ и дни простоев машины при выполнении работ по поддержанию и восстановлению её работоспособности);

- номинальные $N_{номji}$ и предельные $N_{допji}$ значения контролируемых параметров по каждому узлу и сборочной единице, а также агрегату в целом.

В базу текущих данных вносится информация об изменениях технического состояния в зависимости от наработки с начала эксплуатации: - фактическая наработка $H_{фj}$ за предшествующий период работы ТМ (по счетчику моточасов);

- суммарная трудоемкость $T_{\text{тор}j}$ при проведении ТО и ремонтов в период добычи торфа для j -той машины;
- необходимое количество дней простоев $D_{\text{рм}j}$ в ТО и ремонтах в рассматриваемый период для j -той машины.

Представленные данные хранятся в базе весь период эксплуатации машины, что позволяет делать анализ изменения контролируемых параметров N_{ji} в зависимости от наработки с начала эксплуатации и более точно прогнозировать работоспособность ТМ в планируемый сезон добычи.

При недостатке информации и отсутствии специальных диагностических средств выбирается **Статистический** способ, который основан на использовании вероятностных подходов определения периодичности и количества ТО и ремонтов.

В случае анализа эксплуатации с использованием **Диагностирования** по отдельным сборочным единицам и узлам определяется значение контролируемого параметра N_{ji} , остаточный ресурс $t_{\text{ост}}$ и вырабатываются рекомендации по времени и объему выполнения операций ТО и ремонта, а также устанавливается потребность обменного фонда для обеспечения агрегатного метода ремонта. Планировать диагностирование ТМ можно при любой наработке, но лучше совмещать с операциями по обслуживанию или использовать дни с неблагоприятными для добычи метеоусловиями, чтобы уменьшить время простоев. Либо использовать средства диагностики, не требующие остановки технологического процесса добычи, с анализом полученных результатов вне объекта диагностирования (виброакустическая диагностика [140, 141], анализ состояния систем по рабочим жидкостям, их химическому составу и наличию частиц износа, термодиагностика и др.). Основными параметрами при прогнозировании изменения состояния машины являются:

- значения $t_{\text{ост}}$ по всем сборочным единицам и системам;
- динамика изменения контролируемых параметров в зависимости от наработки и условий эксплуатации;
- данные о выполняемых работах по ТО и ремонту.

Для исключения отказов машины на месторождении в сезон добычи торфа, остаточный ресурс системы с N_{ji} диагностическим параметром должен превышать периодичность ТО.

Если остаточный ресурс, по какой-либо системе с контролируемым параметром N_{ji} , меньше периодичности ТО, то в большинстве случаев для ТМ выгоднее провести ремонт до наступления предельного состояния во время текущего обслуживания, так как в этом случае не потребуется дополнительно останавливать машину на ремонт. В том случае если ремонт выполняется до наступления предельного состояния, то часть ресурса системы не вырабатывается, что приводит к некоторым потерям. Для анализа потерь рассчитывается эффективность эксплуатации машины в случае ремонта во время текущего ТО $\mathcal{E}_{\text{то}}$ и сравнивается с эффективностью $\mathcal{E}_{\text{тр}}$ при проведении ремонта отдельно от ТО. По результатам сравнения принимается тот или иной вариант проведения работ. Выбор конкретного варианта обслуживания зависит от большого количества факторов (стоимости, трудоёмкости, статистики используемых решений, условий проведения работ, наличия материалов, комплектующих и другого), поэтому блок выбора (А9, *PR-2*) показанный в алгоритме (см. рис.2.6) представляет собой модель конкретной технологической машины с помощью которой, можно анализировать текущее техническое состояние систем ТМ.

2.4 РАЗРАБОТКА СТРУКТУРНОЙ МОДЕЛИ НАДЁЖНОСТИ ТОРФЯНОЙ МАШИНЫ

При использовании CALS-технологии в сфере управления надёжностью технологических машин необходимо представить состояние основных элементов и процессов в одном информационном пространстве [1, 48, 82, 89, 135, 142-148, 194]. Это пространство формируется в процессе проектирования, производства, эксплуатации, технического обслуживания, ремонта и утилизации изделия, и преобразуется на различных этапах жизненного цикла технологической машины. Проблемы, возникающие на различных этапах функциони-

рования, в значительной мере трудно формализуемы, поэтому возможности традиционных математических методов решения сильно ограничены. При недостаточной формализации некоторых задач информационного пространства на основе типовых решений разрабатываются специализированные экспертные системы [40] и унифицированные языковые средства представления. Но даже при использовании таких средств, проблема математического моделирования сложных систем остается весьма актуальной.

При структурном моделировании технических систем часто используется математический аппарат теории множеств и теории графов [17, 88, 134, 210]. Но при этом, традиционный аппарат теории множеств и графов не имеющий развитых средств описания разнообразных свойств объектов может существенно затруднять практическое применение данного аппарата при моделировании состояния технологических машин.

В теории множеств свойства элементов не учитываются, поэтому элементы отличаются только по именам (обозначению), в этом случае при независимом присвоении имен может случиться, что разным объектам присвоены одинаковые имена, тогда они – как элементы множества будут неразличимы. В тоже время, если одному и тому же объекту будут присвоены разные имена, то наличие разноименных элементов будет восприниматься как существование разных объектов.

Состав объектов, образующих объем понятия A , можно представить как множество A элементов $a_k \in A$, а состав свойств, образующих содержание этого понятия, как множество

$$F(A) = (F_1, \dots, F_\varphi \dots F_p).$$

В процессе решения прикладных задач важны не только отличительные признаки, но и функциональные свойства моделируемой технологической машины, поэтому состав рассматриваемых свойств объекта часто оказывается шире состава свойств, входящих в содержание соответствующего понятия.

Элемент a_k входящий в состав понятия A обладает объёмом свойств $F(a_k)$, этот объём свойств a_k структурируется в соответствии с вхождением элемента

в то или иное множество. Вместе с тем $a_k \in A$ обладает и другими свойствами, отличающими этот объект от любого другого объекта в объеме A .

Для обеспечения возможности автоматизации процессов принятия решений, рассуждения представляют в виде цепочки умозаключений в логически последовательной форме. Для этих целей используется аппарат булевой алгебры, который является наиболее распространенным средством формализации рассуждений [17, 103, 119, 146].

Булево векторное пространство F является упорядоченным множеством логических переменных F_φ , $J = 1, 2, \dots, n$. Истинностные значения компоненты F_φ в булевом векторе $F(a_i)$, $F(a)$ или $F(A)$ зависят от того, входит или не входит свойство F_φ в состав данного множества свойств. Это позволяет описывать свойства всех предметов, входящих в объем понятия A , булевой матрицей

$$\|c_{i(\varphi)}\| = [A \times F(a)], \quad (2.7)$$

в которой элемент $c_{i(\varphi)}$, имеет значение 1 или $\emptyset$ – в зависимости от того, обладает или не обладает предмет a_i , свойством F_φ . В результате i -я строка булевой матрицы определяет истинностные значения компонент булева вектора $F(a_i)$, описывающего свойства $a_i \in A$. Состав $F(a)$ вычисляется, как объединение свойств $F(a_i)$ всех предметов $a_i \in A$.

Логические операции над булевыми векторами выполняются покомпонентно. Например, вычисление логической суммы (дизъюнкции) и логического произведения (конъюнкции) булевых векторов [16].

Содержание понятия A определено, если определен состав $F(A)$ существенных свойств предметов $a_k \in A$.

Формально множество D (торфяные машины) полностью определено составами своих элементов. И хотя любая деталь узла машины обладает разнообразными геометрическими, физическими и другими свойствами, а все торфяные машины имеют разные эксплуатационные свойства, все эти свойства

могут быть сведены к ограниченному кругу, основанному на единстве оценки технического состояния в множестве D . При необходимости описания свойств объектов с точки зрения надёжности торфяных машин выявлены наиболее значимые и установлены их связи с работоспособностью, для этого использовались средства реляционной алгебры, применяемые в реляционных СУБД [79, 195]. Примером такого описания является таблица свойств торфяных машин с точки зрения надёжности.

Задача управления эксплуатацией торфяной машины была решена на примере комплексного агрегата. Для формализации параметров технического состояния любой торфяной машины необходимо разложить её как технологическую систему на подсистемы, элементы подсистем таким образом, чтобы на самом нижнем уровне получить объекты с определённым количеством свойств, по которым можно оценивать их состояние с точки зрения надёжности.

Практически любую технологическую машину можно представить как систему, состоящую из ряда подсистем: A – несущей подсистемы, B – энергетической, G – передающей и преобразующей энергию, D – конечных технологических элементов, а также E – элементов управления.

В свою очередь каждая из этих подсистем состоит из элементов, обладающих как общими свойствами, характерными для этой подсистемы, так и какими-то собственными параметрами. В случае рассмотрения технологической системы с точки зрения надёжности такими свойствами являются: периодичность технического обслуживания, наработка с начала эксплуатации, наработка с последнего ТО, остаточный ресурс, трудоёмкость выполнения работ, по которым можно оценивать техническое состояние машины и с достаточной высокой точностью прогнозировать его изменение [67, 70].

Путём анализа структуры комплексного агрегата, прототипом которого стал пневмоуборочный комбайн БПФ-3М (рис. 2.6), были выявлены основные объекты, влияющие на его надёжность [124]. Все они представлены в виде матриц $M_1, M_2, \dots, M_n$ (матрица – это отношение реляционной базы данных).

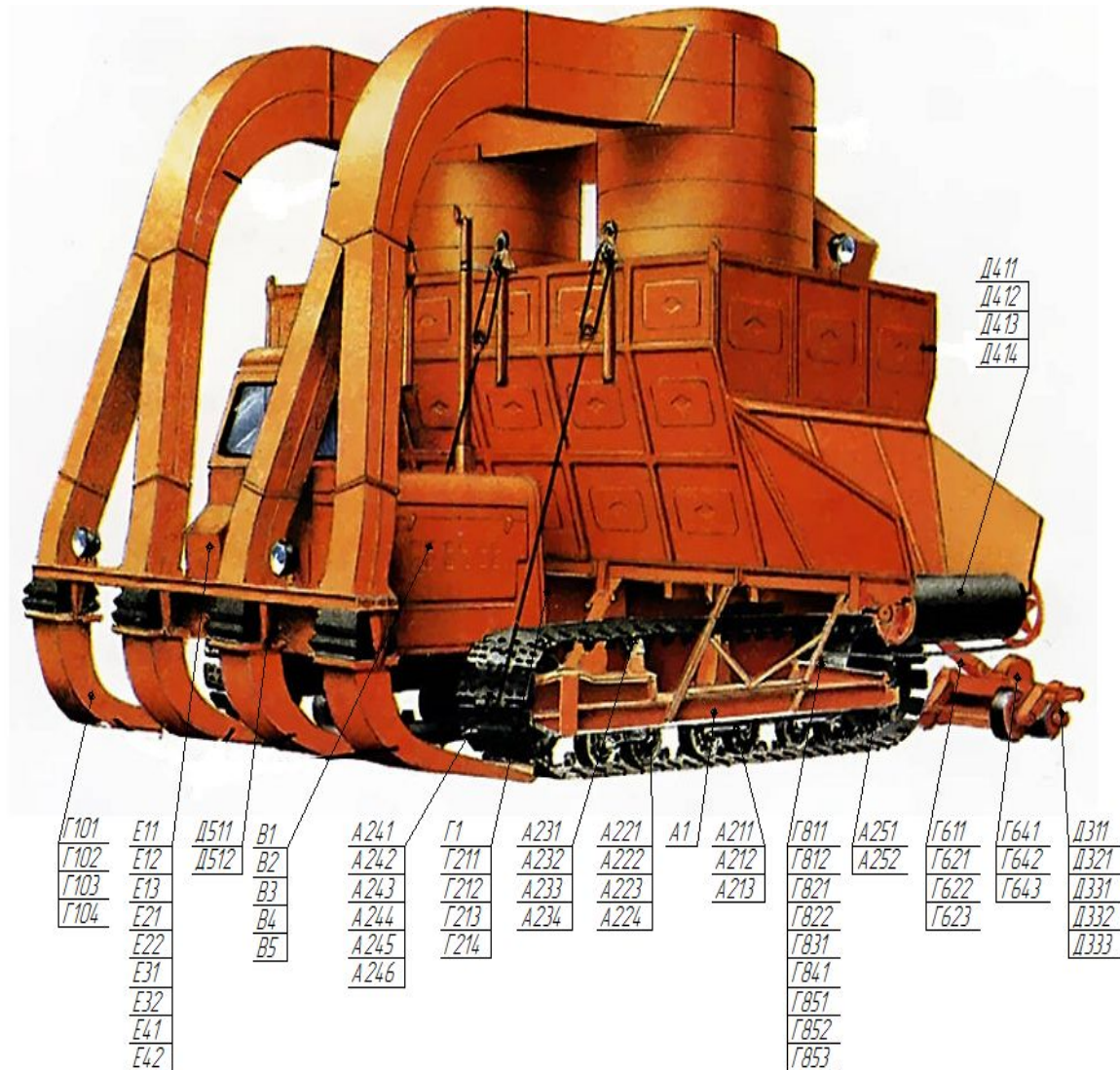


Рис. 2.6. Структурные элементы прототипа комплексного агрегата

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, поток отказов, триботехнические характеристики и др.) определяют условия эксплуатации.

По данным многолетних наблюдений среднестатистические затраты времени на восстановление работоспособности трибоэлементов значительны (до 20% производственного времени), 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.

Свойства комплексного агрегата описываются в таблице 2.6 на четырёх уровнях (номер уровня соответствует числу символов в обозначении элемента):

1-й уровень – подсистема первого уровня, выполняющая определённую функцию (несущая подсистема);

2-й уровень – подсистема второго уровня (гусеничный ход);

3-й уровень – подсистема третьего уровня (опорная каретка);

4-й уровень – элемент (сопряжение втулки опорной каретки и оси).

Таблица 2.6

Свойства структурных элементов несущей подсистемы с точки зрения надёжности

Подсистема	Элемент подсистемы	Сопряжения	Обозначение элемента	Периодичность ТО-1, 60 мото.час	Периодичность ТО-2, 240 мото.час	Периодичность ТО-3, 960 мото.час	Периодичность ТР, 1920 мото.час	Периодичность КР, 3840 мото.час	Общий ресурс, мото.час	Трудоемкость ТО, чел/час	Трудоемкость ремонта, чел/час
Несущая	A		A								
Рама главная	A1		A11	0	0	0	0	1	8000		0,5
Гусеничный ход	A2		A2						3840		
	Опорная каретка	A21	A21						3840		
		Корпус каретки и втулка	A211	0	0	0	1	1	1920		0,5
		Втулка и опорная ось	A212	1	1	1	1	1	1920	0,25	0,5
		Корпус каретки и ось колеса	A213	0	1	1	1	1	3840	0,15	0,25
	Колесо опорное	A22	A22						3840		
		Колесо опорное и подшипник	A221	0	0	0	1	1	3840		0,5
		Подшипник и ось опорного колеса	A222	0	0	0	1	1	3840		0,5
		Подшипник качения опорного колеса	A223	0	1	1	1	1	1920	0,15	0,5
		Уплотнение подшипника опорного колеса	A224	0	0	0	1	1	1920		0,5
	Колесо поддерживаю	A23	A23						3840		
		Поддерживающее колесо и подшипник	A231	0	0	0	1	1	3840		0,5
		Подшипник и ось поддерживающего колеса	A232	0	0	0	1	1	3840		0,5
		Подшипник поддерживающего колеса	A233	0	1	1	1	1	1920	0,15	0,5
		Уплотнение подшипника поддерж. колеса	A234	0	0	0	1	1	1920		0,5
	Колесо натяжное	A24	A24						3840		
		Колесо натяжное и подшипник	A241	0	0	0	1	1	3840		0,5
		Подшипник и ось натяжного колеса	A242	0	0	0	1	1	3840		0,5
		Ось натяжного колеса и натяжителя	A243	0	0	0	1	1	1920		0,5
		Натяжитель и рама	A244	0	1	1	1	1	1920	0,15	0,5
		Подшипник натяжного колеса	A245	0	1	1	1	1	1920	0,15	0,5
		Уплотнение подшипника натяжного колеса	A246	0	0	0	1	1	1920		0,5
	Звёздочка ведущая	A25	A25						1920		
		Звёздочка ведущая и ступица	A251	0	0	0	1	1	1920		0,5
		Звёздочка ведущая и гусеница	A252	0	0	0	1	1	1920		0,5

В соответствии с обозначением каждый объект имеет i – номер объекта в матрице (номер строки), и φ – контур (контур это экспликация таких понятий, как свойство, параметр и др.).

Каждая строка матрицы, описывающей свойства сопряжений, представляет собой булев вектор, логические операции с которыми обеспечивают возможность автоматизации процессов принятия решения на основе алгебры логики. Такая модель позволяет в любой момент времени точно определять текущее состояние технологического объекта и в зависимости от него планировать восстановление работоспособности с расчетом трудоёмкости операций в каждом конкретном случае.

Вектор контуров F матрицы M включает в себя четыре вектора (F_1, F_2, F_3, F_4),

$$F_1 = (f_1, f_2, \dots, f_{14}),$$

$$F_2 = (f_{16}, f_{17}, \dots, f_{20}),$$

$$F_3 = (f_{21}, f_{22}, f_{23}),$$

$$F_4 = (f_{24}, f_{25}).$$

F_1 представляет собой вектор контуров, описывающих свойства сопряжений с точки зрения триботехники, где

f_1 – сопряжение подвижное,

f_2 – сопряжение скольжения,

f_3 – сопряжение качения,

f_4 – сопряжение антифрикционное,

f_5 – сопряжение фрикционное,

f_6 – сопряжение неподвижное,

f_7 – сопряжение с зазором,

f_8 – сопряжение с натягом,

f_9 – сопряжение регулируемое,

f_{10} – сопряжение нерегулируемое,

f_{11} – сопряжение закрытое,

f_{12} – сопряжение открытое,

f_{13} сопряжение без смазки,

f_{14} – сопряжение с консистентной смазкой,

f_{15} сопряжение с жидкой смазкой.

Здесь $M_1(i, \varphi) = 1$, если φ - тый контур принадлежит i -тому объекту, $\emptyset$ – в противном случае; $\varphi = 1, \dots, p, i = 1, \dots, 430$.

Все представленные свойства позволяют анализировать сопряжения с точки зрения параметров трения, объединять сопряжения в группы и осуществлять на них комплексное воздействие с целью изменения периода обслуживания и ремонта для оптимизации эксплуатационных характеристик и повышения эффективности использования торфяных машин в сезон добычи.

F_2 представляет собой вектор контуров, описывающих свойства сопряжений с точки зрения периодичности обслуживания и ремонтов, где

f_{16} – периодичность ТО-1, f_{17} – периодичность ТО-2, f_{18} – периодичность ТО-3, f_{19} – периодичность текущего ремонта, f_{20} – периодичность капитального ремонта.

Здесь $M_2(i, j) = 1$, если i -тый объект имеет j -тую периодичность обслуживания, $\emptyset$ – в противном случае, если для данного объекта контур не определяется; $\varphi = 1, \dots, p, i = 1, \dots, 430$.

F_3 представляет собой вектор контуров, определяющих наработку элементов систем с начала эксплуатации и с последнего ТО, где

f_{21} – наработка с начала эксплуатации или после замены (моточасах),

f_{22} – наработка с последнего ТО (моточасах),

f_{23} – общий ресурс элемента системы (моточасах).

Здесь $M_3(i, \varphi) = N$, где $N_{i,\varphi}$ – числовое значение φ -той наработки i -того элемента системы в моточасах.

F_4 представляет собой вектор контуров, устанавливающих трудоёмкость выполнения операций обслуживания и ремонта элементов систем, где

f_{24} – трудоёмкость обслуживания i -того элемента,

f_{25} – трудоёмкость ремонта i -того элемента системы,

f_{26} – количество элементов i -того типа.

Здесь $M_4(i, \varphi) = P$, где $P_{i,\varphi}$ – числовое значение соответствующей трудоёмкости выполнения работ для i -того элемента.

Отказы первой группы устраняются оператором машины за 2 часа. Отказы второй группы сложности устраняются ремонтной бригадой без эвакуации машины с месторождения за 8 часов (с учётом ожидания ремонта). Отказы третьей группы сложности для устранения требуют эвакуации машины с месторождения, время восстановления до 20 часов (с учётом ожидания ремонта).

На основе анализа структуры комплексного агрегата была разработана модель M технического состояния машины, которая позволяет определить её работоспособность в любой момент времени

$$M = \begin{cases} y^1(t) = \gamma_1(t, u_{11}(t), u_{12}(t), \dots, u_{1p}(t)) \\ y^2(t) = \gamma_2(t, u_{21}(t), u_{22}(t), \dots, u_{2p}(t)) \\ \dots \\ y^i(t) = \gamma_i(t, u_{i1}(t), u_{i2}(t), \dots, u_{ip}(t)) \end{cases},$$

где: y – значение характеристики состояния i -того элемента (1 – исправен, 0 – неисправен); γ – функция изменения состояния i -того элемента; t – наработка машины с предыдущего состояния; $u_{i\varphi}$ – элемент структурной модели описывающий свойства сопряжений с точки зрения надёжности (может принимать значения 1 , 0 или натурального числа – значения описывающего свойство элемента).

Структурная модель технического состояния комплексного агрегата представляет собой несколько матриц M_i , состоящих из элементов $u_{i\varphi}$, связанных между собой логическими функциями. Номера логических связей показанных на рисунке 2.7 отображают последовательность выполнения логических операций и адреса связанных блоков системы анализа технического состояния машины.

На основе проведённых исследований надёжности торфяных машин, был сформулирован ряд 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.

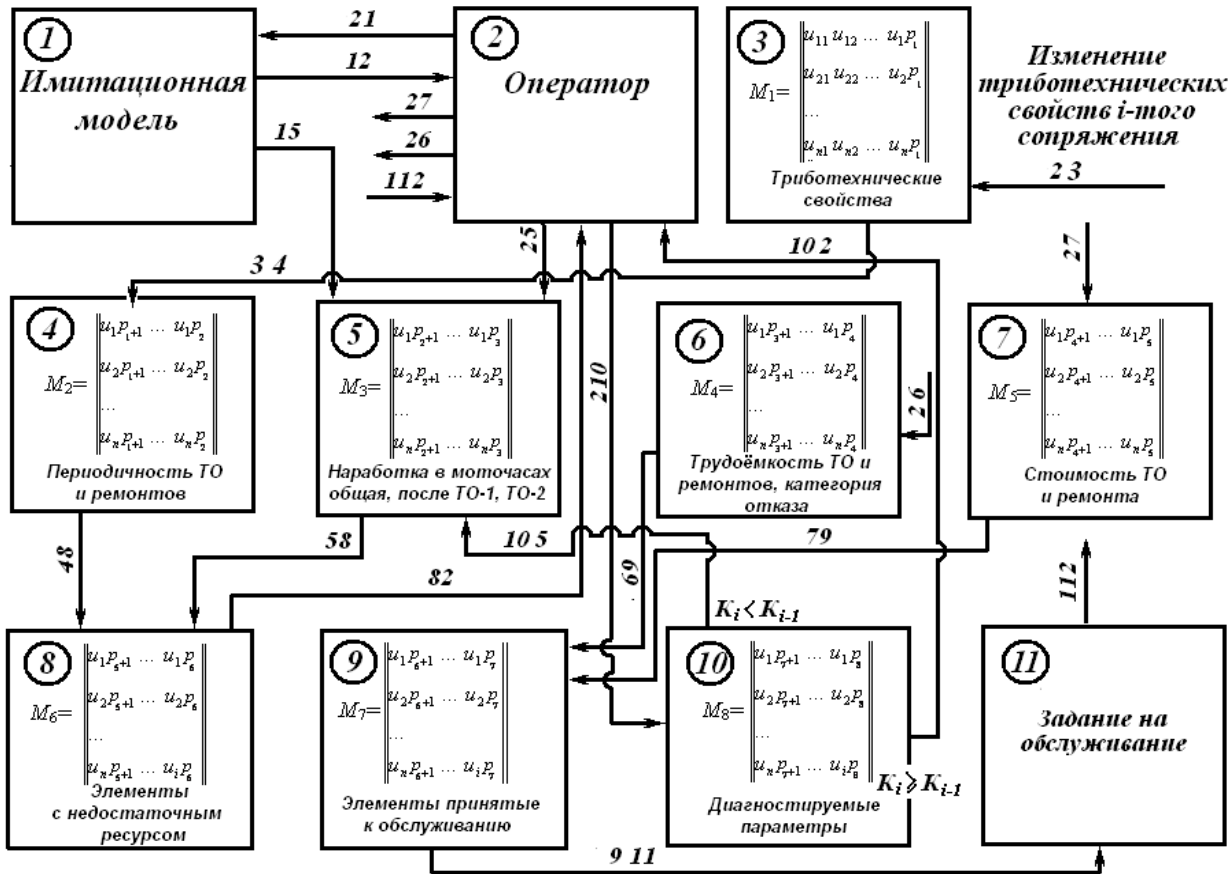


Рис. 2.7. Логические связи между блоками структурной модели технического состояния ТМ

При запуске системы анализа технического состояния машины оператор вводит текущую наработку H_{fk} машины в моточасах. Если функция изменения технического состояния γ_i неизвестна, то предполагается, что она может быть заменена линейной функцией и предельное состояние наступит при установленной для данного узла среднестатистической наработке до отказа с вероятностью 0,9. В этом случае система запоминает текущее значение, рассчитывает приращение наработки ΔH_{fk} с предыдущего момента сохранения и опреде-

ляет остаточный ресурс до следующего ТО $t_{ocm.i\ k\ TO}$ и текущего ремонта $t_{ocm.i\ k\ P}$ i -того структурного элемента

$$t_{ocm.i\ k\ TO} = t_{ocm.i\ k-1\ TO} - \Delta H_{\phi k}, \quad (2.8)$$

$$t_{ocm.i\ k\ P} = t_{ocm.i\ k-1\ P} - \Delta H_{\phi k}. \quad (2.9)$$

Используя методику, не учитывающую реального состояния объекта, в процессе эксплуатации могут возникать трудно прогнозируемые отказы, которые приводят к существенным потерям объёмов добычи торфа.

В системе анализа технического состояния торфяной технологической машины предусмотрен вариант определения остаточного ресурса по диагностируемым параметрам. При каждом диагностировании рассчитывается α – значение степени функции γ_i изменения состояния диагностируемого элемента

$$\alpha_i = \frac{\ln(\Delta X_{ik+1} / \Delta X_{ik})}{\ln(t_{ik+1} / t_{ik})}, \quad (2.10)$$

рассчитывается остаточный ресурс i -того элемента

$$t_{ост} = \frac{\Delta t (X_{ikPP}^{1/\alpha} - \Delta X_{ik}^{1/\alpha})}{\Delta X_{ik}^{1/\alpha} - \Delta X_{ik-1}^{1/\alpha}}, \quad (2.11)$$

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

Устанавливается коэффициент K_{ik} , определяющий динамику изменения параметра

$$K_{ik} = \alpha_{ik} / \alpha_{ik-1}. \quad (2.12)$$

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

После выбора окончательного варианта проведения работ на основе анализа структурной модели машины по системе, контролируемой N_{ji} параметром, проводится цикл анализа по системе с N_{ji+1} контролируемым параметром. Анализ продолжается до момента пока будут проверены все N_{ji} параметры ($i = i_{\max}$).

По результатам анализа эксплуатации определяется необходимое количество и содержание ТО и ремонтов в наиболее оптимальном сочетании [92].

Программа анализа технического состояния реализована в среде Microsoft Visual Studio 2010 с использованием NETFramework 4 на языке C# [77, 149, 206]. В основе данной программы лежат классы. Основа программы - класс Microsoft.Windows.Forms и его дочерние.

Главным функциональным классом является Element. Он представляет собой описание одного из элементов технологической машины. Данное описание включает в себя название, код элемента, его уровень в системе, ссылку на «родительский» элемент, стоимость и переменную, определяющую является ли этот элемент конечным.

Класс Element, в свою очередь, для удобства содержит два дочерних класса: класс Set, содержащий в себе описание типа сопряжения в виде логических переменных и класс Serv.

Класс Serv содержит информацию, относящуюся к обслуживанию элемента: суммарное время наработки, наработку с предыдущего ТО, оставшееся время наработки до ТО, трудоёмкость ТО и ремонта, ресурс, логические переменные, определяющие периодичность обслуживания и является ли элемент диагностируемым, ряд диагностических параметров. Пример структуры изображён на рисунке 2.8.

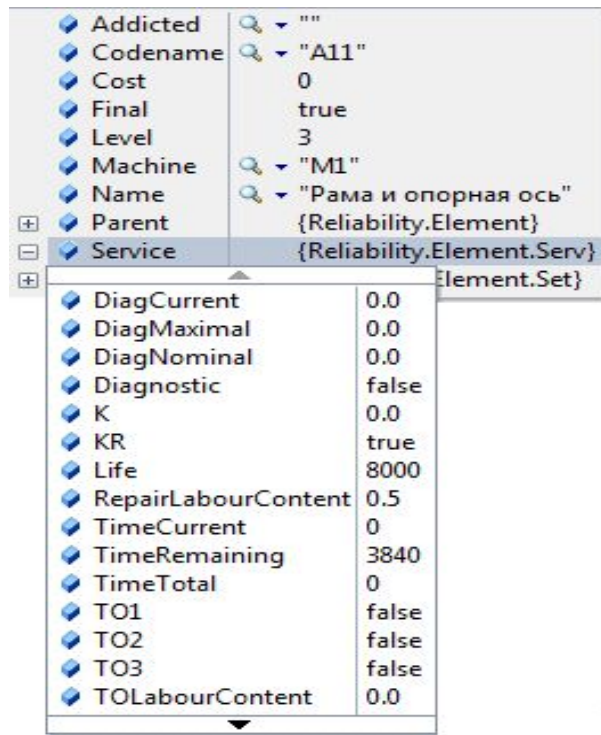


Рисунок 2.8. Структура класса Element

Основной формой является форма main. На ней размещены все основные элементы программы, в том числе переключатель вкладок (Microsoft.Windows.Forms.TabControl), имеющий три вкладки: «расчёт обслуживания», «редактирование структуры» и «прогнозирование обслуживания» (рис. 2.9). Также в этой форме есть элементы меню «файл» с кнопками «сохранить», «загрузить» и «выход» и «о программе» с кнопкой «справка».

При первом запуске программы на вкладке «Редактирование структуры» можно создать модель новой машины и задать все её элементы и их параметры вручную. Для этого нужно сначала ввести название машины и время её наработки. Затем, чтобы добавить элемент, необходимо «кликнуть» правой кнопкой мыши на машине (или далее на любом другом элементе, не являющемся конечным) в дереве объектов и выбрать пункт «добавить». После этого откроется форма ввода данных и потребуется указать название элемента, общую наработку, наработку с предыдущего ТО и является ли он конечным.

Ввод данных пользователем осуществляется через форму inputbox, изображённую на рисунке 2.10. В общем случае она содержит текст запроса, поле для ввода данных и кнопки «ОК» и «Отмена».

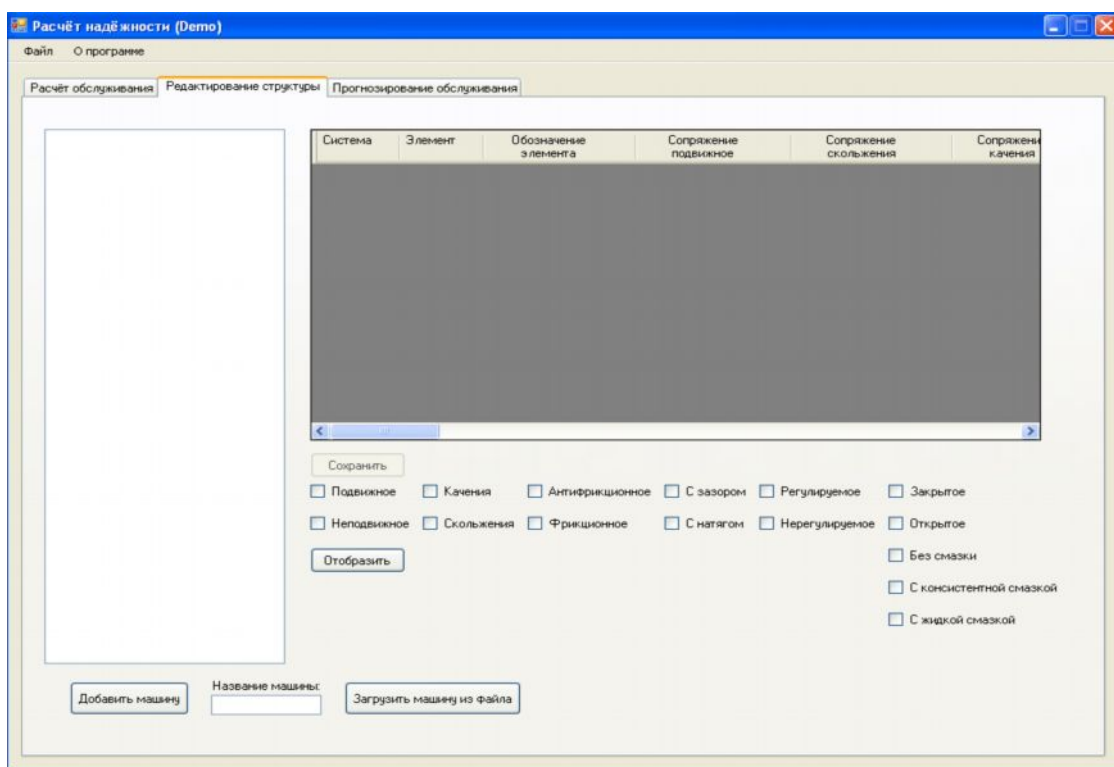


Рисунок 2.9. Внешний вид основного окна программы, вкладка «Редактирование структуры»

При нажатии кнопки «ОК» введённое значение передаётся функции, вызвавшей данное диалоговое окно. Также внешний вид формы может изменяться в зависимости от её назначения (например, может дополнительно содержать кнопку, открывающую окно настройки погоды).

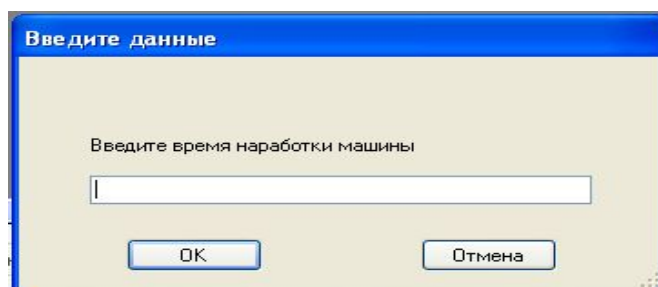


Рисунок 2.10. Форма inputbox

При нажатии правой клавишей мыши на любом элементе, его можно переименовать. Для конечных элементов доступны ещё две кнопки: кнопка «Обслужить», сбрасывающая счётчик с предыдущего ТО на 0, и

«Диагностические параметры», открывающее окно настройки данных параметров, вводимых для более точного анализа состояния элемента. Данное окно представляет собой форму diagnostic (рисунок 2.11).

Рисунок 2.11. Окно ввода диагностических параметров

Форма состоит из четырёх полей, в которые вводятся диагностические параметры, поля с галочкой, определяющего является ли данный элемент диагностируемым и кнопок «Сохранить и выйти» и «Выйти без сохранения». При нажатии на первую, введённые данные присваиваются данному элементу.

Существующую модель машины также можно загрузить из файла Microsoft Excel, она должна быть составлена таким образом, чтобы программа могла её правильно распознать.

Для загрузки модели из Excel и работы с файлом, содержащим модель, используется библиотека Microsoft.Office.Interop.Excel и требуется, чтобы на компьютере был установлен Microsoft Office не ниже версии 2007. При загрузке существующей модели всё, что требуется от пользователя – задать название машины, далее программа сама создаст все элементы и отобразит их в «дереве элементов» (класс Microsoft.Windows.Forms.TreeView).

Все элементы модели хранятся в массиве. После загрузки модели её можно сохранить в формате программы (.mch). Это позволит во много раз ускорить последующую загрузку модели и уйти от необходимости использования Excel.

После того, как модель загружена, в дереве элементов можно выделить любую систему, подсистему и элемент, все конечные элементы, принадлежащие ему, отобразятся в таблице справа (Microsoft.Windows.Forms.-DataGridView). В этой таблице отображается удобное представление свойств элемента. Они могут быть изменены по желанию пользователя, для сохранения изменений необходимо нажать кнопку ниже таблицы. Также под таблицей имеются фильтры, которые можно использовать для поиска элементов с определёнными свойствами.

Вкладка «Расчёт обслуживания» состоит из двух кнопок и двух таблиц. При нажатии кнопки «Рассчитать», выводятся элементы, для которых приближается срок осуществления ТО. Список элементов и данные о них появляются в таблице справа. Также в строке с каждым элементом есть 3 кнопки, позволяющие оператору принять решение, когда можно обслуживать данный элемент: сейчас, позже или со следующим ТО (если при этом время до обслуживания не будет превышено более чем на 10%). Далее, при нажатии кнопки «обслуживаемые элементы» в таблицу справа от неё выводится список элементов, требующих обслуживания, а ниже указывается номер ТО.

На последней вкладке «Прогнозирование обслуживания» (рис. 2.12) реализована основная задача программы: составление расписания обслуживания в зависимости от разных критериев и факторов, влияющих на вероятность отказа. Здесь реализована агрегативная модель машины.

В текстовом поле отображается текущая наработка машины. Её можно изменить и нажать кнопку «Задать наработку». Если есть элементы, для которых время наработки до ближайшего ТО превышено, они отобразятся в таблице сверху. Чтобы составить задание на обслуживание машины, необходимо сначала задать погоду на ближайшие дни. Для этого требуется нажать на кнопку «Задать погоду». Появится форма `inputbox`, в которую потребуется ввести среднее количество благоприятных дней в ближайшем месяце.

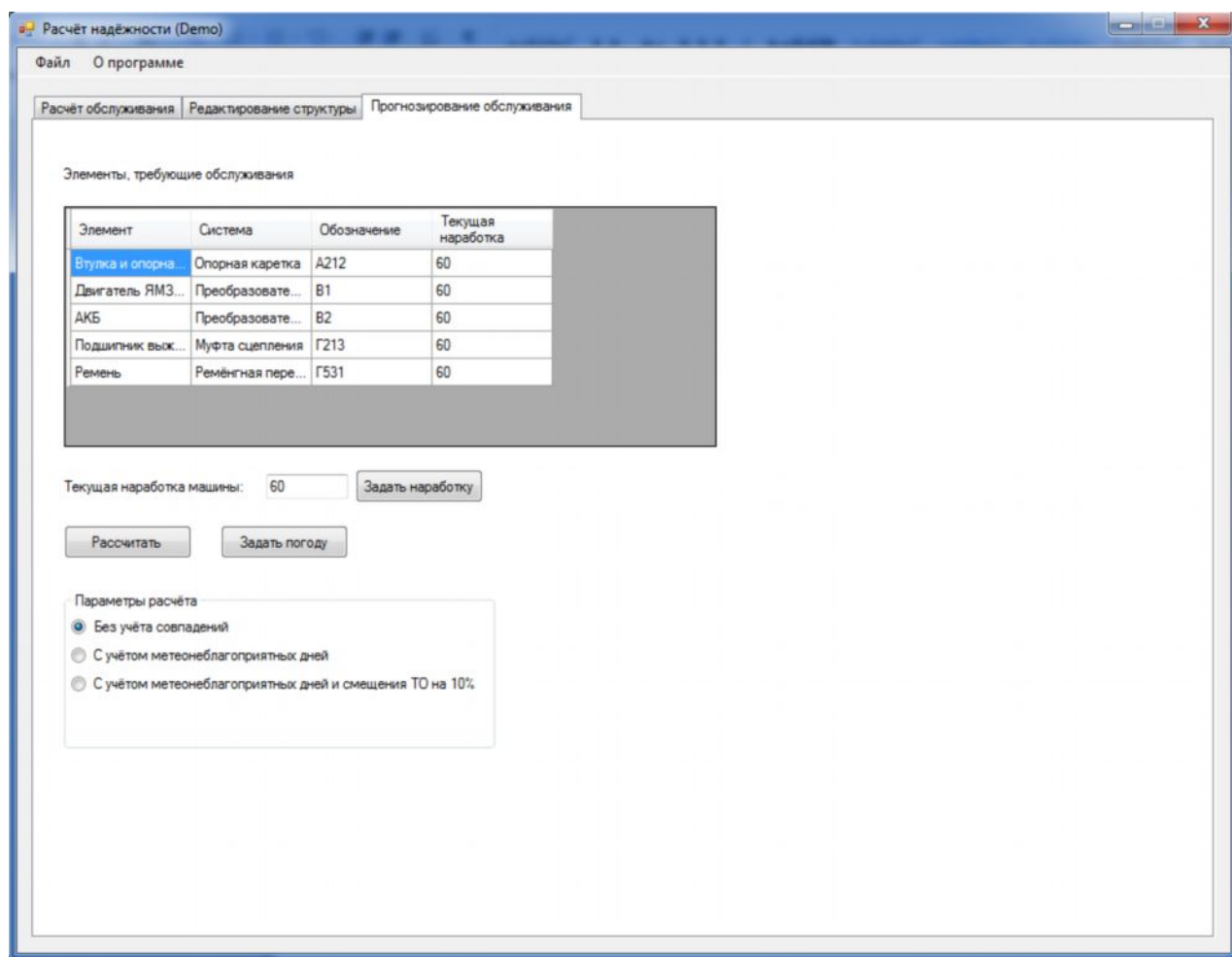


Рисунок 2.12. Раздел «Прогнозирование обслуживания»

На основании этих данных будут случайно сгенерированы метеоусловия на ближайший период работы. Нажав кнопку «Погода» можно указать погоду на ближайшие 10 дней более точно. По нажатию этой кнопки откроется форма weather (рисунок 2.13), на которой расположены поля с отметками. Если «галочка» не установлена – погода в этот день неблагоприятная, иначе – благоприятная. Данная информация о погоде заменяет сгенерированную на первые 10 дней и затем все данные записываются в массив. После того, как погода задана, необходимо выбрать критерий, по которому будет составляться график ТО, переключением указателя в разделе «Параметры расчёта». По нажатию кнопки «Расчёт», создаётся полная копия всей машины.

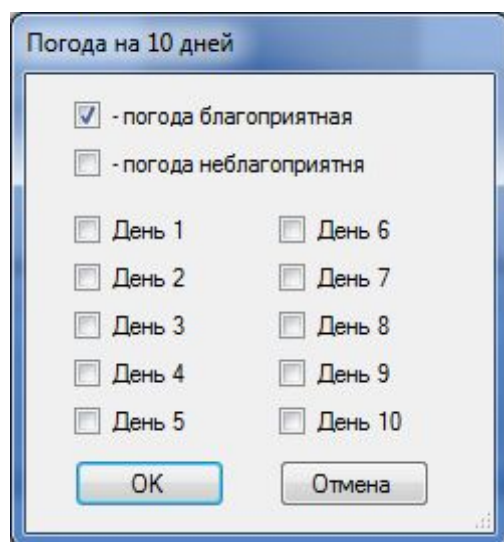


Рисунок 2.13. Форма weather

В дальнейшем изменяются только её параметры, и она представляет собой модель данного объекта. При моделировании, наработка машины и всех её элементов увеличивается с шагом в один час. На каждом шаге генерируется вероятность выхода из строя каждого элемента и он «отказывает», либо остаётся в рабочем состоянии. По истечении 10 часов, машина переходит к следующему дню из расчёта (10 часов – норма времени работы в день). Если погода в этот день неблагоприятная, то работа не ведётся. При режиме, учитывающем совмещение обслуживания с плохими метеоусловиями, может проводиться ТО, если есть элементы, которым оно вскоре потребуется. Далее, программа переходит к ближайшему метеоблагоприятному дню. Если в ходе работы модели оставшаяся до следующего ТО наработка элемента достигает предельного значения или один из элементов выходит из строя, то создаётся запись об обслуживании. Для хранения информации о ТО, используется класс «ТО». Его структура изображена на рисунке 2.14. Он включает в себя массив из объектов, класса Element, обслуживаемых на данном этапе, день, трудоёмкость, номер, оставшееся время наработки до этого ТО, общее время наработки машины к моменту проведения ТО, причину проведения (плохая погода, отказ).

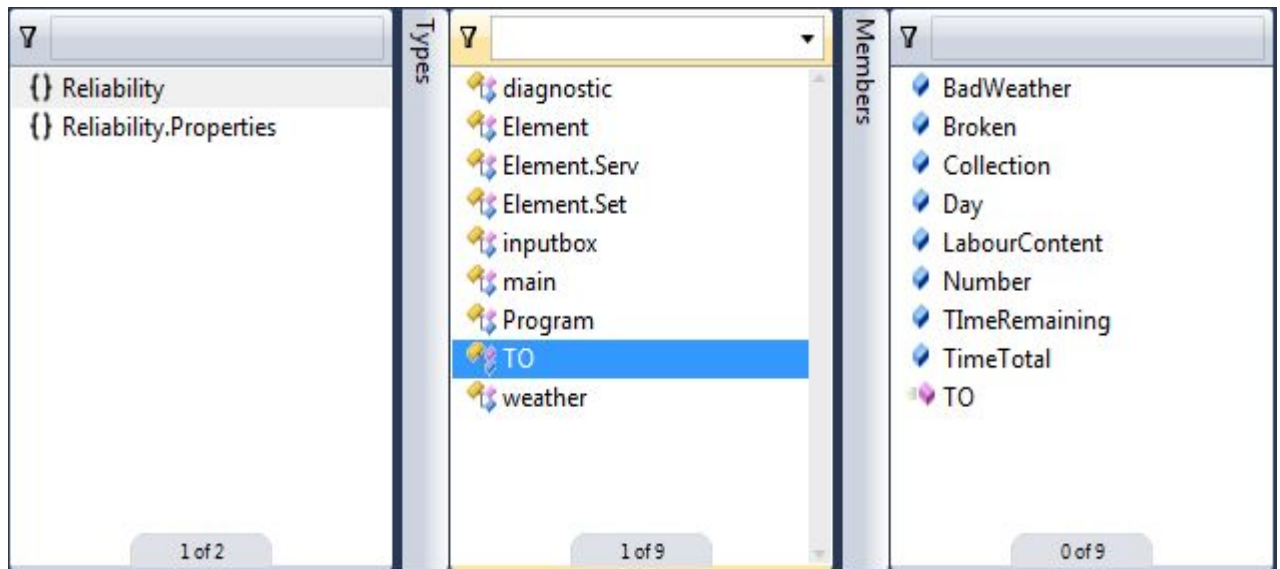


Рисунок 2.14. Структура класса ТО

Эти объекты, как и элементы системы, образуют массив. После создания записи о ТО, время работы с предыдущего обслуживания для принадлежащих ему элементов модели обнуляется и модель продолжает свою работу. Когда количество дней превышает расчётный период, вызывается метод ShowTOList, который отображает весь массив с записями об обслуживании в виде документа MicrosoftExcel (рисунок 2.15). В нём содержится вся информация, хранящаяся в классе «ТО» для каждого обслуживания и суммарная наработка машины за данный период времени. Алгоритм может отличаться в зависимости от выбранных критериев, но принцип работы остаётся неизменным.

Для анализа технического состояния комплексного агрегата используется его структурная модель, которая реализована в специальной программе. Структурную модель комплексного агрегата можно создать непосредственно в диалоговом окне программы (см. рис. 2.9). Для этого в окно «Название машины» вводится «Комплексный агрегат» и её инвентарный номер, после чего нажимается кнопка «Добавить машину», и в появившемся диалоге вводится наработка машины (например 50 мото.час.). После этого соответствующая машина появится в окне редактирования структуры модели.

	A	B	C	D	E	F	G	H
1								
2				Суммарная наработка за период	471			
3								
4		Номер по порядку	Общая наработка ко времени ТО	Оставшаяся наработка до ТО			Проедполагаемый день проведения ТО	7
5		1	60	60				
6		Код	Система	Элемент	Трудоёмкость			
7		A212	Опорная каретка	Втулка и опорная ось	0,25			
8		B1	Преобразователи энергии	Двигатель ЯМ3238	2			
9		B2	Преобразователи энергии	АКБ	0,25			
10		G213	Муфта сцепления	Подшипник выжимной и направляющая втулка	0,25			
11		G531	Ременьная передача	Ремень	0,25			
12					3			
13								
14		Номер по порядку	Общая наработка ко времени ТО	Оставшаяся наработка до ТО			Проедполагаемый день проведения ТО	13
15		2	117	117			Обслуживание совмещено с плохими погодными условиями	
16		Код	Система	Элемент	Трудоёмкость			
17		A212	Опорная каретка	Втулка и опорная ось	0,25			
18		B1	Преобразователи энергии	Двигатель ЯМ3238	2			
19		B2	Преобразователи энергии	АКБ	0,25			
20		G213	Муфта сцепления	Подшипник выжимной и направляющая втулка	0,25			
21		G531	Ременьная передача	Ремень	0,25			
22					3			
23								
24		Номер по порядку	Общая наработка ко времени ТО	Оставшаяся наработка до ТО			Проедполагаемый день проведения ТО	19
25		3	177	177				
26		Код	Система	Элемент	Трудоёмкость			
27		A212	Опорная каретка	Втулка и опорная ось	0,25			
28		B1	Преобразователи энергии	Двигатель ЯМ3238	2			
29		B2	Преобразователи энергии	АКБ	0,25			
30		G213	Муфта сцепления	Подшипник выжимной и направляющая втулка	0,25			
31		G531	Ременьная передача	Ремень	0,25			
32					3			

Рисунок 2.15. Теоретический график обслуживания машины

Далее необходимо выделить курсором появившуюся машину и нажав на правую клавишу в появившемся диалоговом окне нажать кнопку «Добавить». В появившемся диалоге ввести название системы, подсистемы, структурного элемента и его идентификационный номер, а в правом окне заполнить свойства этого элемента, проставив галочки в соответствующих ячейках таблицы.

При необходимости структуру модели и свойства её элементов можно легко редактировать в этом же окне.

Для облегчения работы с программой в ней имеется справка, в которой отражены все этапы работы с системой. Для этого в окне программы имеется кнопка «О программе», расположенная рядом с меню «Файл», где можно вызвать команду «Справка», которая открывает диалог с полным описанием работы системы.

С помощью представленной модели реализуется алгоритм анализа функционирования торфяных машин. Достоинством предлагаемого алгоритма является возможность контроля, и прогнозирования состояния основных систем машины в любой момент времени в зависимости от фактической наработки

$H_{\Phi j}$ с уточнением по результатам текущей диагностики, что обеспечивает наивысшую эффективность использования ТМ в сезон добычи торфа с учётом погодных, эксплуатационных и технических условий (рис.2.16).

Если машина достигла наработки t_1 , то требуется проведение ТО-1, но при этом по результатам диагностики узел N_1 имеет остаточный ресурс до предельного состояния $t_2 - t_1$ (его не достаточно до следующего ТО).

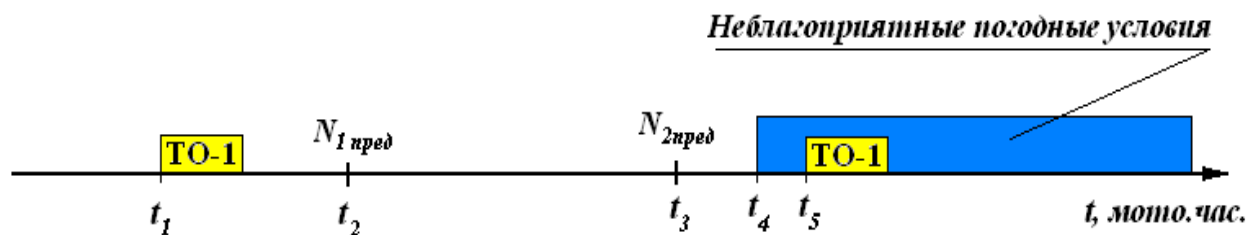


Рис. 2.16. Возможное распределение во времени состояния ТМ

Если при проведении ТО-1 узел N_1 не обслужить или отремонтировать, то при наработке t_2 технологическую машину нужно ставить на ремонт. При этом нарушается технологический процесс добычи торфа и машина, которая могла бы работать в метеоблагоприятных условиях, будет находиться на ремонте. Если узел N_1 отремонтировать при проведении ТО-1, то весь установленный ресурс он не отработает, т.е. часть его стоимости будет потеряна, но в этом случае машина будет работать в метеоблагоприятных условиях. Если стоимость произведённых машиной работ будет выше остаточной стоимости узла, то информационная система управления надёжностью предложит провести ремонт или обслуживание при наработке t_1 в процессе соответствующего ТО (рис.2.17). В противном случае такой рекомендации не будет.

Если наработка машины будет t_3 , то диагностируемый элемент торфяной машины N_2 достигнет состояния, когда его надо будет обслужить. Допустим, что данный элемент имеет возможность превышения наработки до обслуживания на 10% свыше установленной нормы (например, регулировка зазора в подшипнике), в этом случае выгоднее доработать до t_4 , когда будут неблагоприятные метеоусловия для работы машины и провести обслуживание этого



В этом же окне оператор может вручную выбирать действие и нажать соответствующую кнопку, после чего компьютер выведет на печать соответствующий вид ТО и перечень обслуживаемых элементов с трудоёмкостью работ.

Если оператор, в представленном на рисунке диалоге, не выберет каких-либо действий, то при нажатии на кнопку «Обслуживаемые элементы» система автоматически выведет соответствующее ТО и перечень дополнительных работ по обслуживанию и ремонту элементов машины по заложенной в программе методике в наиболее оптимальном сочетании для указанной наработки. Например, при анализе технического состояния комплексного агрегата требуется определить остаточный ресурс опор скребкового транспортёра на основе диагностики. На вкладке «Редактирование структуры» нужно выделить

курсором элемент (Скребковый транспортёр→Подшипник транспортёра), для которого нужно ввести параметры диагностики (Уровень виброакустического сигнала: -19 dB – номинальное значение, -15 dB – текущее значение, -7 dB – предельное значение), нажать на правую кнопку мыши и выбрать команду «Диагностические параметры» (рис.2.18).

В появившемся диалоге нужно поставить в активную ячейку галочку и ввести указанные параметры, после чего нажать кнопку «Сохранить и выйти».

После указанной процедуры остаточный ресурс на соответствующий элемент структурной модели будет рассчитываться не по статистическим данным, а в зависимости от изменения диагностируемого параметра на основе расчётов по степенной функции.

Оптимальное решение задачи по распределению ресурсов при эксплуатации ТМ возможно только при моделировании функционирования технологического объекта и использования специальных технических средств диагностики, обеспечивающих качественный сбор и обработку информации.

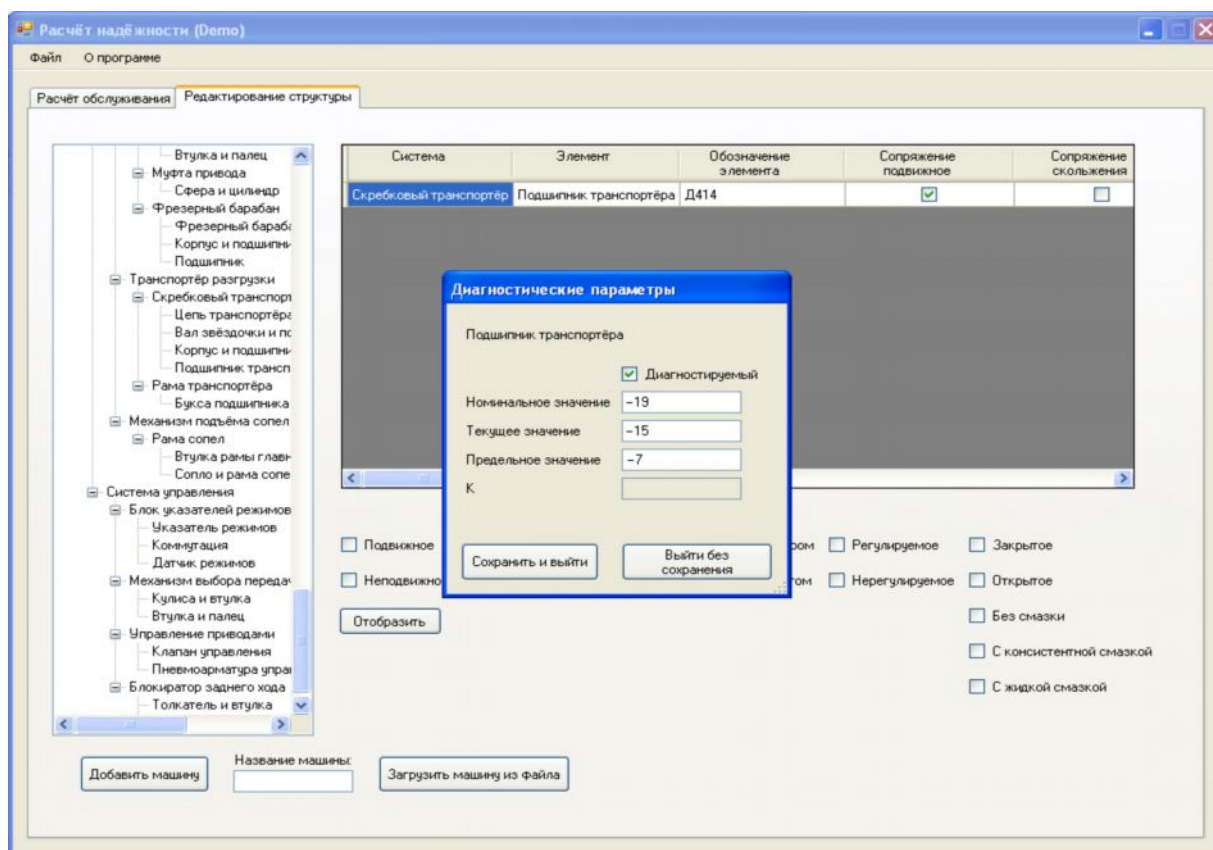


Рис. 2.18. Диалоговое окно введения диагностических параметров

В процессе эксплуатации любая технологическая машина взаимодействует с окружающей средой, оператором и объектом работы, при этом она теряет свою работоспособность, что требует затрат на восстановление, которые особенно велики в случае непредвиденных отказов торфяных машин, когда нарушается технологический процесс добычи. Поэтому в период эксплуатации необходимо максимально использовать благоприятные для добычи торфа дни, обеспечивая безотказную работу технологических машин на месторождении.

Отказы технологических машин являются результатом воздействия большого количества факторов, как объективных, зависящих от состояния и изменения параметров элементов конструкции, так и субъективных (организация работ, воздействия операторов на объект с целью поддержания его работоспособности и др.). Эти факторы воздействия (ФВ) необходимо учитывать при эксплуатации ТМ, т.к. они влияют не только на сам технологический объект, но и на всю технологическую систему в целом [1, 69].

Влияние всех этих факторов необходимо учитывать при создании имитационной модели технического объекта, на которой можно отработать возможные ситуации, возникающие при эксплуатации торфяных технологических машин, в том числе с учётом случайного распределения ФВ во времени.

2.5 РАЗРАБОТКА ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ТОРФЯНОЙ МАШИНЫ

Имитационное моделирование является компьютерным методом изучения реальных процессов, протекающих в различных системах, на основе алгоритмов реализованных с помощью информационных технологий. При использовании имитационного моделирования имеет большое значение не только проведение самих исследований, но и планирование эксперимента на модели с точки зрения полноты получаемой информации [37]. В процессе имитационного моделирования (рис. 2.19) реализуется взаимосвязь четырёх основных объектов участвующих в исследовании:

- реальная система (технологический объект, имеющий набор свойств и выполняющий какие-либо операции в реальной действительности);
- логико-математическая модель объекта (структурная модель технологической системы, описывающая его свойства, например, с точки зрения надёжности);
- имитационная (информационная) модель (набор алгоритмов, обеспечивающий изменение состояния модели объекта в зависимости от внутренних и внешних факторов);
- компьютер, на котором осуществляется имитация – направленный вычислительный эксперимент.

При планировании имитационного исследования на первом этапе необходимо изучить реальную систему (технологическую машину для добычи торфа) и разработать логико-математическую модель реальной технологической машины (структурную модель надёжности ТМ). Во время имитационного исследования реальная система определяется как совокупность взаимодействующих элементов, изменяющихся во времени под действием внешних и внутренних факторов.



Рис.2.19. Процесс имитационного моделирования

Технологическая система по добыче торфа описывается в модели в виде трех основных множеств:

U, V, T , где

U – Множество элементов системы (трибосопряжения с установленным количеством свойств и параметры внешней среды);

V – Множество допустимых связей между отдельными элементами (зависимости состояния структурных элементов модели от наработки машины и влияния внешней среды);

T – множество рассматриваемых моментов времени.

Имитационная модель позволяет воспроизводить состояние изучаемых объектов (торфяные технологические машины) с сохранением их логической структуры и эксплуатационных свойств (последовательности событий «Работоспособен», «Неработоспособен», «Добыча торфа возможна», «Добыча торфа невозможна» изменяющихся во времени, и их взаимодействие).

Создание имитационной модели состояния ТМ заключается в описании её структуры и процессов функционирования объекта в течение времени.

При описании имитационной модели используют две основные составляющие:

- статическое описание системы (структурная модель комплексного агрегата), которое является описанием её структуры. При создании имитационной модели технологической машины необходимо применять структурный анализ моделируемых процессов (процесс поддержания и восстановления работоспособности ТМ).
- динамическое описание системы, это описание взаимодействий её элементов (изменение технического состояния отдельных элементов и машины в целом, изменение возможности добычи торфа).

В имитационной модели торфяной машины внутреннее состояние является функцией времени, оно определяется в зависимости от состояния каждого элемента системы, которые могут изменяться от наработки в зависимости от вероятности отказа. Так же имеются внешние характеристики – погодные условия и организационные потери.

Для прогноза изменения состояния, развивающегося во времени процесса необходимо задать значения внутренних и внешних характеристик в исходный

момент времени (машина новая или капитально отремонтированная; машина, имеющая определённую наработку; машина, имеющая отремонтированные узлы и т.п.). Кроме того, необходимость иметь исходные значения состояния внутренних характеристик (состояние трибоэлементов) в начальный момент времени для того, чтобы с помощью алгоритма модели дать прогноз их изменения во времени. Изначальные значения внутренних характеристик элементов модели являются внешними характеристиками этого процесса.

Допустим, известен отрезок времени $[t_0, T]$ (период добычи торфа за сезон или меньший интервал времени – 10 дней на которые имеется прогноз погоды), на котором нужно получить прогноз количества часов добычи, а t_m – некоторый момент времени, лежащий на отрезке $[t_0, T]$. Допустим известно, что ТМ работоспособна в момент t_m , а модель, удовлетворяющая прогнозу о состоянии машины, должна позволить вычислить значения состояния в моменты t , принадлежащие отрезку $[t_m, T]$.

Для того чтобы, обладая параметрами свойств торфяной технологической машины в момент t_m , узнать их значения в следующий момент $t_{m+1} = t_m + \Delta t$ необходимо знать скорости изменения внутренних (состояние машины) и внешних (погодные и организационные условия) характеристик на отрезке $[t_m, t_{m+1}]$. Основные свойства технологического объекта, влияющие на возможность добычи, определены (исправность – внутреннее свойство технологической машины, неблагоприятные погодные условия, организационные потери – внешние).

Примем значения внутренних характеристик (состояние машины) моделируемого процесса в момент t_m через $y^1(t_m), \dots, y^n(t_m)$ (n в нашем случае равняется 430 – количество основных элементов влияющих на работоспособность комплексного агрегата); значения внешних параметров (возможность выполнения технологических операций) в момент t_m , оказывающих влияние на добычу торфа, через $z^1(t_m), \dots, z^r(t_m)$; скорости изменения характеристик – изменение возможности добычи в зависимости от изменения работоспособности основных элементов и от внешних условий на отрезке $[t_m, t_{m+1}]$, которые выра-

жаются через функции их состояния (вероятности отказа основных элементов в зависимости от наработки, простои по погодным и организационным причинам)

$$f^i(t_m, y^1(t_m), \dots, y^n(t_m), z^1(t_m), \dots, z^r(t_m)), \quad (2.13)$$

$r = 1, \dots, n$. Располагая значениями внутренних параметров, рассчитанных для конкретной наработки технологической машины, и значениями внешних характеристик (планы по организации работ и метеопрогноз) в момент t_m , можно вычислить значения $y^1(t_m + \Delta t), \dots, y^n(t_m + \Delta t)$ внутренних характеристик в момент t_{m+1} . Весь интервал времени (количество дней добычи за сезон) разобьем на T частей длительностью в один час, при этом $t_{m+1} - t_m = \Delta t$, $m = 0, 1, \dots, T$. Если известно исходное состояние машины (новая, капитально отремонтированная или машина имеющая наработку x), описанное значениями $y^1(t_0), \dots, y^n(t_0)$ внутренних характеристик в момент t_0 и скорости изменения состояния $f^i(t_m, y^1(t_m), \dots, y^n(t_m), z^1(t_m), \dots, z^r(t_m))$, $i = 1, \dots, n$, на каждом отрезке (в зависимости от конкретных условий $[t_m, t_{m+1}]$, то с помощью установленных соотношений можно вычислить значения основных параметров отвечающих за возможность осуществления технологического процесса добычи торфа при всех t_j :

$$f^i(t_{m+1}) = y^i(t_m) + \Delta t f^i(t_m, y^1(t_m), \dots, y^n(t_m), z^1(t_m), \dots, z^r(t_m)), \quad (2.14)$$

$$i = 1, \dots, n, \quad m = 0, 1, \dots, T. \quad (2.15)$$

Выражения (2.6) является динамической системой, с внешними характеристиками $z^1(t_m), \dots, z^r(t_m)$, $m = 0, 1, \dots, T$ – входами в систему (2.14), и внутренними характеристиками $y^1(t_m), \dots, y^n(t_m)$ – выходами.

Система (2.6) определяет значения внутренних характеристик элементов изучаемого процесса в дискретные моменты времени t_m , $m = 1, \dots, T$. Так как моделируемый процесс при любом значении t промежутка $[t_0, T]$ и функции состояния основных элементов $y^1(t), \dots, y^n(t)$ являются непрерывными, то вме-

сте с дискретной моделью можно описать процесс эксплуатации торфяных технологических машин с помощью «непрерывной» модели,

$$df^i/dt = f^i(t, y^1, \dots, y^n, z^1, \dots, z^r), \quad i = 1, \dots, n. \quad (2.16)$$

В данном конкретном случае функции $f^i(t, y^1, \dots, y^n, z^1, \dots, z^r)$, $i = 1, \dots, n$, являются «мгновенными» скоростями изменения состояния моделируемого объекта (может осуществлять добычу торфа или нет).

Модель является имитационной, следовательно, вычислить значения искомых показателей (количество часов добычи торфа за сезон) возможно только воспроизводя течение процесса, который описывается моделью (2.15), на компьютере. Это значит, что зависимость значений внутренних характеристик (состояние технологического объекта) от времени и внешних характеристик не выражается с помощью элементарных функций (степенных, логарифмических и т.д., а также результаты их преобразования, выполняемые в любом порядке). Известно, что производная от элементарной функции (функции описывающей состояние технологического объекта) является элементарной функцией, в то же время отсутствуют алгоритмы, позволяющие определить, будет ли искомое решение элементарной функцией. Для некоторых элементарных функций доказано, что решение соответствующих им динамических систем не является элементарной функцией. Когда неизвестно, является ли решение системы элементарной функцией, принято говорить, что «у системы нет аналитического решения», но при этом в некоторых случаях решение динамической системы может являться аналитической функцией времени или внешних характеристик (т.е. укладывается в сходящийся степенной ряд по независимым переменным) [100]. Поэтому для информационного (протекающего в компьютерной среде) воспроизведения течения процесса (эксплуатации торфяной технологической машины) необходимо от модели (2.7) переходить к её конечно-разностной аппроксимации. Вариантом такой аппроксимации может стать модель, которая

получается из системы (2.7) заменой производных df^i/dt , конечными разностями:

$$df^i/dt \approx (f^i(t + \Delta) - f^i(t))/\Delta, \quad (2.17)$$

Величина Δt в системе (2.7) является шагом дискретизации модели. Таким образом, дискретные динамические системы можно считать «стандартной формой» имитационных моделей, так как при численном решении на компьютере непрерывная динамическая система достаточно легко дискретизируется.

Имитационное моделирование, с точки зрения его программной реализации, состоит в том, что элементам системы ставят в соответствие некоторые программные компоненты (алгоритмы), а их состояние описывают с помощью переменных (периодичность обслуживания, ресурс, диагностический параметр и др.). Элементы системы взаимодействуют друг с другом (или обмениваются информацией) – реализуют алгоритмы функционирования отдельных элементов [202]. Функционирование данных элементов реализуется во времени, следовательно, необходимо иметь алгоритмы изменения их состояний (например, вероятность отказа от наработки элемента или изменение диагностируемого параметра). Динамика состояния технологического объекта в имитационных моделях реализуется с помощью механизма продвижения модельного времени (для ТМ дискретность системного времени один час). Основной особенностью имитационного моделирования является возможность описания, и воспроизведения взаимодействия между различными элементами системы во времени.

Следовательно, для реализации имитационной модели, необходимо:

- представить реальную техническую систему (процесс изменения состояния ТМ во времени), как совокупность взаимодействующих элементов;
- алгоритмически описать функционирование отдельных элементов (подсистема – *Погода*, подсистема – *Организационные потери*, подсистема – *Техническое состояние*);

- описать процесс взаимодействия этих элементов между собой и с внешней средой.

Основным компонентом в имитационном моделировании является выделение и описание состояний системы.

Система (ТМ) характеризуется набором переменных состояний, которые описывают конкретное состояние объекта «Работоспособен» или «Неработоспособен». Таким образом, имитационное моделирование – это представление динамического поведения системы посредством продвижения её от одного состояния к другому в соответствии с определенными правилами.

Изменения состояния в имитационных моделирующих системах происходит в дискретные моменты времени. Эти изменения называются *событиями*. Под *событием* понимается состояние модели, изменившееся вследствие осуществления множества взаимодействий между компонентами системы в установленный момент имитационного времени (рис. 2.20).

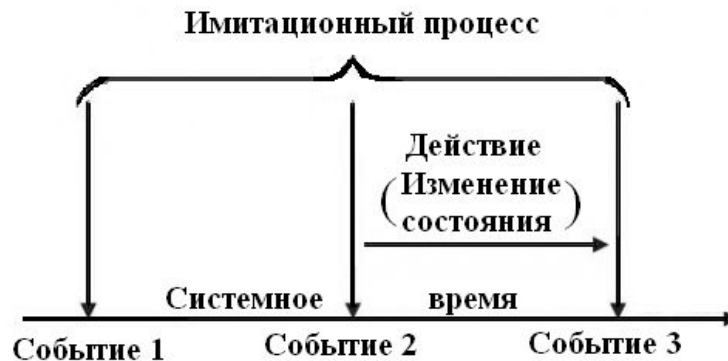


Рис. 2.20. Связь между событиями, действиями и процессами

Функционирование имитационной модели (состояния торфяной технологической машины с точки зрения возможности добычи) можно описать тремя основными составляющими:

- определением процесса изменения состояния моделируемой системы, протекающего в моменты возникновения различных событий;

- описанием воздействия внешней и внутренней среды модели (приводящие к изменению состояния), в котором участвуют различные подсистемы и элементы системы;
- реализацией имитационного процесса, через который проходят все элементы системы.

Имитационный процесс в этом случае представляет собой последовательность событий сориентированных в системном времени, которая может состоять из большого количества взаимодействующих процессов.

Вероятностная модель процесса эксплуатации торфяной машины рассматривается на интервалах 60 часов, так как это самый малый период обслуживания агрегатов.

Совмещая плановое обслуживание с текущим ремонтом и метеонеблагоприятными днями можно существенно повысить предложенный коэффициент использования метеоблагоприятных дней $K_{и\bar{o}}$ и увеличить объём добычи за сезон.

$$K_{и\bar{o}} = \frac{N_{доб}}{N_{ном} - N_{мнд}}, \quad (2.18)$$

где, $N_{доб}$ – фактическое количество дней добычи, $N_{ном}$ – номинальный годовой фонд времени добычи торфа (110 дней), $N_{мнд}$ – количество метеонеблагоприятных дней.

За время цикла обслуживания машины возможны следующие события:

A – Техническое обслуживание,

B – Неблагоприятный для добычи день,

C – Отказ первой группы сложности,

D – Отказ второй группы сложности,

E – Отказ третьей группы сложности.

Вероятности возникновения этих событий:

$P(A)$ – вероятность наступления ТО,

$P(B)$ – вероятность возникновения плохой погоды,

$P(C)$ – вероятность отказа первой группы сложности,

$P(D)$ – вероятность отказа второй группы сложности,

$P(E)$ – вероятность отказа третьей группы сложности.

При десяти часовом рабочем дне с режимом работы с одним выходным днём, цикл обслуживания составит шесть дней. В один из шести рабочих дней должно проводиться техническое обслуживание (событие A). Техническое обслуживание выгоднее производить во время неблагоприятной для добычи торфа погоды. Также существует вероятность того, что со временем прохождения ТО совпадёт хотя бы один отказ любой группы сложности.

Вероятность возникновения хотя бы одного отказа любой группы сложности $P(F)$ равна сумме вероятностей отказов каждой из групп:

$$P(C) + P(D) + P(E) = P(F). \quad (2.19)$$

В этом случае вероятность совпадения отказа с плохой погодой будет:

$$P(B) \times P(F) = P(G). \quad (2.20)$$

С учётом совпадения с ТО:

$$P(H) = P(G) \times P(A). \quad (2.21)$$

Преобразовав выражение, получим общую вероятность одновременного происхождения всех событий:

$$P(H) = P(B) \times (P(C) + P(D) + P(E)) \times P(A). \quad (2.22)$$

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.

Вероятность прохождения технического обслуживания в один из шести дней равна:

$$P(A) = 1 / 6 = 0,167. \quad (2.23)$$

Вероятность наступления технического обслуживания в один из пяти дней равна:

$$P'(A) = 1 / 5 = 0,2. \quad (2.24)$$

Следовательно, удельное увеличение вероятности совпадения дней ТО и метеонеблагоприятных дней при условном уменьшении дней в цикле будет:

$$1 - P(A) / P'(A) = 1 - 0,835 = 0,165. \quad (2.25)$$

С учётом смещения обслуживания на один день формула (2.21) примет вид:

$$P(H) = 1,165 \times P(A) \times P(B) \times (P(C) + P(D) + P(E)). \quad (2.26)$$

Имитационная модель технологической машины представляет собой информационную систему, состоящую из модулей, имеющих определённое назначение с точки зрения учёта какого-либо ФВ (фактора воздействия), влияющего на эксплуатацию ТМ. Информационная модель имеет интерфейс, связывающий её с оператором, позволяющий вводить исходные данные (внешние условия, влияющие на эксплуатацию ТМ). Эти данные поступают на входы соответствующих программных модулей – агрегатов, которые обрабатывают внешнюю и/или внутреннюю (поступающую от других программ системы) информацию, выдавая на выходе уведомление в соответствующей форме для формирования задачи другим модулям системы или выдачи конечного результата вычисления оператору.

На рисунке 2.21 показана общая структура функционирования модели технологической системы.

сменности конкретной машины и коэффициента внутрисменного использования (по статистике предприятия).

Также необходимо ввести количество неблагоприятных дней по метеоусловиям в соответствии с месяцем эксплуатации и среднее число простоев по организационным причинам (по статистике предприятия).

Для конкретной машины вводится периодичность и трудоёмкость технического обслуживания (ТО). После ввода внешних данных выбираются условия моделирования: с учётом совпадения дней ТО и ремонтов с метеонеблагоприятными днями, без их учёта или с учётом смещения наработки до ТО и ремонта.

В программе, реализующей разработанную модель, внутреннее состояние технологической системы меняется дискретно через один час. Модуль «Погода» с помощью генератора случайных чисел определяет состояние погоды на текущий час. Если погода неблагоприятная, то продолжительность таких условий определяется по среднестатистическим данным для региона и учитывается при переходе системы на следующий шаг (час). Если погода благоприятная, то модуль выдаёт соответствующее сообщение в основную программу, где по данному параметру формируется команда о возможности эксплуатации технологической системы.

В модуле «Организационные потери» генератор случайных чисел определяет возможность эксплуатации машины. Если эксплуатация невозможна, то продолжительность такого состояния определяется по среднестатистическим данным предприятия и учитывается при следующем шаге изменения состояния системы. Количество организационных потерь связано со средним временем перебазирования техники с участка добычи торфа на другой участок и средней продолжительностью добычи на месторождении.

Модуль «Восстановления работоспособности» осуществляет проверку состояния основных элементов системы, влияющих на безотказность технологической машины. Для каждого элемента генератор случайных чисел устанавливает состояние: исправен или неисправен. Вероятность возникновения не-

исправности зависит от наработки элемента, если наработка менее 50% ресурса, то вероятность отказа невысокая (берётся из статистических данных соответствующего узла для установленной наработки). Если наработка от 50 до 70%, то вероятность отказа возрастает, а если наработка более 70% от ресурса узла, то вероятность отказа – самая высокая. В том случае, если элемент неисправен, то формируется соответствующее сообщение и трудоёмкость восстановления в часах.

Отказ одновременно нескольких элементов возможен, если они влияют друг на друга. Например, выход из строя подшипника опорного колеса может привести к поломке сопряжения подшипника с опорной осью и самого колеса. В остальных случаях считается, что одновременный отказ двух не связанных между собой элементов невозможен.

Трудоёмкость восстановления элементов системы зависит от категории отказа. Отказ первой группы сложности может быть устранен непосредственно оператором машины без привлечения дополнительных средств восстановления. Отказ второй группы сложности может быть устранён ремонтной бригадой непосредственно на месторождении с использованием специального оборудования. Отказ третьей группы сложности может быть устранён только в условиях ремонтных мастерских, то есть требуется эвакуация машины с месторождения, что приводит к самым большим потерям. Информация о трудоёмкости восстановления конкретного элемента системы и возможная связь с другими элементами хранится в специальной базе данных системы.

Модуль «Восстановление работоспособности» проверяет состояние всех элементов системы и формирует сообщение: «Работоспособен» или «Неработоспособен». Если система неработоспособна, то формируется код отказа и трудоёмкость восстановления работоспособности, которая учитывается при последующих шагах работы системы.

После выполнения моделирования состояния системы на текущее время выполняется следующий шаг программы, при этом определяется новое состояние системы. Анализ продолжается до времени окончания сезона добычи

торфа или установленного оператором. По результатам анализа система выдаёт количество часов добычи и количество простоев из-за влияния различных ФВ на технологическую систему.

Достоинством предлагаемой модели является возможность получения и анализа информации работы технологической машины за сезон с учётом как внешних факторов (погодные условия, организационные потери и др.), так и внутреннего состояния объекта (отказы и обслуживание элементов).

Просчитав на модели все возможные варианты состояния технологического объекта можно с высокой долей вероятности принять правильное решение об условиях эксплуатации реальной машины.

Реализация предлагаемой методики анализа технической эксплуатацией машины позволяет снизить погрешность расчетов, повысить точность планирования, а так же качество ТО и ремонтов в зависимости от условий использования техники.

Задача информатизации данного направления включает в себя несколько этапов реализации.

На первом этапе был создан программный продукт обеспечивающий хранение и первичную переработку информации о состоянии машин, находящихся на балансе предприятия, наличии средств восстановления ресурса и планов реализации ТО и ремонтов.

Программный продукт включает в себя несколько подсистем:

- информативный интерфейс с возможностью настройки оператором,
- базу данных с системой управления, в которой хранятся массивы рабочей информации с возможностью редактирования, как по наполнению, так и по структуре,
- блок переработки информации (структурная модель технологической машины), построенный на основе специальных алгоритмов состав и свойства которых можно модифицировать.

На втором этапе происходит наполнение информационной базы, её оптимизация. Элементами второго этапа являются:

- массивы информации о состоянии парка по группам машин,
- справочные данные о возможных путях восстановления работоспособности ТМ,
- информация о планах реализации ТО и ремонтов, и средств реализации этих планов.

На третьем этапе создания системы управления работоспособностью требуется установить связи между параметрами состояния машины и условиями её эксплуатации, определить закономерности этих связей. На основе полученных информационных решений можно разработать экспертную модель, которая поможет специалисту по эксплуатации ТМ принимать наиболее оптимальные решения в процессе эксплуатации машин с максимальной экономической эффективностью. Установив значение циклового сбора и стоимость добываемого торфа можно рассчитать ущерб от отказа, какой либо машины участвующей в конкретном технологическом процессе.

Дополнительное время, которое потребуется на реализацию принятого циклового сбора торфа можно рассчитать по формуле 2.1 исходя из уменьшения суммарной производительности группы машин, участвующих в конкретной операции из-за отказа одной из них

$$\Delta t_s = \frac{Q}{(n-1) \times q} - \frac{Q}{n \times q}, \quad (2.27)$$

преобразовав выражение получим,

$$\Delta t_s = \frac{Q}{n \times q} \left(\frac{1}{n-1} \right), \quad (2.28)$$

обозначив выражение $\left(\frac{1}{n-1} \right) - J$ (коэффициент значимости), формулу можно представить:

$$\Delta t_s = \frac{Q}{n \times q} J. \quad (2.29)$$

По результатам анализа на модели при $J > 0,5$ обычно приходится часть работ переносить на следующий цикл добычи, то есть возникают значимые потери, если $J \leq 0,5$, то потери можно считать несущественными.

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 средне-статистического коэффициента 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 можно определить коэффициент готовности индивидуально с учётом особенностей каждой машины (рис. 2.22).

$$K_z^M = \frac{t_n}{t_n + \sum_{i=1}^n \tau_i}, \quad (2.30)$$

где t_n – наработка машины за установленный период в ч,

τ_i – время восстановления работоспособности i -того трибоэлемента в чел.ч.

Коэффициент готовности комплексного агрегата с общей наработкой с начала эксплуатации 1800 моточасов и количеством трибоэлементов 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 (2.1) будет равен

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

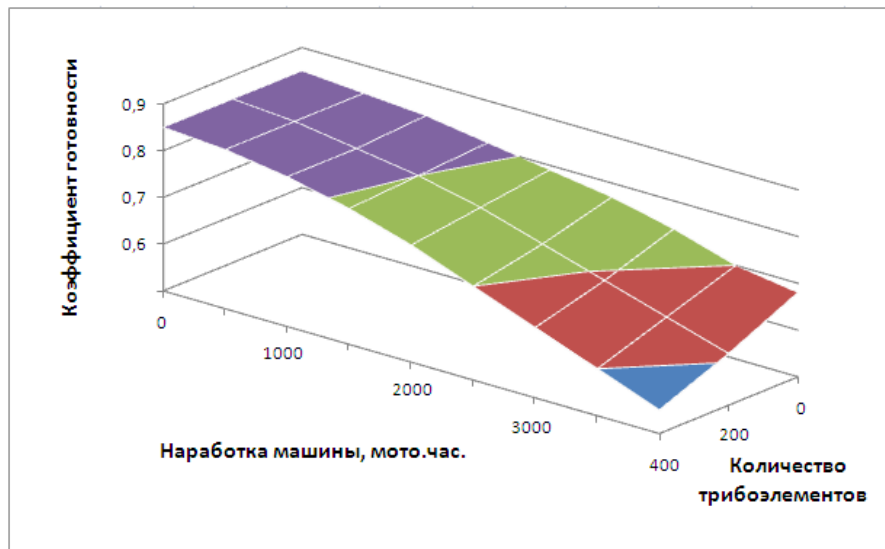


Рис. 2.22. Изменение коэффициента готовности от наработки машины

Аналогично был проведён анализ коэффициента готовности ТМ при других условиях эксплуатации. На рис. 2.23 показана номограмма изменения коэффициента готовности от наработки с учётом количества трибоэлементов торфяных машин полученного на основе компьютерного эксперимента и по данным ОАО «Васильевский мох» и объединения «Калининторф».

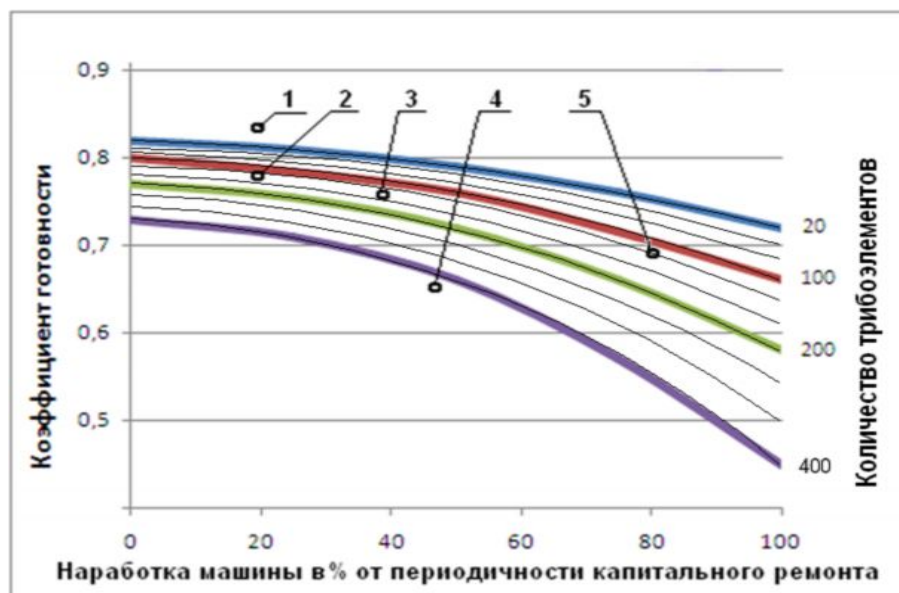


Рис. 2.23. Номограмма изменения коэффициента готовности от наработки машины
Точки: 1 – ВС-9,5 ($i=22$), 2 – МТФ-43А-К ($i=82$), 3 – Ф-6,5 ($i=108$), 4 – БПФ-3М ($i=430$),
5 – МТФ-43А ($i=96$)

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 разные 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. Условно отказы были распределены по группам и для каждой из них определён поток отказов (рис. 2.24).

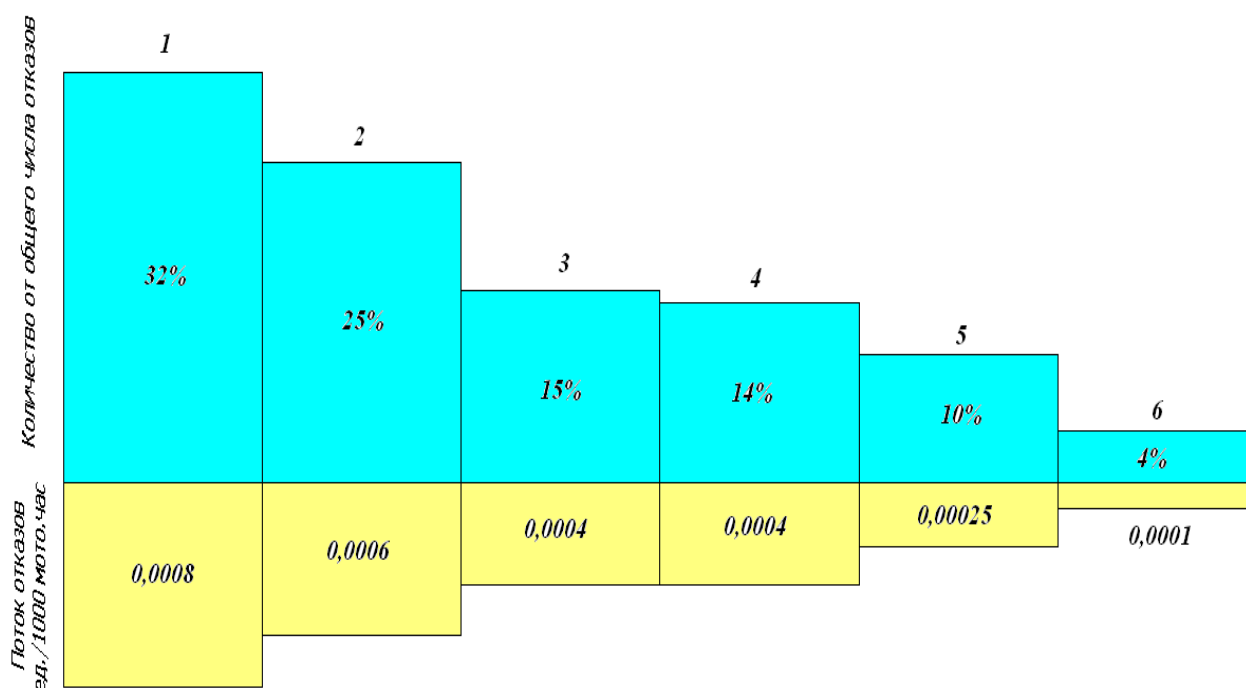


Рис. 2.24. Распределение отказов по группам элементов

1 - Фрикционные трибоэлементы, 2 – отказы рабочих элементов и элементов трансмиссии из-за перегрузки, 3 - отказы элементов несущей системы, 4 - антифрикционные трибоэлементы скольжения, 5 - антифрикционные трибоэлементы качения, 6 – др. элементы

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.

Коэффициенты готовности (см. рис. 2.23), полученные в процессе моделирования, несколько завышены, что объясняется влиянием объёмной пнистости на возникновение отказов. Установлено, что при наработке трибоэлементов менее 50% от ресурса коэффициент готовности машины существенно не уменьшается и незначительно снижается с увеличением количества трибоэлементов. При наработке трибоэлементов свыше 50% ресурса коэффициент готовности снижается с ростом наработки, в том числе более интенсивно с увеличением количества трибоэлементов. Следовательно, для машин, имеющих 100 и более трибоэлементов и выработавших более 50% ресурса, коэффициент готовности необходимо рассчитывать индивидуально и учитывать при разработке плана добычи фрезерного торфа.

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

$$Q' = q' ((N_{ном} - N'_{мнд}) t_{нд} - \sum_{i=1}^n \tau_i), \quad (2.31)$$

где q' - часовая условная производительность машины в т, $N'_{мнд}$ - количество метеонеблагоприятных дней не совпавших с днями ТО и ремонтов, $t_{нд}$ - дневная наработка машины, τ_i - трудоёмкость восстановления работоспособности i -того трибоэлемента.

При общей наработке с начала эксплуатации 1000 моточасов, и 60 метеонеблагоприятных дней за сезон не совпавших с днями ТО и ремонтов, дневной наработке $t_{\text{дн}}=8$ 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 (2.30) будет

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

Результаты анализа производительности уборочных машин МТФ-43 на основе компьютерного эксперимента и наблюдений за эксплуатацией представлены в таблице 2.7.

Анализа сезонной производительности уборочных машин МТФ-43 с помощью разработанной имитационной модели и эксплуатационных наблюдений показал хорошую сходимость теоретических и эмпирических данных, ошибка, при сравнении с доступной производительностью, не превышает 5%.

Таблица 2.7

Сезонная производительность уборочных машин МТФ-43

Количество метеонеблагоприятных дней за сезон добычи	Сезонная производительность МТФ-43 с наработкой до 1000 мото.ч., т.		
	По данным моделирования	По данным ОАО «Васильевский мох»	По данным ОАО «Васильевский мох» с учётом использования всего доступного для уборки времени
60	7240	5700	7500
70	6500	4860	6740

На рис. 2.25 показано изменение сезонной производительности уборочных машин МТФ-43 в зависимости от наработки и количества метеонеблагоприятных дней, полученное на основе компьютерного эксперимента.

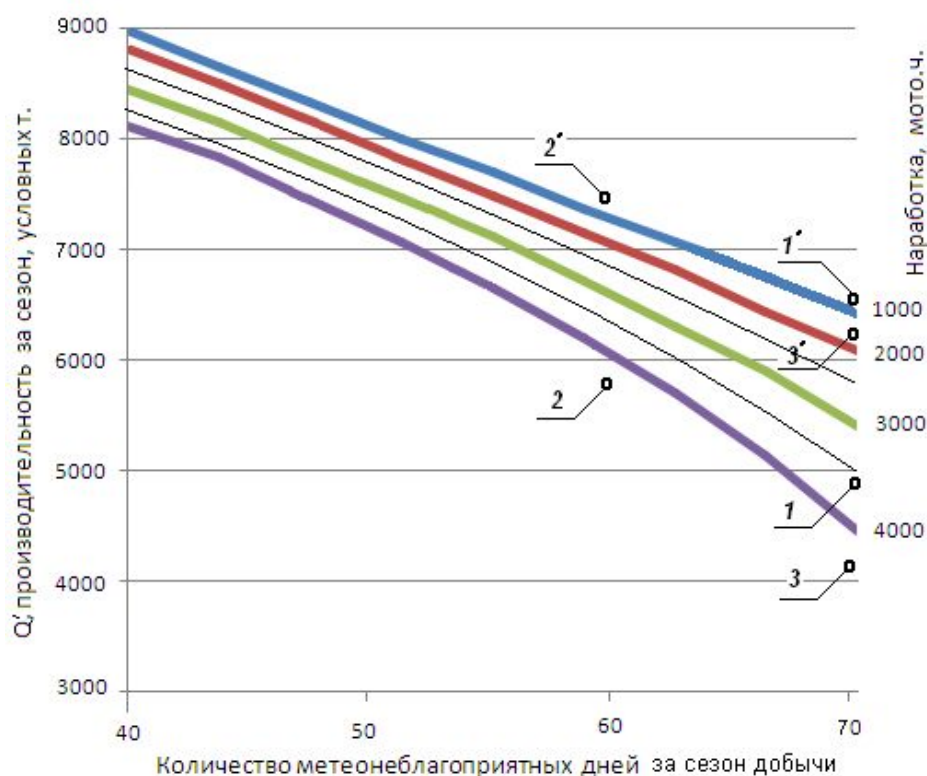


Рис. 2.25. Номограмма изменения сезонной производительности уборочной машины МТФ-43А-К и МТФ-43А в зависимости от количества метеонеблагоприятных дней и наработки

Точка 1 на рисунке 2.25 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 и 424 возможных. Точки 3 и 3' получены для уборочных машин МТФ-43А при наработке за сезон около 200 моточасов и 320 возможных (наработка с начала эксплуатации 1760 моточасов).

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.

На рис. 2.26 показано изменение сезонной производительности комплексного агрегата.

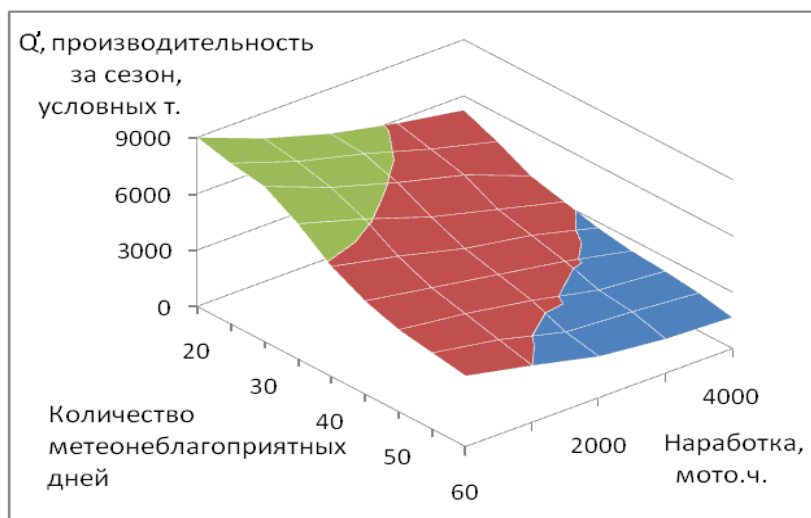


Рис. 2.26. Изменение производительности комплексного агрегата в зависимости от наработки и количества метеоблагоприятных дней в сезон добычи

Исследование на модели показало, что снижение производительности комплексного агрегата, имеющего 430 основных элементов при смещении операций по восстановлению работоспособности в сторону увеличения ресурса происходит почти в два раза интенсивнее, чем для уборочных МТФ-43А-К, имеющих 96 основных трибоэлементов. Это показывает, что с ростом числа элементов, оказывающих влияние на надежность машины, количество отказов, влияющих на производительность машины, увеличивается.

Так же установлены зависимости изменения производительности уборочной машины МТФ-43А-К при смещении операций по восстановлению работоспособности на метеоблагоприятные дни. В этом случае уменьшается время на восстановление работоспособности в метеоблагоприятные дни $\sum_{i=1}^n \tau_i$ (рис.

2.27).

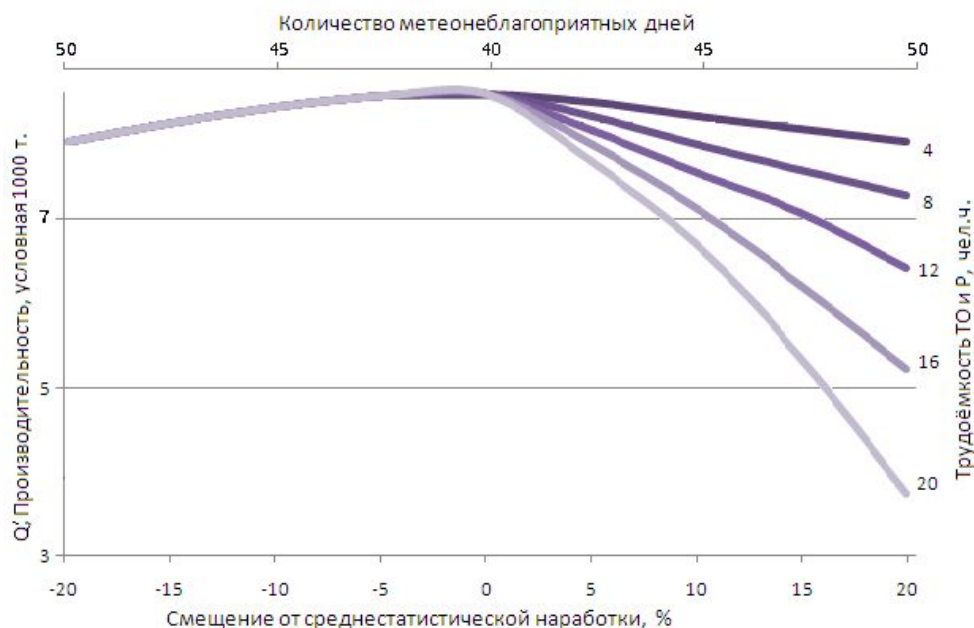


Рис. 2.27. Изменения производительности уборочной машины МТФ-43А-К при смещении ТО и ремонтов на метеонеблагоприятных дни и в зависимости от трудоёмкости ТО и ремонтов

Для элементов 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 метеонеблагоприятных дней. Для трибоэлементов с трудоёмкостью восстановления более 4-х чел.ч. смещение сервисных работ в сторону увеличения наработки повышает вероятность трудоёмких отказов, что 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 ко-

личества метеонеблагоприятных дней растут в двое 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.

ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ

1. Эксплуатационные исследования торфяных машин позволили установить зависимости параметров надёжности от наработки и количества основных элементов ТМ влияющих на безотказность, что позволяет использовать полученные данные для создания имитационной модели.

2. Результаты эксплуатационного исследования показали, что большинство отказов связано с повреждениями элементов машин древесными включениями, встречающимися в торфяной залежи. Следовательно, для повышения надёжности ТМ 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.

3. Разработанная модель надёжности торфяных машин, учитывает 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.

4. Для оценки выбранных параметров восстановления работоспособности предлагается коэффициент использования метеоблагоприятных дней.

5. 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.

3 МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ НАДЁЖНОСТИ ТОРФЯНОЙ МАШИНЫ ЗА СЧЁТ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ

3.1 ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ДИАГНОСТИКИ ТОРФЯНЫХ МАШИН

Для любого технического объекта можно выделить несколько параметров, характеризующих его состояние. Эти параметры устанавливаются в соответствии с методом диагностирования, учётом требуемой точности их определения, информативности параметра, трудоемкости операций по поддержанию и восстановлению работоспособности ТМ, а так же организационно-экономических условий. Параметры диагностирования должны быть: однозначными, информативными, технологичными и стабильными.

При эксплуатации в торфяных машинах протекает ряд взаимосвязанных процессов (динамические процессы, изнашивание сопряженных деталей, изменение механических свойств материалов и др.), что позволяет обеспечить оценку технического состояния косвенными методами (вибродиагностикой, по состоянию смазочных материалов и др.), и прогнозировать поведение объектов при дальнейшей эксплуатации [107, 117, 120].

Основной задачей диагностирования ТМ является проверка работоспособности отдельных узлов, а так же машины в целом, установление объёмов контрольно-регулирующих и плановых ремонтных операций в процессе технического обслуживания, обнаружение дефектов и проверка качества ремонта, а на более высоком уровне (информационном) – сбор и анализ информации с целью прогнозирования остаточного ресурса.

Безотказная работа ТМ на торфяном месторождении в период добычи, а также снижение затрат на ТО и текущие ремонты зависит от правильности выбора и точности диагностирования контролируемых параметров, а также от их изменений в процессе эксплуатации. Снижения затрат на ТО и ремонты можно добиться, если представить систему диагностирования как сложный (с

изменяющейся структурой) процесс, имеющий элементы адаптации к условиям, которые могут возникнуть при реальной эксплуатации.

На рис. 3.1 показаны операции, выполняемые при диагностировании отдельных узлов (подготовительные операции, установление диагностируемого параметра, его анализ и определение остаточного ресурса). Для узлов со значением параметра X_i , превышающим допустимое $X_{\text{доп}}$, проводятся соответствующие контрольно-регулирующие операции или текущий ремонт.

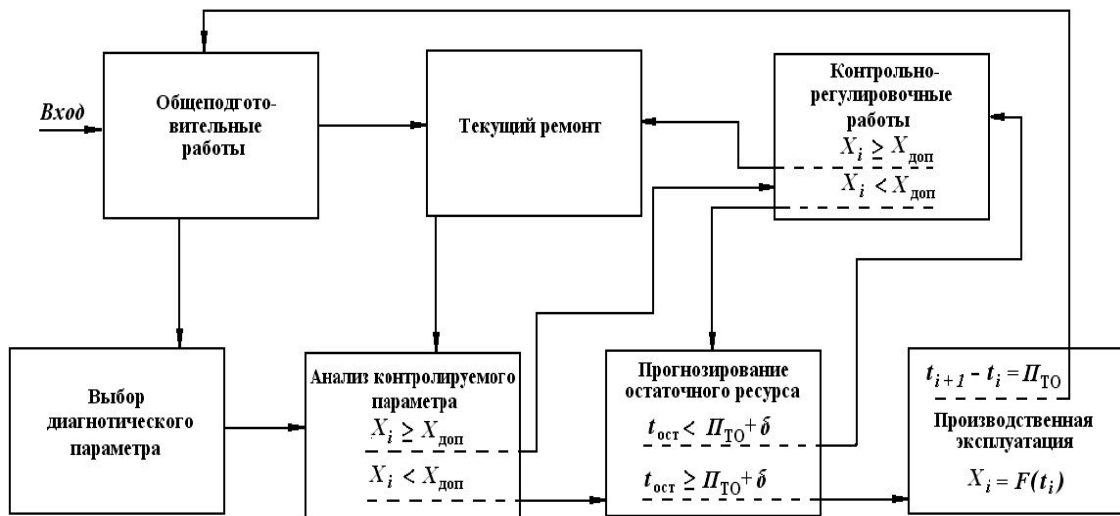


Рис. 3.1. Структурная схема диагностирования машины

В момент проведения диагностики техническое состояние объекта в целом или какого-либо узла устанавливается фактическое значение диагностируемого параметра X_i и сравнивается с $X_{\text{доп}}$ допустимым значением, которое является функцией от времени $t_{\text{доп}}$

$$X_{\text{доп}}(t_{\text{доп}}), \quad (3.1)$$

$$t_{\text{доп}} = t_{\text{п}} - \Pi_{\text{ТО}} - \delta, \quad (3.2)$$

где: $t_{\text{п}}$ – время достижения предельного значения контролируемого параметра, $\Pi_{\text{ТО}}$ – периодичность ТО. Если $X_i < X_{\text{доп}}$, то для объекта или элемента рассчитывается остаточный ресурс $t_{\text{ост}}$. Эксплуатация возможна, если $t_{\text{ост}}$ превышает наработку до очередного планового обслуживания с учетом значения ошибки прогнозирования δ . В том случае, если $t_{\text{ост}} \geq \Pi_{\text{ТО}} + \delta$, то машина пере-

дается в эксплуатацию, а если $t_{\text{отс}} < \Pi_{\text{ТО}} + \delta$, то необходимо провести контрольно-регулирующие операции или ремонт.

Учитывая сезонное использование ТМ важно планировать регулировочные и ремонтные работы с минимальным количеством вывода машины из эксплуатации. Исходя из этого условия, в процессе проведения ТО и ремонтов нужно проводить максимальное количество работ, в том числе по замене трибоэлементов, не достигших предельного состояния, если в случае дальнейшего использования таких элементов без замены это может привести к дополнительным потерям ресурсов из-за остановки торфяной машины на внеочередное обслуживание. В процессе определения технического состояния машины следует учитывать связи между различными структурными параметрами и функциональными, которые используются для диагностирования. При выборе параметров диагностирования в сложных системах строят структурно-следственные схемы подсистем или системы в целом. Они представляют собой модель-граф, объединяющий все основные элементы диагностируемой машины в единое целое, модель отображает основные свойства системы (её структурные параметры, характерные неисправности, диагностические параметры). Оценка работоспособности диагностируемой машины осуществляется по выходным параметрам, с использованием которых делается заключение «работоспособен» или «не работоспособен». Если для определения работоспособности ТМ используется только один параметр, то анализ состояния машины сводится к сравнению текущих и предельных его значений, но в большом количестве случаев это не позволяет дать правильную оценку технического состояния и может использоваться только для несложных ТМ.

Заключение о работоспособности торфяной машины по нескольким диагностическим параметрам делается на основе установленных связей между неисправностями и используемыми диагностическими параметрами. Для реализации этой задачи на практике широко используются диагностические матрицы, в которых представляются связи возможных неисправностей с диагно-

стическими параметрами (таб. 3.1). Единица в месте пересечения строки и столбца означает возможность наличия неисправности, а ноль – ее отсутствие.

Таблица 3.1

Диагностическая модель локализации неисправностей фрезерующего устройства

Диагностические параметры	Возможные неисправности			
	Дисбаланс фрезерного барабана	Увеличенные зазоры сопряжения «отверстие-сфера»	Износ подшипника	Потеря штифтов
Повышенный шум и вибрация при работе фрезерующего устройства	1	1	1	1
Высокий уровень суммарного виброакустического сигнала	1	1	1	1
Высокий уровень виброакустического сигнала на частоте вращения фрезы	1	1	0	1
Высокий уровень виброакустического сигнала на частоте превышающей скорость вращения фрезы	0	0	1	0
Увеличенное вертикальное перемещение фрезы со стороны муфты	0	1	0	0
Повышение температуры в подшипнике	0	0	1	0

Так, например, с помощью диагностической модели можно решить задачу локализации одной из четырех неисправностей фрезерного барабана Ф-6.5 с использованием шести диагностических параметров. Рассмотрим связь диагностических параметров на примере фрезы (рис. 3.2).

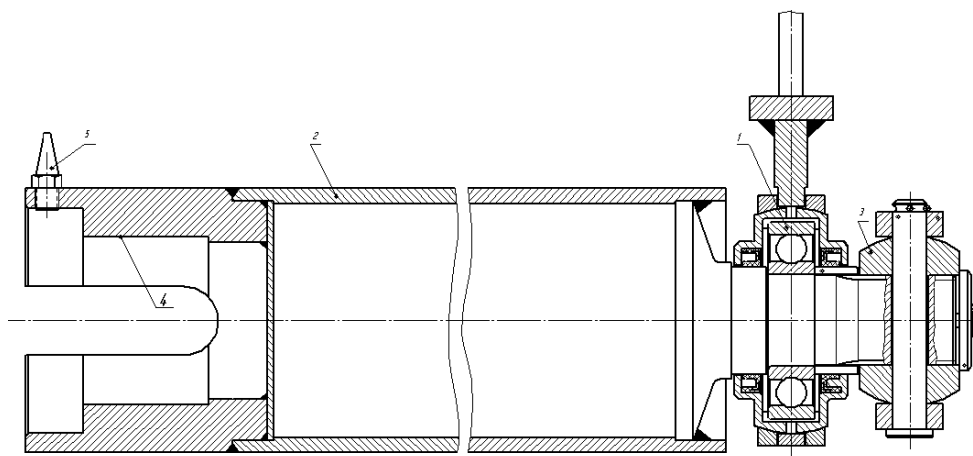


Рис. 3.2. Фреза внутренняя

На износ опорного подшипника 1 влияет дисбаланс фрезы 2, зазор в сопряжении муфты, зависящий от степени износа сферической опоры 3 и отверстия 4 в корпусе фрезерного барабана, который в свою очередь может быть определен по смещению в вертикальной плоскости консольной части корпуса. Дисбаланс фрезы может зависеть также от потери штифтов 5 в процессе фрезерования торфяной залежи.

На рисунке 3.3 представлена структурно-следственная схема анализа работоспособности фрезерующего устройства, которая позволяет установить связи между диагностируемыми параметрами.

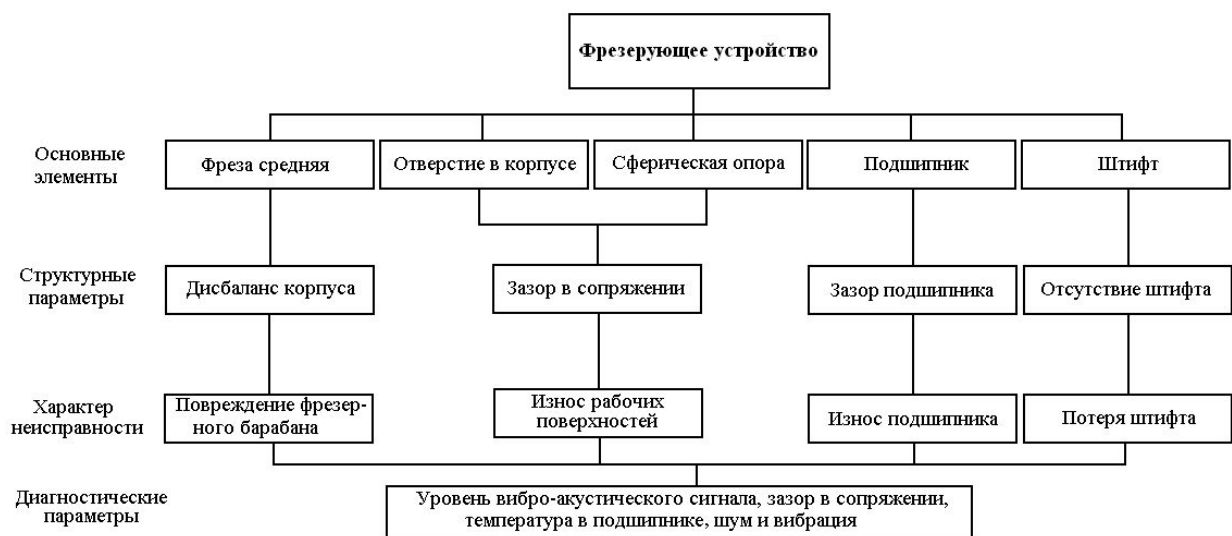


Рис. 3.2. Структурно-следственная схема анализа работоспособности фрезерующего устройства

Для определения остаточного ресурса элемента достаточно знать приращение изменения параметра относительно его начального значения:

$$\Delta X = K_c t_i'^{\alpha}, \quad (3.3)$$

где $t_i' = t_i - t_{\text{нач}}$. В практических исследованиях величиной $t_{\text{нач}}$ можно пренебречь и принять $t_i' = t_i$.

Остаточный ресурс тогда будет равен разности между наработкой $t_{пр}$, соответствующей предельному значению параметра $X_{пр}$, и наработкой t_i' при диагностировании ТМ:

$$t_{ост} = t_{пр} - t_i'. \quad (3.4)$$

Выразив $t_{пр}$ через $\Delta X_{пр}$ и через ΔX_i , получим

$$t_{ост} = \left(\frac{\Delta X_{пр}}{K_c} \right)^{1/\alpha} - t_i' = t_i' \left(\left(\frac{\Delta X_{пр}}{K_c} \right)^{1/\alpha} \left(\frac{K_c}{\Delta X_i} \right)^{1/\alpha} - 1 \right) = t_i' \left(\frac{\Delta X_{пр}^{1/\alpha}}{\Delta X_i^{1/\alpha}} - 1 \right) \quad (3.5)$$

При неизвестной наработке с начала эксплуатации до момента диагностирования остаточный ресурс можно определить по двум замерам параметра через установленный интервал наработки Δt :

$$\Delta t = t_i - t_{i-1} = \left(\frac{\Delta X_i}{K_c} \right)^{1/\alpha} - \left(\frac{\Delta X_{i-1}}{K_c} \right)^{1/\alpha} = \frac{\Delta X_i^{1/\alpha} - \Delta X_{i-1}^{1/\alpha}}{K_c^{1/\alpha}}, \quad (3.6)$$

откуда

$$K_c^{1/\alpha} = \frac{\Delta X_i^{1/\alpha} - \Delta X_{i-1}^{1/\alpha}}{\Delta t}. \quad (3.7)$$

Учитывая, что

$$\Delta t_i = \frac{\Delta X_i^{1/\alpha}}{K_c^{1/\alpha}} = \frac{\Delta t \Delta X_i^{1/\alpha}}{\Delta X_i^{1/\alpha} - \Delta X_{i-1}^{1/\alpha}}, \quad (3.8)$$

подставим значение Δt_i в формулу (3.5) и получим

$$t_{ост} = \frac{\Delta t (\Delta X_{пр}^{1/\alpha} - \Delta X_i^{1/\alpha})}{\Delta X_i^{1/\alpha} - \Delta X_{i-1}^{1/\alpha}}. \quad (3.9)$$

Достоверность прогнозирования остаточного ресурса, как правило, зависит от точности показателя степени α [120].

Значения контролируемых параметров могут отличаться в несколько раз у отдельных объектов диагностирования.

По данным исследований объёмный коэффициент подачи восьми сдвоенных аксиально-поршневых насосов 223.25 торфяных экскаваторов МТП-71-1 при наработке 5,6 тыс. моточасов изменялся от 0,2 до 0,8 при среднем значении 0,58. Результаты изменения коэффициента подачи этих насосов отражены на рис. 3.4 (кривые 1-8). Предельного состояния ($K_Q = 0,75$) восьмой подконтрольный насос достиг при наработке 2,7 тыс. моточасов, а второй и третий – при наработке около 6 тыс. моточасов. Среднему значению коэффициента подачи для предельного состояния соответствует наработка 4,2 тыс. моточасов. Таким образом, значения показателя α для рассматриваемых насосов изменяются на порядок. Следовательно, прогнозирование остаточного ресурса на основе среднестатистического значения $\alpha_{\text{ср}}$ приводит к существенным погрешностям. Анализ данных по изменению коэффициента подачи показывает, что ошибка прогнозирования остаточного ресурса по $\alpha_{\text{ср}}$ составляет более 50%. Таких ошибок можно избежать при определении значений α по каждому диагностируемому объекту при очередных контрольных мероприятиях.

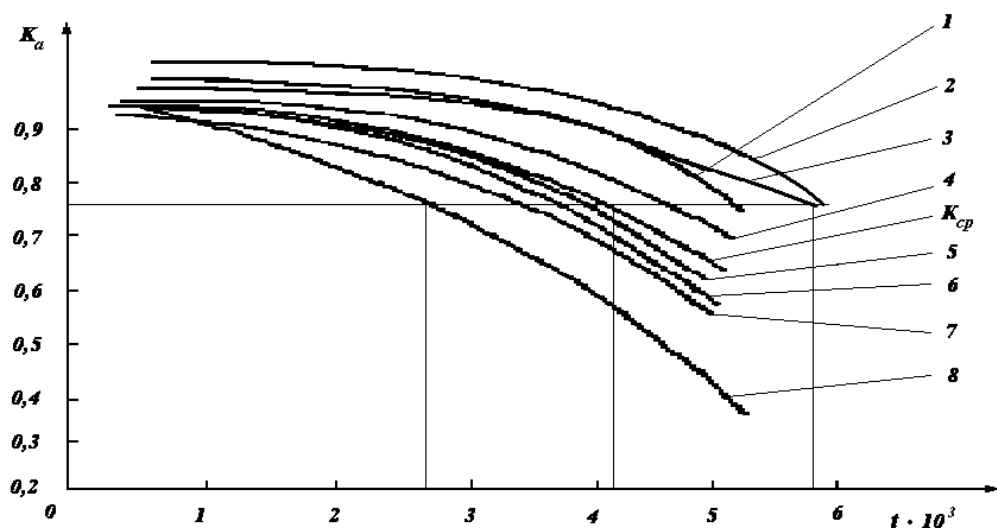


Рис. 3.4. Зависимость объёмного коэффициента подачи от наработки

В реальных условиях эксплуатации значение α можно определять по двум замерам диагностического параметра, решая систему уравнений

$$\Delta X_{\lambda} = K_c t_{\lambda}^{\alpha}, \Delta X_{\lambda+1} = K_c t_{\lambda+1}^{\alpha}, \quad (3.10)$$

где $\lambda = 1, \dots, p$; p – порядковый номер диагностики при $t_{\text{ост}} = 0$. После преобразований получаем

$$\alpha_i = \frac{\ln(\Delta X_{\lambda+1} / \Delta X_{\lambda})}{\ln(t_{i\lambda+1} / t_{\lambda})}. \quad (3.11)$$

С увеличением m точность α повышается.

Анализ результатов $t_{\text{ост}}$ с учетом значений α полученных для конкретной машины показывает хорошую сходимость экспериментальных данных с расчётными (ошибка не превышает 10% [120]).

В процессе эксплуатации любой торфяной машины накапливается информационный материал, который после обработки, скорректировать значение α .

Предлагаемая методика индивидуального прогнозирования остаточного ресурса узлов, сборочных единиц и торфяной машины в целом может быть использована во всех организациях, эксплуатирующих ТМ.

Диагностирование комплексного агрегата в целом позволяет сделать общее заключение о его работоспособности. Условно процесс диагностирования комплексного агрегата можно разделить на пять уровней (рис. 3.5).

На первом уровне производится общая диагностика торфяной машины по выходным параметрам, с помощью которой оценивается техническое состояние энергоустановки, трансмиссии, движителя, рабочего технологического оборудования и других элементов системы.

На втором уровне диагностируются энергоустановка – дизельный двигатель (например, ЯМЗ 238), электрооборудование, трансмиссия, движитель, рабочее оборудование и другие системы машины.

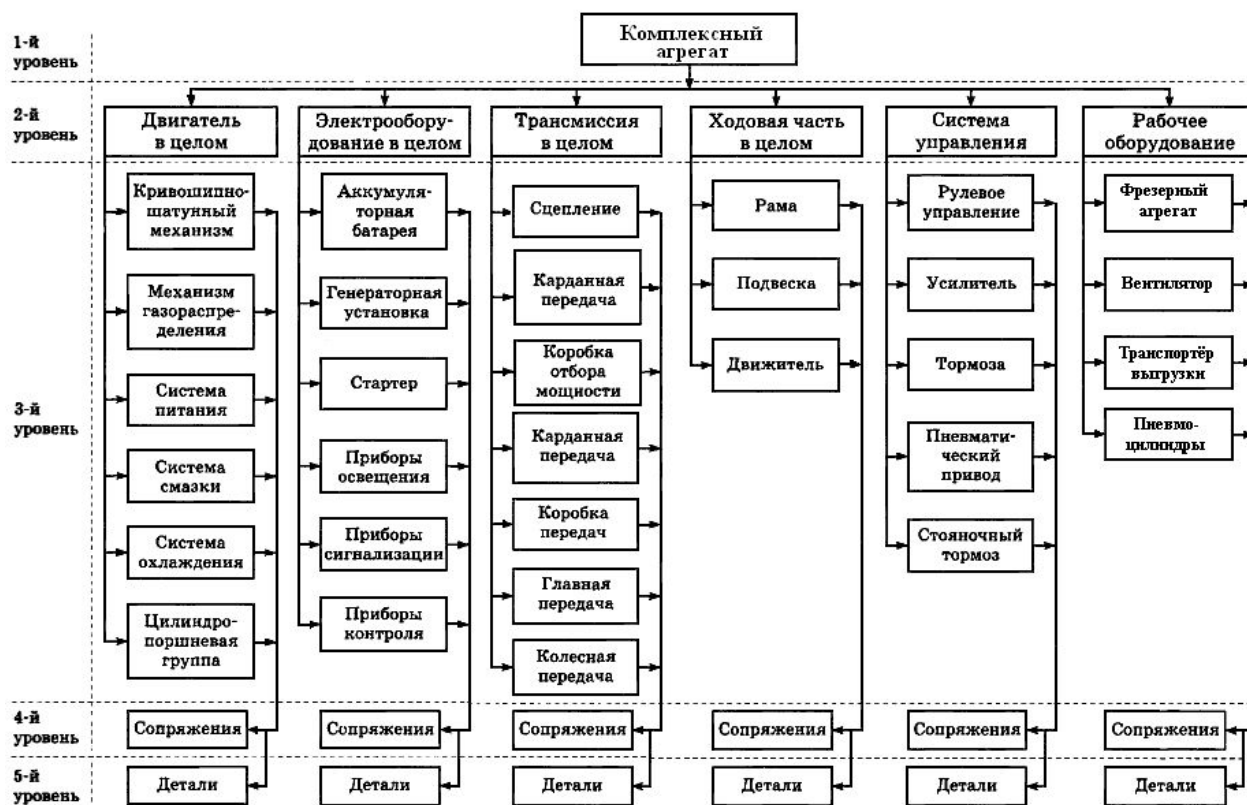


Рис. 3.5. Структурная схема диагностики ТМ

В третий уровень диагностирования включены узлы, приборы и системы двигателя, трансмиссии, движителя, технологического оборудования.

Четвертый уровень включает диагностирование сопряжений – трибоэлементов, которые отвечают за работоспособность узлов и торфяной машины в целом. На последнем уровне рассматриваются отдельные детали.

Применяя установленную последовательность диагностики можно существенно уменьшить трудоемкость выявления неисправностей, а также уточнить прогнозирование работоспособности торфяной машины.

В том случае, если параметры оценки технического состояния ТМ в целом находятся в допустимых пределах, то выполнение операций по следующим уровням нецелесообразно. Если же на первом уровне контролируемые параметры превышают допустимые значения, то на втором уровне требуется провести более полную диагностику и выявить неисправность, какой-либо системы, т.е. отдельно оценивается техническое состояние узлов. На третьем уровне проводится более полная поэлементная диагностика энергоустановки,

трансмиссии, двигателя и технологического оборудования для выявления технического состояния подсистем, а за тем сборочных единиц и трибоэлементов.

Для ТМ характерно интенсивное использование в период сезона добычи торфа, когда особенно важно своевременно и быстро устранять возникающие отказы и неисправности, осуществлять плановые ТО. Вследствие сложности конструкции комплексных агрегатов для повышения производительности необходимо увеличение расходов на диагностирование, техническое обслуживание и ремонт. Эти затраты, по данным объединения «Калининторф» для торфяных машин в течение года могут составлять более 15% их балансовой стоимости.

Обеспечение требуемой надежности в процессе эксплуатации ТМ в условиях интенсификации использования, а также старение производственных фондов делает особо актуальными проблемы анализа технического состояния и прогнозирования остаточного ресурса на основе диагностики.

3.2 ВИБРОАКУСТИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА ФРЕЗЕРУЮЩЕГО УСТРОЙСТВА

Безотказная работа ТМ на торфяном месторождении в период добычи и снижение затрат на ТО и текущие ремонты зависят от правильности выбора и точности диагностирования контролируемых параметров, а также от динамики их изменений в процессе эксплуатации.

При использовании информационных технологий на участке диагностирования ТМ прогнозирование остаточного ресурса можно проводить по основным трибоэлементам, сборочным единицам и машине в целом с использованием алгоритма *PR2* (см. рис. 2.4). Для диагностирования фрезерующего устройства наиболее информативным способом определения технического состояния является вибродиагностика.

Виброакустический метод диагностирования отличается от многих других методов большей универсальностью, мгновенной реакцией даже на незначительные изменения в состоянии контролируемого объекта. Многообразие физической природы возникновения вибраций, широкий частотный спектр обеспечивают высокую информативность в процессе контроля диагностируемых параметров трибоэлементов торфяных машин.

С помощью виброакустического метода диагностирования можно достоверно определять техническое состояние подшипников, зубчатых механизмов, вращающихся роторов и многого другого, что позволяет контролировать состояние технического объекта, качество его ремонта и предотвращать отказы, за счёт выявления неисправности на ранней стадии зарождения дефекта. При диагностировании механизмов торфяных машин важнейшей задачей является выделение из вибрационного процесса информативных составляющих и формирование из них диагностических параметров.

Один из наиболее простых виброакустических параметров — общий уровень вибрации в диагностируемых зонах механизмов торфяных машин. Для диагностирования механизмов по общему уровню вибрации необходимо знать среднее значение общего уровня для их номинального и предельного состояния. Сравнительно несложными электронными приборами типа ЭМДП по общему уровню вибрации в контролируемых зонах машины можно диагностировать многие механизмы. Однако погрешность определения фактических параметров будет достаточно высокой.

Протекающие в различных кинематических парах и системах торфяных машин динамические процессы, могут существенно отличаться своими индивидуальными свойствами, такими как момент появления ударного импульса, частота повторения и интенсивность взаимодействия.

Благодаря своим индивидуальным свойствам можно с помощью программных средств выделить полезную составляющую из вибрационного сигнала за счёт различных методов локализации:

- временной (выделение полезного сигнала во времени, например, в цикле работы узла),
- частотной (локализация сигнала соответствующей частоты),
- амплитудной селекции (выделение локального сигнала с определённой амплитудой),
- перераспределение нагрузки на проверяемый механизм с целью повышения уровня полезного сигнала и снижения помех от непроверяемых механизмов.

Для качественной диагностики очень важно правильно определить место установки датчика, выявляя наиболее правильные положения вибропреобразователя связанное с контролируемым узлом. Направленность чувствительного элемента вибропреобразователя относительно возмущающей силы служит эффективным способом повышения относительного уровня полезного сигнала, что особенно важно при диагностировании с использованием сравнительно простых малогабаритных электронных устройств.

Большинство механизмов машин формируют виброакустический сигнал с высокочастотным заполнением, отличающийся по амплитуде колебаний. Частота возникновения импульсов в цикле работы машины соответствует кинематике механизма, и, как правило, кратна частоте вращения основного элемента, находящегося во взаимодействии с рассматриваемыми механизмами.

В качестве вибрационного параметра можно использовать амплитуду колебаний, скорость или ускорение в зависимости от их целесообразности, удобства измерения конкретного параметра, уровня сигнала и возможностей измерительного преобразователя.

Для исследования процесса изменения состояния фрезерующего устройства в зависимости от различных факторов воздействия была разработана и изготовлена физическая модель в масштабе 1:5 (рис.3.6).

Фрезерный барабан 1 установлен на шарнирную раму 2 с помощью буксы 3 с подшипником. Привод осуществляется от коллекторного электродвигателя 4 через муфту 5.

Для выдерживания соотношения масс элементов фрезерующего устройства на шарнирную раму установлен дополнительный груз 6. Шарнирная рама соединяется с центральной рамой 7 и поддерживается пружиной 8 (обеспечивающий соотношение веса реальной шарнирной рамы относительно фрезы и опорного катка 9).

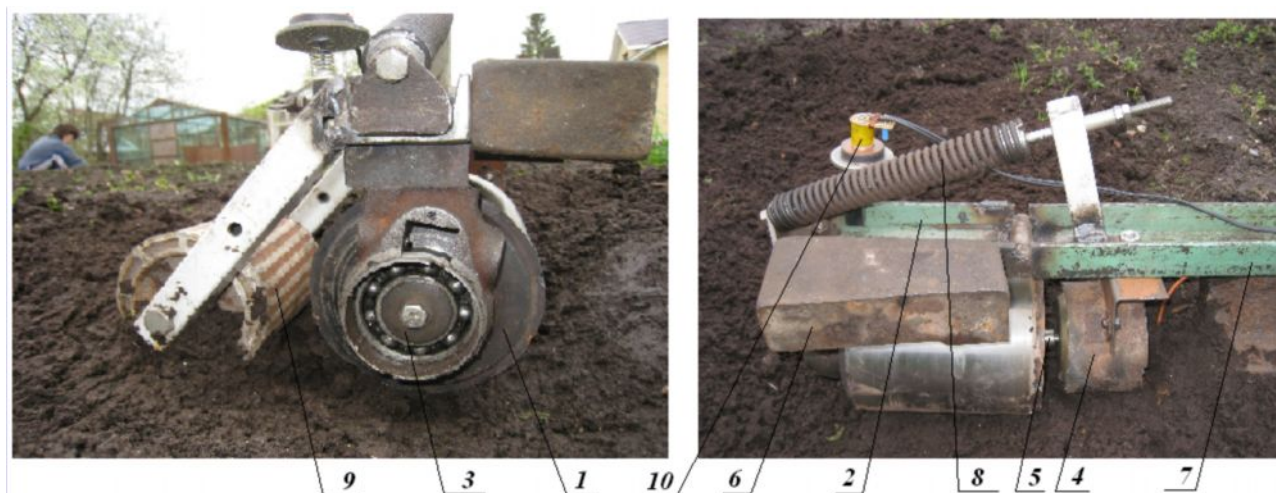


Рис.3.6. Модель фрезерующего устройства

Для измерения виброакустического сигнала использовался датчик 10, индукционного типа, подключенный через адаптер к ноутбуку.

Исследования проводились в три этапа по 100 часов каждый. На первом этапе испытания проходили на представленной установке с использованием нового опорного подшипника. На рисунке 3.7 показана амплитудно-частотная характеристика виброакустического сигнала, полученного на модели фрезерующего устройства с новым подшипником качения.

На рисунке 3.7 видно, что максимальная амплитуда сигнала наблюдается на частоте вращения фрезерного барабана. Это свидетельствует о существенном дисбалансе корпуса фрезы. Так же наблюдаются пики на более высоких частотах. Для определения источника сигнала использовался калькулятор частот подшипников качения.

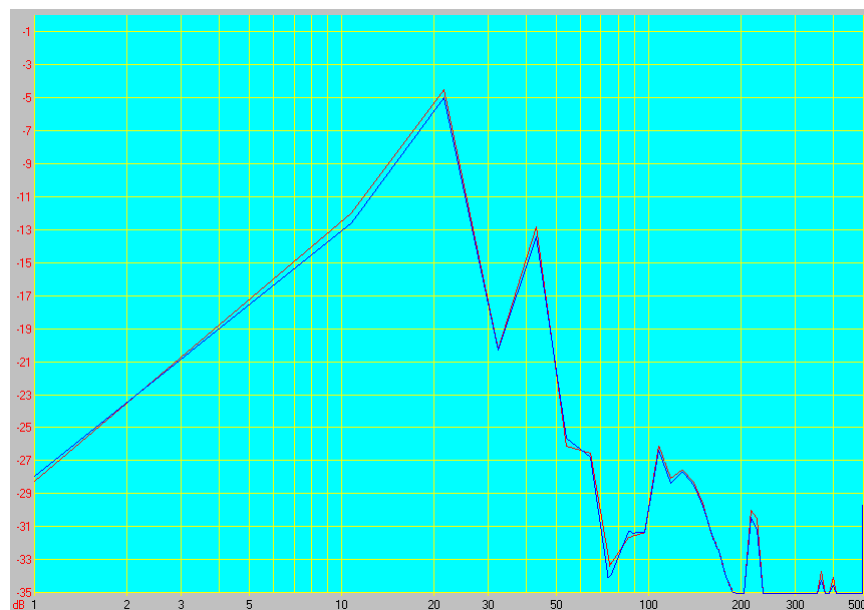


Рис. 3.7. Амплитудно-частотная характеристика виброакустического сигнала при испытании с новым подшипником качения

У принятого для испытаний подшипника разброс диаметров шаров находится в пределах 3-5 мкм, поэтому при вращении возникают вибрации на частоте 46 Гц. Ещё один характерный пик присутствует на частоте перекатывания тел качения по внутреннему кольцу, но амплитуда колебаний значительно меньше.

На следующем этапе испытаний были проведены исследования виброакустического сигнала полученного на модели фрезерующего устройства, у которого фреза установлена на частично изношенный подшипник качения (выработавший ресурс около 1000 моточасов). Общий уровень виброакустического сигнала при этом существенно вырос. Для анализа факторов, влияющих на уровень сигнала, была построена вторая амплитудно-фазная характеристика (рис.3.8).

На рисунке 3.8 видно, что амплитуда, соответствующая скорости вращения корпуса фрезы, не изменилась, а увеличилась амплитуда колебаний на частоте вращения шаров и перекатывания шаров по внутреннему кольцу, что свидетельствует об износе соответствующих деталей подшипника.

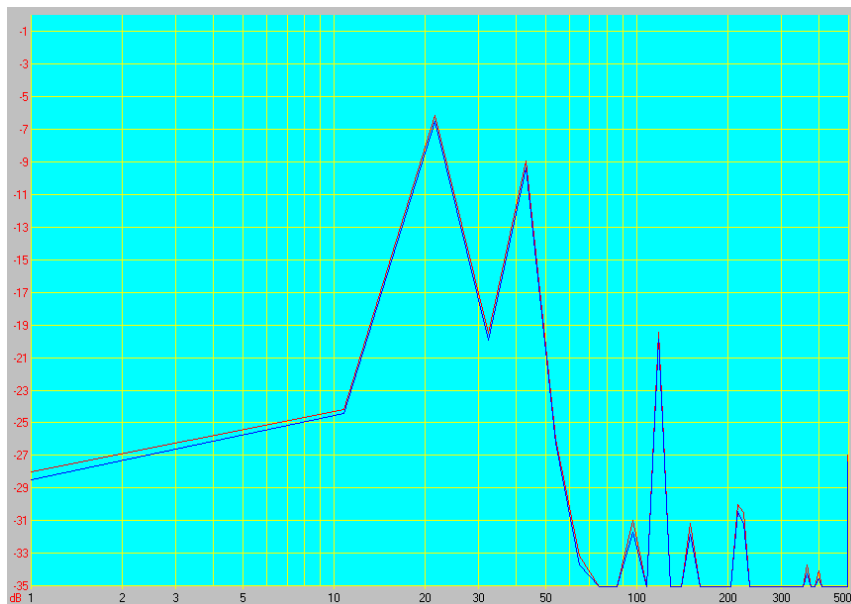


Рис. 3.8. Амплитудно-частотная характеристика виброакустического сигнала при испытании с частично изношенным подшипником качения

Ещё одно исследование было проведено с изношенным подшипником качения (выработавшим ресурс более 2000 моточасов). Из рисунка 3.9 видно, что практически по всем частотам деталей подшипника наблюдается значительный рост амплитуды колебаний. Это свидетельствует о предельном состоянии подшипника качения, то есть требуется его замена.

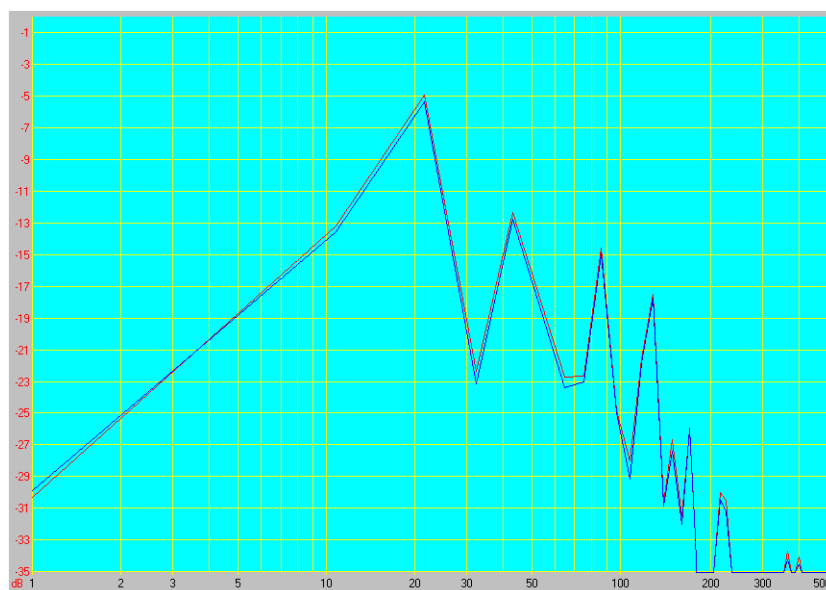


Рис. 3.9. Амплитудно-частотная характеристика виброакустического сигнала при испытании с изношенным подшипником качения

Состояние фрезерующего устройства в целом можно оценивать по суммарной величине виброакустического сигнала, а при значительном росте проводить анализ с разделением по частотам для выявления его источника.

На каждом этапе исследования на основе данных об изменении суммарного уровня шума рассчитывался коэффициент α , характеризующий степень изменения диагностируемого параметра от наработки (на первом этапе $\alpha = 1,1$ на втором 1,2 на третьем 1,7) (рис. 3.10).

Устанавливается коэффициент K_{ik} , определяющий интенсивность изменения параметра

$$K_{ik} = \alpha_{ik} / \alpha_{ik-1}. \quad (3.12)$$

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.

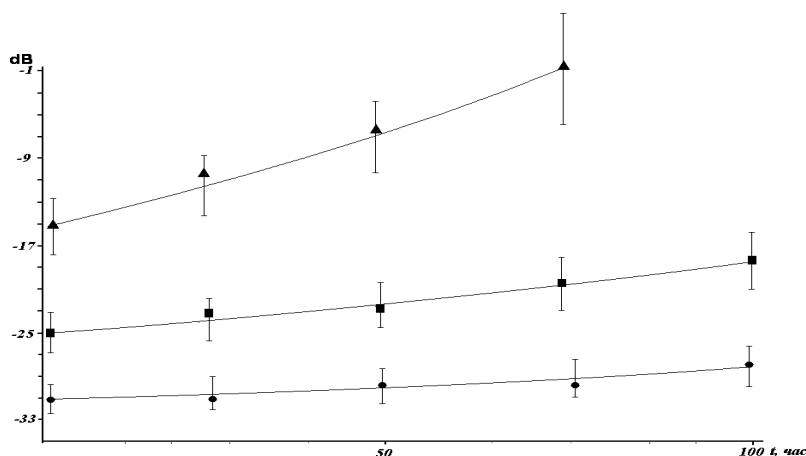


Рис. 3.10. Изменение виброакустического сигнала от наработки подшипников:

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

При периодическом диагностировании фрезерующего устройства можно достаточно точно выявить интервал времени, в котором подшипник переходит в зону интенсивного износа, когда отказ трудно прогнозируем, и требуется замена узла даже если не достигнуто предельное состояние по наработке.

Исследования на втором и третьем этапе показали, что по мере износа подшипника возрастает амплитуда колебаний на высоких частотах, а также растёт общий уровень виброакустического сигнала, который может быть использован для общей диагностики устройства.

Наиболее значимым фактором, влияющим на износ подшипника, является дисбаланс фрезы, который приводит к существенному росту нагрузки на опору. Поэтому перед началом использования фрезерующего устройства следует провести его диагностику и по её результатам принимать решение о передаче в эксплуатацию, или проводить балансировку. После проведения необходимых мероприятий требуется новая диагностика с сохранением исходной амплитудно-частотной характеристики, относительно которой в последующем будет проверяться изменение контролируемых параметров и рассчитываться остаточный ресурс элементов устройства.

Для проведения виброакустических исследований применялся индукционный датчик со специальным адаптером, позволяющим записывать сигнал на обыкновенный ноутбук в виде файла, который в последующем анализировался с помощью компьютерного приложения «Вибро-Про» вне диагностируемого объекта.

3.3 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРЕДЕЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ МОТОРНЫХ МАСЕЛ ТОРФЯНЫХ МАШИН НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ЗАГРЯЗНЕНИЙ СМАЗКИ

Система планово-предупредительного обслуживания и ремонтов, которая в основном используется в настоящее время при эксплуатации торфяных машин в нашей стране, не обеспечивает оптимального использования ресурсов, так как не учитывает индивидуального состояния каждого технологического объекта.

Оптимальное решение задачи по распределению ресурсов при эксплуатации ТМ возможно только при использовании информационных техно-

логий и специальных технических средств диагностики, обеспечивающих качественный сбор информации и анализ изменения суммарного экономического эффекта от наработки изделия. Это позволяет достаточно точно определить критерии оценки изменения состояния технического объекта и получить максимальный экономический эффект от использования ТМ [60-62, 166-169].

Состояние и ресурс силовых установок торфяных технологических машин в большой мере зависит от качества смазки [107, 158]. Поэтому основные операции по техническому обслуживанию связаны в той или иной степени с контролем и заменой масел, отработавших свой ресурс. Замена моторных масел чаще всего происходит в зависимости от наработки машины в соответствии с рекомендациями производителя. Но при этом не учитываются реальные условия эксплуатации, что может приводить к нерациональному режиму использования смазочных материалов, а в некоторых случаях к сверхнормативному износу трибоэлементов.

Периодичность замены смазки можно определить по экономическому критерию – удельным затратам. Затраты на поддержание работоспособности энергоустановки в процессе эксплуатации машины зависят от затрат на техническое обслуживание и текущий ремонт. Если замену масла производить при втором техническом обслуживании (ТО-2), то в затраты на техническое обслуживание войдет и стоимость масла. Поэтому определение периодичности замены масла сводится к определению периодичности ТО-2.

Согласно общепринятой методике оптимальную периодичность второго технического обслуживания устанавливают по минимуму суммарных удельных затрат на техническое обслуживание и текущий ремонт при известной периодичности технического обслуживания. Практически для этого необходимо иметь данные по затратам на техническое обслуживание и текущий ремонт при разной периодичности ТО-2. На рис. 3.11 приведена зависимость удельных затрат на второе техническое обслуживание и текущий ремонт двигателей СМД-60 тракторов Т-150 и Т-150К. Зависимость получена на основе исследо-

ваний, проведённых на торфодобывающих предприятиях объединения «Калининторф».

При подсчёте стоимости второго технического обслуживания учитывали основную и дополнительную зарплату рабочих, осуществляющих ремонты и обслуживание, расходы на замену масла и убытки от простоя машины при обслуживании. Как видно из рисунка 3.11, минимальная величина суммарных удельных затрат на второе техническое обслуживание и на текущий ремонт наблюдается при периодичности ТО-2 через 130-140 моточасов. Но статистический подход к определению периодичности замены смазки не учитывает физическую суть изменения состояния масла и не даёт возможности установить значение критерия предельного состояния.

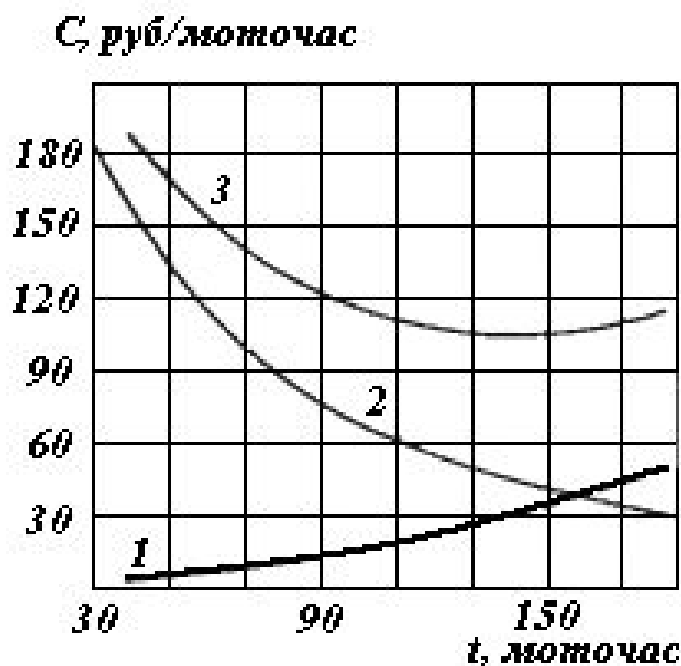


Рис. 3.11. Зависимость удельных затрат C на техническое обслуживание 2, на текущий ремонт 1 и суммарных удельных затрат 3 от периодичности второго обслуживания, замены масла в двигателе СМД-60

Изменение свойств смазочных масел при эксплуатации торфяных машин в основном происходит под действием двух основных причин:

- загрязнения масла инородными объектами – металлическими частицами (из-за износа трибосопряжений), пылью, водой, полимерными отложениями, топливом;

- образование в масле коррозионноактивных продуктов химических реакций.

При этом ухудшение свойств смазочных материалов вследствие загрязнения их продуктами, попадающими извне, чаще всего не зависит от первоначального качества масла.

В то же время интенсивность образования в масле продуктов окисления при одинаковых условиях эксплуатации смазываемого механизма целиком зависит от качества исходного смазочного материала.

Эти причины вызывают достаточно быстрое ухудшение качества масла, что в свою очередь приводит к сверхнормативному износу трущихся деталей, сокращению сроков службы механизмов, и как следствие к повышению затрат на ремонт.

Количество механических загрязнений из окружающей среды, попадающих в масло, может быть уменьшено тщательным уходом за системой подготовки воздуха, в том числе своевременной заменой фильтрующих элементов. Количество сажи и органических загрязнений, попадающих в масло, может быть уменьшено путем применения соответствующего топлива, поддержания необходимого теплового режима энергоустановки, безотказной работы системы впрыска топлива и газораспределения.

Качество очистки масла от нерастворимых примесей в большой мере зависит от конструкции и надежности работы масляных фильтров. При надежной работе фильтрующих элементов количество механических примесей в масле не превышает 0,1—0,2% и поэтому количество нерастворимых загрязнений достаточно стабильно.

В то же время растворимые примеси, образующиеся при окислении масла и топлива, не улавливаются фильтром, и их содержание в смазке непрерывно возрастает и может быть причиной его замены.

Ещё одним фактором ухудшения работавшего масла является содержание в нём воды. Особенно интенсивно идет накопление воды при низких температурах двигателей (при нарушении температурного режима), или в услови-

ях повышенной влажности окружающего воздуха, что характерно для торфопереработок.

В смазочных маслах при работе в двигателях торфяных машин происходят сложные процессы, протекание которых зависит от многих факторов: качества масла, состояния энергоустановок, режима и условий работы, качества топлива, надежности работы масляных, топливных фильтров и воздухоочистителей, а также климатических факторов.

Поскольку соотношение факторов, влияющих на протекающие в масле процессы, в каждом случае является индивидуальным, то могут изменяться и причины, по которым масло становится непригодным для дальнейшей эксплуатации. В каких-то случаях будет недопустимое содержание механических примесей, в других — топливных фракций, в-третьих — воды, в-четвертых — кислот.

Одной из наиболее сложных подсистем торфяных машин является энергоустановка, которая в свою очередь состоит из большого количества трибоэлементов, период обслуживания которых в большой мере зависит от свойств смазочных материалов. Чаще всего техническое обслуживание связывается с рабочим циклом моторного масла, от качества которого зависит наработка до замены (может изменяться от 60 до 240 моточасов). Используя масла различного качества и модификаторы к ним можно добиться наиболее эффективной эксплуатации торфяных машин в период добычи с учётом потребностей технологического процесса, индивидуальных особенностей ТМ и погодных условий.

Если замену масла производить через определённую наработку в часах, которая установлена многолетней практикой, то сроки замены масла являются примерными и усреднёнными, поэтому для улучшения ТО желательно пользоваться объективными критериями, позволяющими уточнить состояние смазки. Такими критериями могут быть цвет и вязкость масла, содержание механических примесей, осадков, воды и химически активных загрязнений.

Для определения динамики изменения свойств смазочных материалов и определения необходимых критериев оценки их состояния были проведены исследования масел для моторов торфяных машин в процессе эксплуатации.

Для более полной оценки изменения состояния масел в зависимости от выработанного ресурса двигателя пробы отбирали из моторов находящихся в различном техническом состоянии.

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. Для сравнения триботехнических свойств масел используемых в двигателях торфяных машин проводились сравнительные исследования на машине трения, определялись кинематическая вязкость, щелочное и кислотное число, класс чистоты нефтепродукта, цвет и сульфатная зольность. Проводился спектральный анализ на атомно-эмиссионном спектрометре (рис.3.12) и другие исследования [35].

Спектральный анализ масел показал, что большинство контролируемых параметров (механических загрязнений) за время эксплуатации торфяных машин не вышли за предельные значения.

Так же в исследованиях использовался комплекс лабораторного оборудования, состоящий из автоматического титратора 905 Titrando, атомно-эмиссионного спектрометра SPECTROIL M, анализатора ГРАН-152, калориметра ЦНТ, аналитических весов GR-202, муфельной печи SNOL и других приборов [68].

В таблице 3.2. представлены результаты исследования моторных масел на содержание вредных примесей.

Класс чистоты и цвет масла практически у всех проб соответствовал нормативным параметрам только до эксплуатации, а при наработке свыше 50 моточасов выходил за пределы установленные стандартом. Вследствие этого,

при субъективной оценке загрязнённости масла можно допустить ошибку и произвести замену нефтепродукта, который ещё не выработал свой ресурс (например, проводилась замена ещё работоспособного масла М8В2 при наработке 80 моточасов моторов Д240 тракторов МТЗ-80).

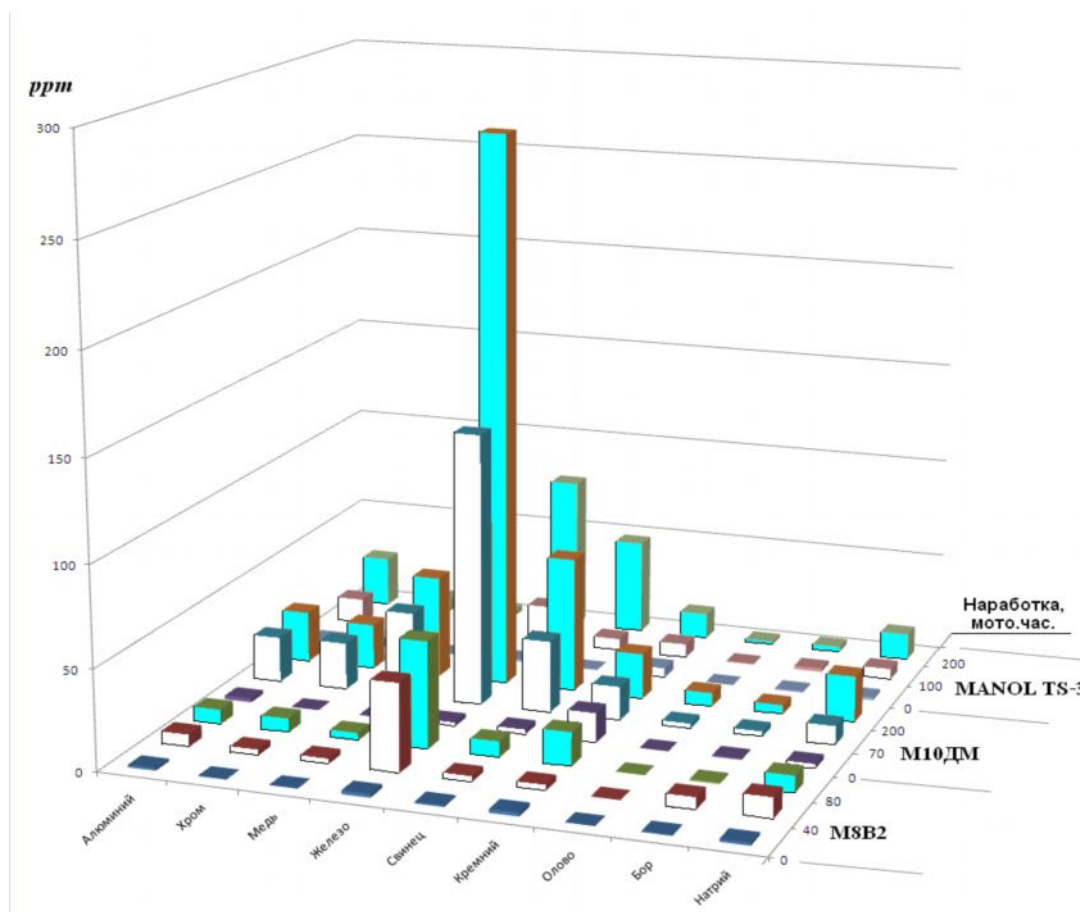


Рис. 3.12. Гистограмма изменения количества механических загрязнений в моторных маслах в процессе эксплуатации торфяных машин

Практически у всех исследуемых масел быстро изменялся класс чистоты и цвет, что характерно для моторов, замена масла в которых производится без промывки. Следовательно, этот параметр не может быть использован в нашем случае для диагностики масел. Наиболее информативным, с точки зрения изменения состояния масла в нашем исследовании, является динамика роста содержания железа, именно по этому параметру наблюдается существенный рост у всех проб, а у масла М10ДМ превышено предельное значение при наработке около 200 моточасов. Это связано как с интенсивностью нагружения

технологических элементов уборочных машин, так и с техническим состоянием энергетических установок.

Таблица 3.2

Результаты исследования моторного масла MANOL TS-3

Наименование показателя	Метод испытания ГОСТ	Норма по ГОСТ 8581	Новое масло	Наработка 100 мото.ч	Отработанное масло 200 мото.ч.
Кинематическая вязкость при 100°C, мм ² /с	33	не менее 14	14,4	12,95	12,30
Щелочное число, мг КОН на 1 г масла	11362	не менее 8,2	9,5	6,2	3,2
Кислотное число, мг КОН на 1 г масла	5985	-	0,6	1,6	2,8
Содержание загрязняющих веществ, ppm: Алюминий Хром Медь Железо Свинец Кремний Олово Кальций Цинк Фосфор Бор Натрий	спектральный анализ		0,522	12,712	25,327
			0,088	3,297	6,918
			0,08	2,899	3,044
			1,08	19,41	76,83
			0,09	6,085	47,75
			5,002	7,057	12,917
			0,000	0,4	1,8
			2011,6	2000,7	2027,4
			1276,4	1100,0	1001,3
			803,41	683,84	541,00
			0,63	1,741	2,699
			1,407	5,537	13,237
Класс чистоты	17216	-	11	13	более 17
Цвет на колориметре, ед. ЦНТ, 15:85	20284	не более 3,5	2,0	более 3,2	более 4,8
Зольность сульфатная, %	12417	не более 1,2	1	1,1	1,2

Продолжение таблицы 3.2

Результаты исследования моторного масла М8В2

Наименование показателя	Метод испытания ГОСТ	Норма по ТУ 38.401-58-37	Новое масло	Наработка 40 мото.ч	Отработанное масло 80 мото.ч
Кинематическая вязкость при 100°C, мм ² /с	33	7,5 – 8,5	8,048	11,71	10,95
Щелочное число, мг КОН на 1 г масла	11362	не менее 3,5	4,0	2,7	1,6
Кислотное число, мг КОН на 1 г масла	5985	-	2,6	3,3	2,1
Содержание загрязняющих веществ, ppm:	спектральный анализ				
Алюминий			1,257	6,342	7,454
Хром			0,209	3,109	7,048
Медь			0,068	2,907	3,981
Железо			1,802	44,003	53,436
Свинец			0,907	2,948	785,99
Кремний			1,786	3,109	16,910
Олово			0,000	0,000	0,000
Кальций			1242	2044,8	1618,6
Цинк			1097,8	1050,2	785,99
Фосфор			841,99	870,27	554,61
Бор			0,429	6,014	0,730
Натрий			1,393	10,403	8,598
Класс чистоты	17216	-	11	более 17	более 17
Цвет на колориметре, ед. ЦНТ, 15:85	20284	не более 4,5	1,5	более 8,0	более 8,0
Зольность сульфатная, %	12417	не более 1,3	0,8	1,3	1,0

Результаты исследования моторного масла М10ДМ

Наименование показателя	Метод испытания ГОСТ	Норма по ГОСТ 8581	Новое масло	Наработка 70 мото.ч.	Отработанное масло 240 мото.ч.
Кинематическая вязкость при 100°C, мм ² /с	33	не менее 11,4	12,13	10,95	12,30
Щелочное число, мг КОН на 1 г масла	11362	не менее 8,2	8,8	2,2	1,2
Кислотное число, мг КОН на 1 г масла	5985	-	1,6	2,6	3,8
Содержание загрязняющих веществ, ppm:	спектральный анализ				
Алюминий			1,922	22,912	25,727
Хром			0,188	23,697	22,917
Медь			0,089	42,899	51,044
Железо			2,087	136,41	276,83
Свинец			2,634	36,085	147,75
Кремний			15,002	17,057	22,917
Олово			0,000	2,486	6,810
Кальций			2211,6	2084,7	2217,4
Цинк			1076,4	1200,0	1101,3
Фосфор			823,41	883,84	741,00
Бор			0,673	2,741	4,699
Натрий			2,407	9,567	23,277
Класс чистоты	17216	-	13	более 17	более 17
Цвет на колориметре, ед. ЦНТ, 15:85	20284	не более 3,5	3,0	более 8,0	более 8,0
Зольность сульфатная, %	12417	не более 1,5	1,3	1,4	1,2

По содержанию железа видно, что мотор 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. Пара-

метры кинематической вязкости и сульфатной зольности в процессе исследований находились в допустимых пределах и существенно не изменялись, поэтому они не отражены в результатах испытаний.

Повышенное содержание железа, связано с интенсивностью износа основных трибоэлементов, следовательно, позволяет оценить условия эксплуатации мотора. Именно по этому параметру можно сделать вывод, что двигатель уборочной машины интенсивно нагружен (за 50 моточасов до замены был превышен предельный параметр – содержание железа 200 ppm).

По результатам исследования проб с других моторов торфяных машин, предельного состояния масел по параметрам механических загрязнений достигнуто не было.

Ещё одна задача исследования – определение набора контролируемых параметров масел, обеспечивающих достаточную информативность измерения состояния нефтепродукта, и отвечающих при этом минимальной стоимости диагностики.

Спектральный анализ и другие исследования показали, что динамика изменения основных контролируемых параметров у конкретной машины приблизительно одинаковая, следовательно, нет необходимости определять их все, а достаточно выявить наиболее значимые.

Исследования показали, что для диагностики состояния моторных масел торфяных машин достаточно контролировать щелочное или кислотное число и содержание железных загрязнений (рис.3.13).

На торфяных месторождениях в условиях повышенной влажности кислотное и щелочное число достаточно быстро достигают предельного значения, поэтому для продления ресурса масла можно использовать специальные модифицирующие присадки (например, АКОР-1), которые восстанавливают антикоррозионные свойства масел, или использовать специальные масла с повышенным содержанием ингибиторов коррозии.

Интенсивный рост количества железных загрязнений в начальный этап эксплуатации выявлен на машинах имеющих большую наработку. Это объяс-

няется изношенностью моторов, а уменьшение динамики роста этого параметра обусловлено работой масляных фильтров и обновлением масла связанным с доливом из-за угара и утечек в процессе работы (пробы масла М8В2 из моторов Д-240 не достигли предельных значений по параметрам механических загрязнений).

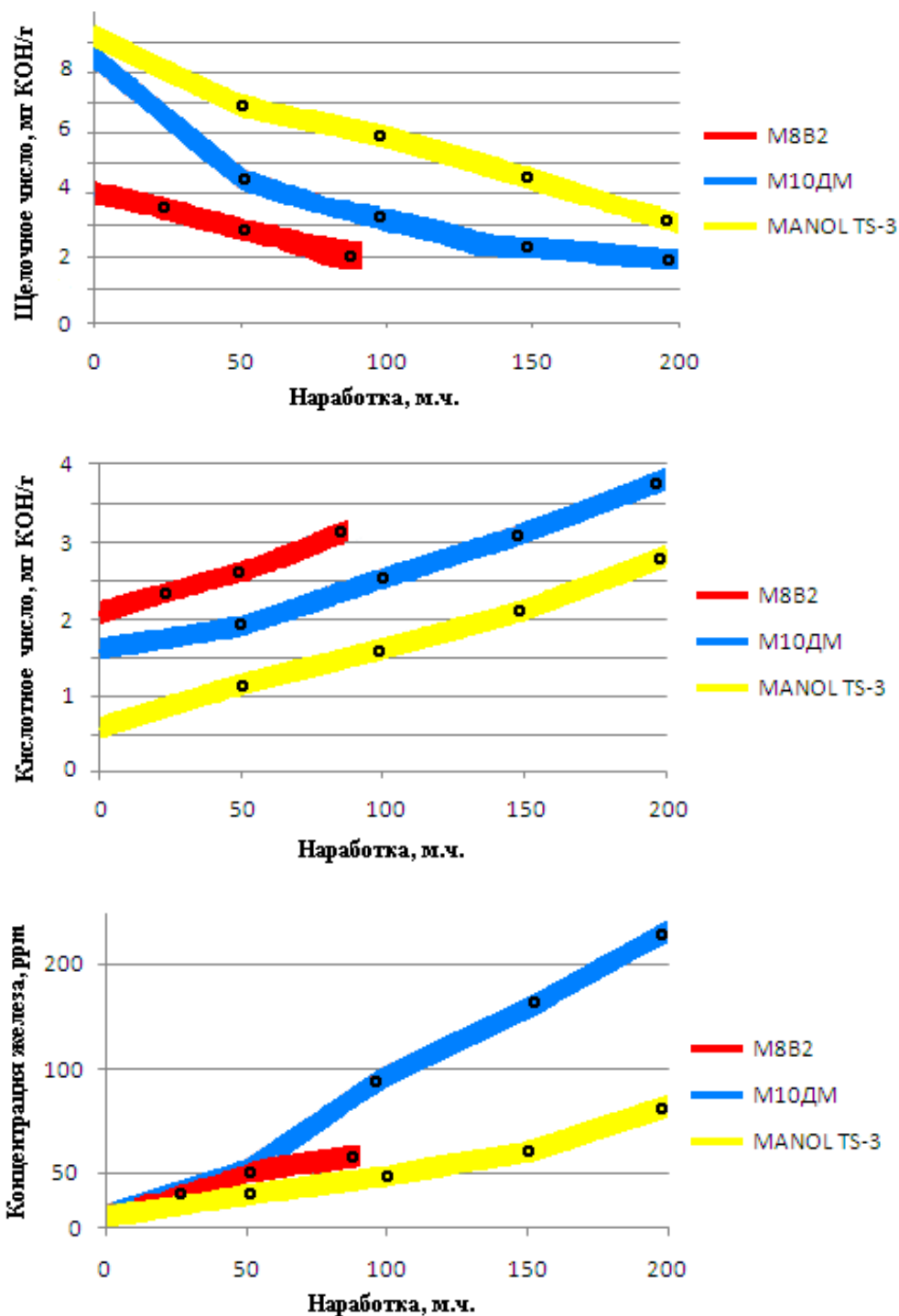


Рис. 3.13. Результаты исследования моторного масла в процессе эксплуатации

При обосновании срока службы масла с присадками не следует считать, что свойства масел ухудшаются в двигателе так же интенсивно, как срабатываются присадки. Поэтому необязательно заменять масло, как только кончается период срабатывания присадки и начинается стабилизация концентрации. Нужно учитывать двухстадийность процесса старения масла, эффект последствия присадки и освежающее влияние доливок. Очевидно, что периодичность замены масла следует установить для каждой машины индивидуально с учетом наработки с начала использования и условий эксплуатации, так как при этом можно уменьшить удельные затраты на текущий ремонт и убытки от простоя в техническом обслуживании и ремонтах.

3.4 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРЕДЕЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ МОТОРНЫХ МАСЕЛ ТОРФЯНЫХ МАШИН НА ОСНОВЕ ТРИБОДИАГНОСТИКИ

Альтернативой анализа масла по содержанию вредных примесей может стать триботехнический анализ, так как с помощью него можно определить основные характеристики смазки, которые отвечают за работоспособность узлов трения [163].

Триботехнические характеристики масел в исследовании сравнивались по интенсивности объёмного износа шаров и интенсивности линейного износа пальчиковых образцов, выполненных из свинцовистой бронзы (используется при производстве вкладышей коленчатого вала дизельных двигателей).

Испытания проводились на машине трения (рис.3.14, машина показана с трёх шариковым узлом трения). Машина трения имеет электродвигатель, ременную передачу, шпиндель с приводным валом, установленным в патрон, сферическую муфту, выполненную в опорном диске, узел трения, корпус с ёмкостью для масла, установленный на опорный подшипник и устройство для измерения момента трения. Нагрузка задавалась через приводной вал, упи-

рающийся в опорный диск с инденторами, на который воздействует система нагружения, состоящая из рычага с грузом.

Муфта для передачи нагрузки и крутящего момента представляет собой сферическую поверхность в нижней части приводного вала и опорного диска узла трения, соединённых между собой штифтом, проходящим через призматическое отверстие в приводном валу (рис. 3.15). В нижней части корпуса винтом закреплена тяга, связанная с тензобалкой, обеспечивающей измерение момента трения с высокой точностью (погрешность измерения тензобалки LPS-30 составляет 0,02%).

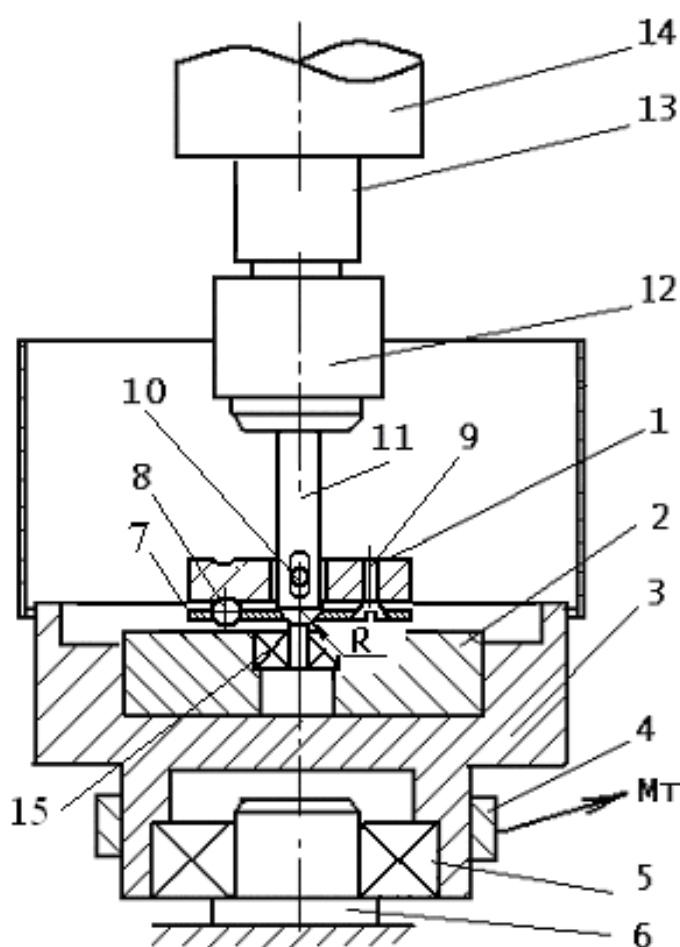


Рис. 3.14. Трёх шариковая машина трения

(1 – опорный диск, 2 – контр тело, 3 – корпус установки, 4 – крепление тензобалки, 5 – упорный подшипник установки, 6 – опора установки, 7 – прижимная пластина, 8 – шар, 9 – винт крепления прижимной пластины, 10 – штифт, 11 – приводной вал, 12 – патрон, 13 – шпиндель машины, 14 – выдвижная пиноль, 15 – центрирующий подшипник)

Для оценки триботехнических параметров рассматриваемых смазочных материалов, на данном этапе исследований, были проведены сравнительные испытания для принятых образцов. Испытания проходили в несколько циклов, во время которых измерялся момент сил трения и скорость изнашивания. Исследования осуществлялись в одинаковых условиях, что обеспечивало сопоставимость полученных результатов.

Перед испытаниями в ёмкость корпуса (рис. 3.16) заливают испытуемый смазочный материал в количестве 8 миллилитров, затем устанавливают узел трения на поверхность кольца и прикладывают нагрузку весовым способом через шпиндель машины трения.



Рис. 3.15. Муфта для передачи крутящего момента



Рис. 2.16. Вид сверху на трибоузел машины трения

После завершения подготовительных операций включался привод, и производились испытания в течение четырех часов на каждом из образцов масел. В процессе исследования периодически измерялся момент трения (десять измерений с усреднением через каждые 15 минут), по которому впоследствии рассчитывался коэффициент трения. После испытаний машину трения останавливали, узел трения расстыковывали и измеряли величину износа инденто-

ров. О противоизносных свойствах смазочных материалов можно судить по интенсивности объёмного износа образцов. Износ шаров определялся по пятну контакта на цифровом сканере с погрешностью не более 0,5%, с дальнейшим перерасчётом в объёмный износ.

Исследования проводились на моторных маслах М8В2, М10ДМ, MANOL TS-3, используемых для моторов торфяных машин.

На первом этапе исследования проводились 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 шероховатостью Ra 0,16 – 0,32 мкм. Нагрузка на шары составляла 60 Н, скорость скольжения 0,47 м/с.

Узел трения включал три шара, установленных в опорный диск, закрепленных прижимной крышкой посредством винтового соединения (рис. 3.17) и опорную поверхность (контр тело) выполненную в виде кольца, зафиксированного в корпусе посредством стопорного винта.



Рис. 3.17. Опорный диск с закреплёнными шарами

Для обеспечения минимального и равномерного износа контртела, шары, установленные в опорный диск, смещены относительно оси вращения шпинделя на 1 миллиметр, то есть, каждый шар движется по своей траектории, что обеспечивает наиболее оптимальные параметры трения в процессе исследования. Радиус траектории движения первого шара 15 миллиметров, второго 14

миллиметров, третьего 13 миллиметров, что учитывалось при определении параметров износа.

Перед следующим этапом испытаний шары, установленные в опорный диск, разворачиваются на небольшой угол, чтобы изношенная на предыдущем этапе исследования поверхность не находилась в зоне контакта трибоузла. Контртело извлекалось из корпуса установки и притиралось до установленной шероховатости. Масло из ёмкости удалялось, и все контактные поверхности протирались бензином марки «галоша».

Результаты исследования показали, что более качественное моторное масло имеет лучшие триботехнические свойства и сохраняет их в большем интервале эксплуатации.

На рисунке 3.18 показана фотография шарикового образца после испытаний на отработанном масле М10ДМ. На отдельных участках изношенной поверхности наблюдаются повреждения в виде рисок, характерных при возникновении задиров. Глубина повреждений на различных участках была в пределах от 5 до 10 мкм, измерялась на микроскопе МИС-11.



Рис. 3.18. Фотография изношенной поверхности шаров после испытаний на отработанном масле М10ДМ

На контртеле, также имеются характерные повреждения (рис. 3.19). Интенсивность изнашивания шариковых образцов изменялась аналогично коэффициенту трения, но её прирост несколько меньше, что объясняется увеличением площади контактной поверхности при износе и соответственно снижением давления.

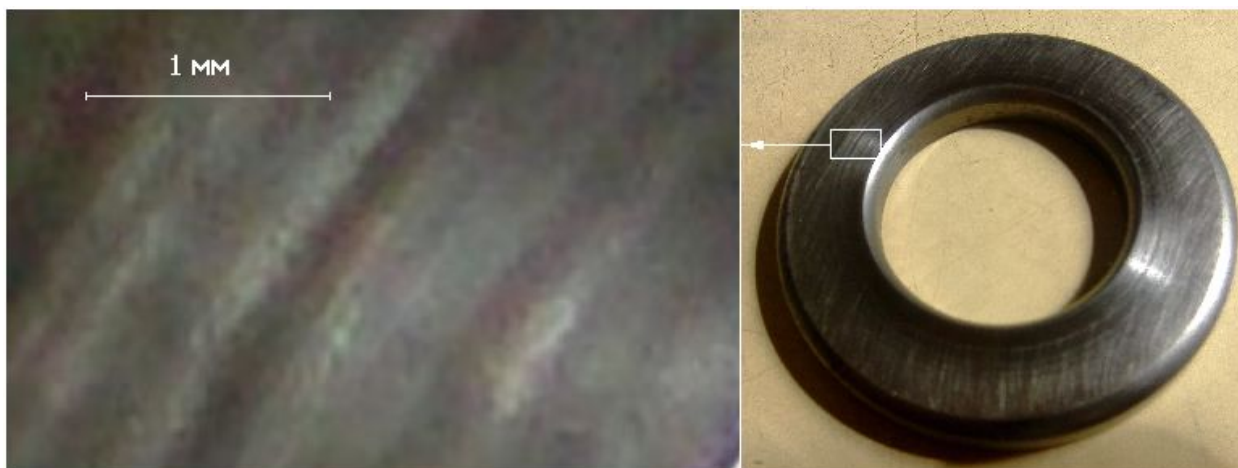


Рис. 3.19. Фотография изношенной поверхности кольцевого индентора после испытаний на отработанном масле М10ДМ

На первой стадии эксперимента, когда исследовались не работавшие масла, коэффициенты трения были: на MANNOL TS-3 – 0,022 с рассеянием 5%, на М10ДМ – 0,024 с рассеянием 5%, на М8В2 – 0,025 с рассеянием 5%.

При последующих исследованиях коэффициент трения на всех маслах рос пропорционально наработке смазочного материала (зависимость была практически линейная).

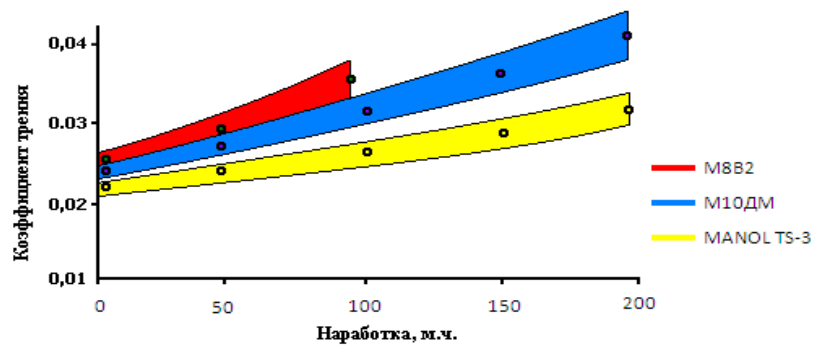
На отработанных маслах коэффициенты трения составили: на MANNOL TS-3 – 0,026 с рассеянием 7% (прирост 17%), на М10ДМ – 0,033 с рассеянием 10% (прирост 40%), на М8В2 – 0,031 с рассеянием 8% (прирост 25%).

При испытаниях на масле М10ДМ наблюдалось самое большое рассеяние коэффициента трения, что объясняется возникновением задирных эффектов (рис. 3.20).

Изначально интенсивность износа образцов на моторном масле MANNOL TS-3 меньше на 20% чем на маслах М10ДМ и М8В2. Причём в процессе эксплуатации масло MANNOL TS-3 лучше сохраняет свои свойства и к наработке

200 моточасов интенсивность износа образцов возрастает всего на 20%, а у масла М10ДМ с такой же наработкой интенсивность износа возрастает в 1,4 раза.

а)



б)

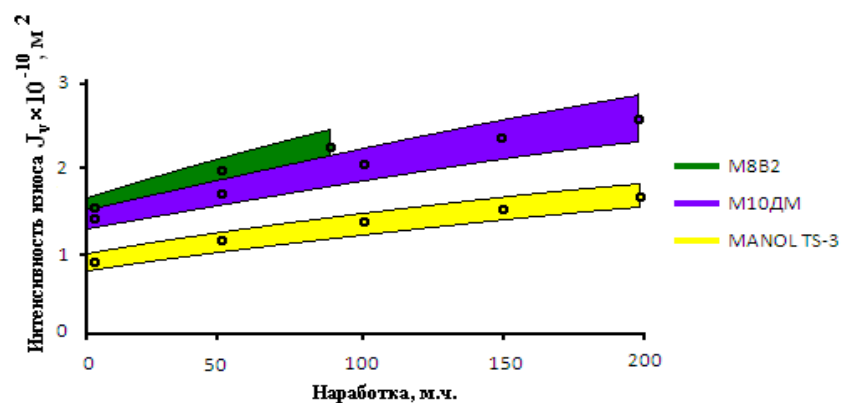


Рис. 3.20. Изменение коэффициента трения а) и интенсивности объёмного износа б) от наработки масла, полученных на трёх шариковой машине трения (условия трения – $V = 0,47$ м/с, $T \sim 300-310$ К)

На втором этапе исследований испытания проводились на пальчиковых образцах (рис. 3.21) в условиях граничной смазки [3. 8] по аналогичной методике.



Рис. 3.21. Опорный диск с пальчиковыми образцами

Отличался сам узел трения, пальчиковые образцы устанавливались на одном радиусе 15 мм, а контртело использовалось с такими же параметрами, как в предыдущем цикле исследований на шариковых образцах. После проведения испытаний на каждом из масел определялся линейный износ на отдельном пальчике с базированием по калиброванной сферической лунке на противоположной стороне оправки, с последующим усреднением. Величина линейного износа определялась с помощью цифрового измерителя линейных перемещений «Микрон – 02» тип АУРМ3445002 с точностью до 0.2 мкм.

Контактное давление на рабочих поверхностях поддерживалось 10 МПа, что соответствует среднему давлению на вкладыши кривошипно-шатунного механизма дизельных двигателей, скорость скольжения составляла 0,45 м/с, температура масла 300 – 320 К.

Результаты испытаний на пальчиковых образцах показаны на рисунке 3.22.

Масло MANOL TS-3 имеет значительно лучшие триботехнические показатели по сравнению с маслами М8В2 и М10ДМ. При испытаниях на новом масле MANOL TS-3 среднее значение коэффициента трения было 0.018 с рассеянием 8%. При испытаниях на новом масле М8В2 среднее значение коэффициента трения было 0.022 с рассеянием 10%. При испытаниях на новом масле М10ДМ среднее значение коэффициента трения было 0.021 с рассеянием 10%. Значение коэффициента трения полученное на MANOL TS-3 на 23% ниже, чем на М8В2 и на 16% чем на М10ДМ.

На отработанных маслах при испытаниях на пальчиковых образцах коэффициенты трения составили: на MANNOL TS-3 – 0,021 с рассеянием 15% (прирост 20%), на М10ДМ – 0,035 с рассеянием 20% (прирост 40%), на М8В2 – 0,028 с рассеянием 12% (прирост 22%). При испытаниях на отработанном масле М10ДМ наблюдалось самое большое рассеяние коэффициента трения, что объясняется возникновением задирных эффектов.

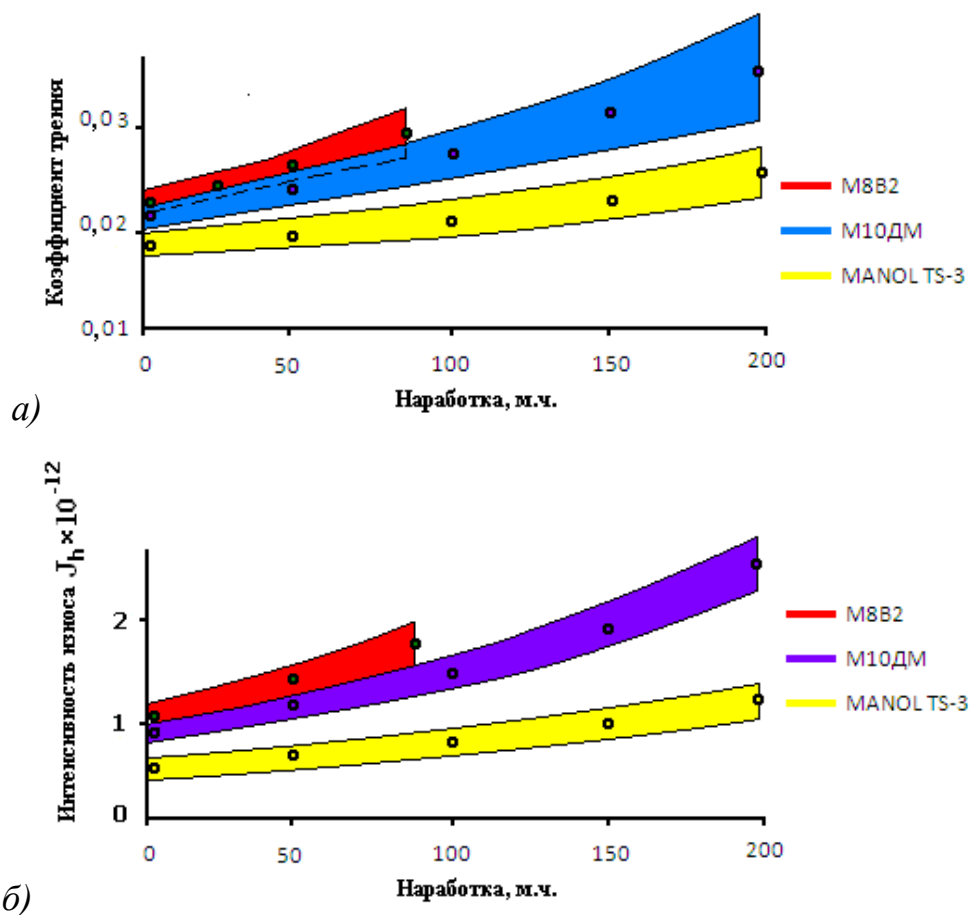


Рис. 3.22. Изменение коэффициента трения а) и интенсивности линейного б) износа от наработки масла, полученное на пальчиковых образцах (условия трения – $q = 10$ МПа, $V = 0,45$ м/с, $T \sim 300-310$ К)

На рисунке 3.23 показана фотография пальчикового образца после испытаний на отработанном масле M10DM. На отдельных участках изношенной поверхности пальчика наблюдаются повреждения в виде рисок, характерных при возникновении задиров.

Исследования масел на машине трения показали, что состояние смазочных материалов можно оценивать с помощью триботехнических испытаний. Причём оценить качество масла можно достаточно быстро, без многочасовых испытаний, на основе измерения коэффициента трения. Если в процессе триботехнических исследований коэффициент трения имеет большое рассеяние (более 20%), то это значит, что действие присадок недостаточное и масло надо менять или дополнительно модифицировать присадками.

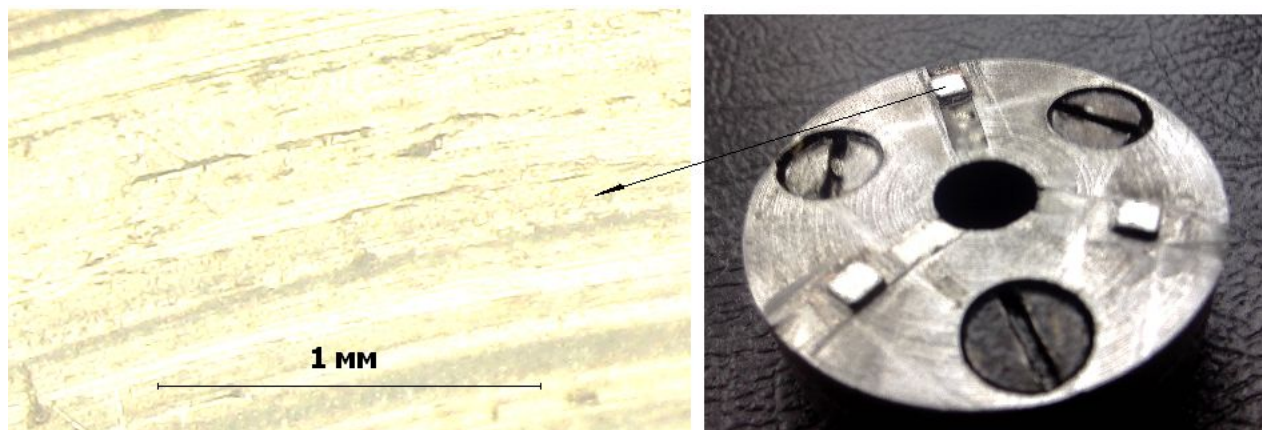


Рис. 3.23. Поверхность пальчикового образца после испытаний
испытаний на отработанном масле М10ДМ

В то же время если присадки ещё активны, то даже при наличии металлических частиц в масле они покрываются адгезионными плёнками и при размере до 5 мкм существенно не влияют на трение. После окисления присадок (щелочное число менее 2 мгКОН/г) адгезионные пленки нарушаются и железные частицы проявляют абразивный эффект при граничном трении. При недостатке адгезионных плёнок на рабочих поверхностях трибосопряжений происходит металлический контакт трущихся поверхностей, приводящий к схватыванию материала подшипника с контртелом, и возникает задир, который приводит к нестабильному коэффициенту трения. Данный эффект легко обнаруживается, следовательно, его можно использовать для диагностики состояния масла.

Стоимость использованного в исследованиях оборудования достаточно высока, и создавать лабораторию с таким оснащением на каждом торфопредприятии экономически не целесообразно. Если отправлять пробы масла для анализа в специализированные лаборатории, то усложняется учёт исследуемых материалов и анализ результатов запаздывает, что может существенно снизить эффективность системы диагностирования смазочных материалов. Поэтому, опираясь на результаты нашего исследования, можно выделить несколько наиболее значимых параметров диагностирования, приобрести установки для их контроля и оперативно проводить исследование проб масла не-

посредственно на торфопредприятии. Например, для контроля кислотного, щелочного числа, вязкости и содержания механических примесей можно использовать портативные экспресс лаборатории (ECON или DIGI), которые позволяют оперативно измерять наиболее значимые характеристики всех типов смазочных материалов. Лаборатории мобильны, надежны, просты и удобны в эксплуатации и не требуют специальной подготовки персонала. Стоимость таких лабораторий и расходных материалов для анализов невысокая, что существенно повышает эффективность диагностической системы. Так же для комплексной диагностики масел можно использовать машину трения с образцами из соответствующих материалов, которые могут использоваться неоднократно, в этом случае стоимость диагностики будет относительно невысокой.

Использование смазочных материалов с определёнными свойствами в конкретных условиях эксплуатации должно контролироваться средствами объективной диагностики, что позволяет определять его состояние и производить замену не по наработке, а в зависимости от перспективы достижения предельного состояния (в том числе с использованием модификаторов) и потребностей технологической системы добычи торфа.

Предложенные методы тестирования (вибродиагностика, анализ смазочных материалов) позволяют быстро проводить диагностику без эвакуации машин с торфяной залежи, что существенно снижает потери на определение текущего состояния ТМ и позволяет с высокой точностью определять остаточный ресурс основных трибоэлементов технологических машин.

При использовании системы диагностирования, на основе которой можно с достаточной точностью установить время достижения предельного состояния какого-либо элемента, отпадает необходимость использования статистических вероятностей отказов при анализе параметров эксплуатации. В место них нужно использовать вероятность совпадения ремонта $P(Z)$ с одним из шести дней цикла обслуживания, тогда вероятность совпадения ТО, ремонтов и метеонеблагоприятных дней будет:

$$P(H) = P(B) \times P(Z) \times P(A). \quad (3.13)$$

Так как вероятность $P(Z)$ много больше вероятности $P(C)+P(D)+P(E)$, следовательно проведение диагностики значительно снижает вероятность не прогнозируемых отказов и позволяет проводить ремонты в заранее установленные дни с учётом различных факторов эксплуатации.

На модели технического состояния были проведены исследования зависимости коэффициента готовности торфяной машины от количества диагностируемых трибоэлементов. Для определения коэффициента готовности с учётом диагностики трибоэлементов необходимо ввести значения диагностируемых параметров в соответствующий блок системы анализа технического состояния (см. рис. 2.17).

Для выявления зависимости коэффициента готовности от количества диагностируемых трибоэлементов уборочной машины МТФ-43А имитировалась диагностика предохранительных муфт (2 % от общего числа трибоэлементов), крестовины карданных валов (6 % от общего числа трибоэлементов), и так далее. На каждом этапе проводился анализ коэффициента готовности с учётом влияния различных значений выработанного ресурса. Определялось количество часов работы машины за выбранный интервал времени и часов восстановления работоспособности при возникновении отказов.

С помощью диагностики можно с достаточной точностью определять момент достижения предельного состояния трибоэлементов, и заблаговременно проводить ремонт, совмещая его с плановым обслуживанием или метеонеблагоприятными днями. По результатам анализа на модели получены зависимости коэффициента готовности от количества диагностируемых трибоэлементов с учётом выработанного ресурса (рис.3.24).

Исследования показали, что для уборочных машин МТФ-43А с выработанным ресурсом менее 20% значение коэффициента готовности существенно не меняется с ростом количества диагностируемых трибоэлементов (рис. 3.25). Для машин выработавших ресурс более чем на 80%, коэффициент готовности можно увеличить на 15 - 20% за счёт диагностики. Так же исследо-

вания показали, что увеличение количества диагностируемых трибоэлементов влияет по-разному на коэффициент готовности машин, выработавших разный ресурс. С увеличением более чем на 20% диагностируемых трибоэлементов интенсивность роста коэффициента готовности снижается. Это показывает, что для машин с различным состоянием объём диагностирования должен определяться индивидуально.

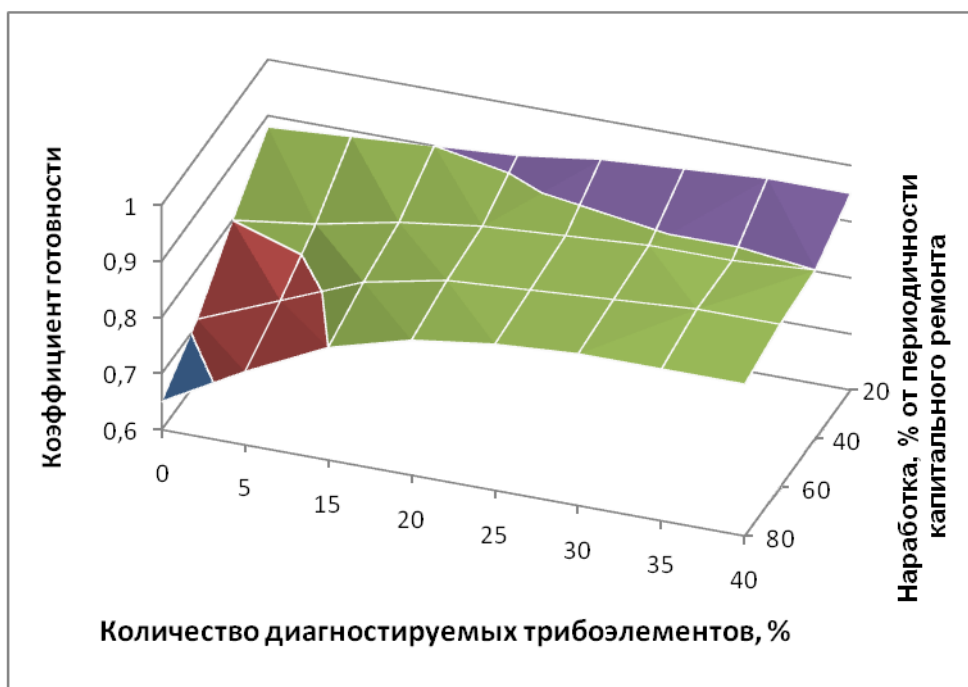


Рис. 3.24. Изменение коэффициента готовности от наработки и количества диагностируемых трибоэлементов

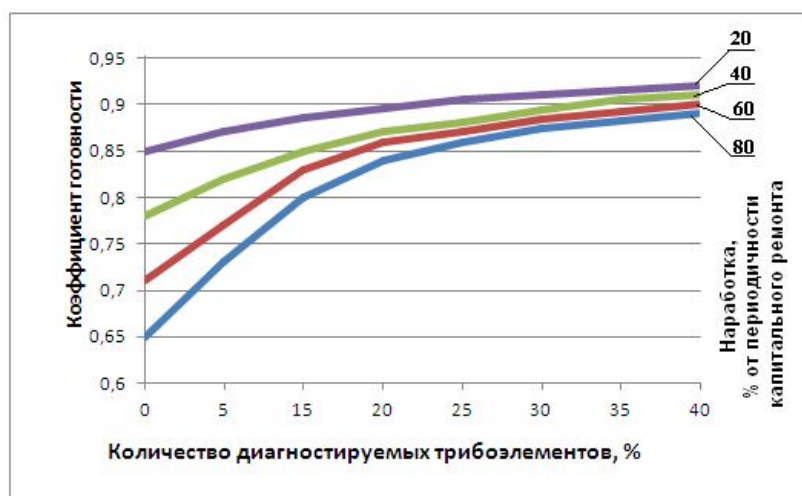


Рис. 3.25. Изменение коэффициента готовности от наработки и количества диагностируемых трибоэлементов (в координатах коэффициент готовности - количество диагностируемых трибоэлементов)

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

ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ

1. Проведённые исследования позволили установить ряд диагностических параметров, которые позволяют оценивать техническое состояние торфяных машин.
2. Для прогнозирования остаточного ресурса по результатам диагностики предлагается использовать степенную зависимость.
3. Предлагается коэффициент K_{ik} , определяющий интенсивность изменения диагностируемого параметра. 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.
4. Для контроля фрезерующих устройств использовалась вибродиагностика, которая позволяет на основе изменения общего уровня виброакустического сигнала определять предельное состояние подшипниковых опор, а при разделении сигнала на гармоники устанавливать основные факторы, влияющие на техническое состояние устройства.
5. Установлены диагностические параметры для контроля моторных масел торфяных машин. Состояние моторных масел можно контролировать по содержанию железа и щелочному или кислотному числу.
6. Альтернативой оценки состояния смазки по указанным параметрам является триботехнический анализ, определение коэффициента трения позволяет прогнозировать изменение свойств моторных масел и установить время достижения предельного состояния смазки и проводить техническое обслуживание в заранее установленное время.

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

4 МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ ЗА СЧЁТ МОДИФИКАЦИИ ТРИБОУЗЛОВ

4.1 АНАЛИЗ ТРИБОУЗЛОВ ТОРФЯНЫХ МАШИН

Основной задачей исследования является определение наиболее значимых параметров трибоузлов (влияющих на эксплуатационные свойства ТМ) и разработка методов воздействия на них для обеспечения эффективных условий использования в сезон добычи торфа.

Анализ структурной модели, на самом нижнем уровне которой находятся трибосопряжения, позволяет выявить для них ряд свойств отвечающих за условия эксплуатации и обслуживания. Эти свойства позволяют оценить качество сопряжения с точки зрения их триботехнических параметров и перспектив их улучшения, что обеспечивает выявление узлов имеющих ограниченный ресурс или трудоёмкое обслуживание вследствие конструкционных недостатков, а также позволяет планировать процесс восстановления работоспособности сопряжений с целью повышения эффективности эксплуатации.

В таблице 4.1 представлен фрагмент структурной модели комплексного агрегата отражающий основные свойства несущей подсистемы с точки зрения триботехники и обслуживания сопряжений.

Единица на пересечении i -той строки и φ -того столбца показывает, что соответствующее i -тое сопряжение обладает φ -тым свойством, в противном случае ставится 0.

Набор свойств описанных в виде булева вектора позволяет для каждого сопряжения определить его принадлежность к той или иной группе структурных элементов, что обеспечивает комплексный подход в решении задачи управления ресурсом узлов ТМ.

Анализ свойств несущей подсистемы и представленных структурных элементов показал, что один из них имеет периодичность 60 моточасов. Следовательно, для оптимизации всей подсистемы выгодно воздействовать на

этот элемент с целью увеличения его цикла обслуживания, т.е. выявить его основные триботехнические свойства и предложить способ решения поставленной задачи (синтезировать трибоузел с соответствующими свойствами).

Таблица 4.1

Основные свойства сопряжений несущей подсистемы

Сопряжения	Обозначение элемента	Сопряжение подвижное	Сопряжение скользящее	Сопряжение качения	Сопряжение антифрикционное	Сопряжение фрикционное	Сопряжение неподвижное	Сопряжение с зазором	Сопряжение с натягом	Сопряжение регулируемое	Сопряжение перемещаемое	Сопряжение закрытое	Сопряжение открытое	Сопряжение без смазки	Сопряжение с консистивной смазкой	Сопряжение с жидкой смазкой	Периодичность ТО-1, 60 мото.час	Периодичность ТО-2, 240 мото.час	Периодичность ТО-3, 960 мото.час	Периодичность ГР, 1920 мото.час	Периодичность КР, 3840 мото.час	Общий ресурс, мото.час
	A																					
	A1																					8000
Рама и опорная ось	A11	0	0	0	0	0	1	1	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	1	8000
	A2																					3840
	A21																					3840
Корпус каретки и втулка	A211	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	1	0	1920
Втулка и опорная ось	A212	1	1	0	1	0	0	1	0	0	1	1	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1920
Корпус каретки и ось колеса	A213	0	0	0	0	0	1	1	0	0	1	0	1	1	0	0	0	1	0	0	0	3840
	A22																					3840
Колесо опорное и подшипник	A221	0	0	0	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	3840
Подшипник и ось опорного колеса	A222	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	3840
Подшипник качения опорного колеса	A223	1	0	1	1	0	0	1	0	1	0	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0	1920
Уплотнение подшипника опорного колеса	A224	1	1	0	1	0	0	1	0	0	1	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	1920
	A23																					3840
Поддерживающее колесо и подшипник	A231	0	0	0	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	3840
Подшипник и ось поддерживающего колеса	A232	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	3840
Подшипник поддерживающего колеса	A233	1	0	1	1	0	0	1	0	1	0	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0	1920
Уплотнение подшипника подерж. колеса	A234	1	1	0	1	0	0	1	0	0	1	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	1920
	A24																					3840
Колесо натяжное и подшипник	A241	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	3840
Подшипник и ось натяжного колеса	A242	0	0	0	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	3840
Ось натяжного колеса и натяжителя	A243	0	0	0	0	0	1	1	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	1	0	1920
Натяжитель и рама	A244	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0	0	1	1	0	0	0	1	0	0	0	1920
Подшипник натяжного колеса	A245	1	0	1	1	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	0	1920
Уплотнение подшипника натяжного колеса	A246	1	1	0	1	0	0	1	0	0	1	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	1920
	A25																					1920
Звёздочка ведущая и ступица	A251	0	0	0	0	0	1	1	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	1	0	1920
Звёздочка ведущая и гусеница	A252	1	1	0	1	0	0	1	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	1	0	1920

Возможным способом увеличения цикла обслуживания является использование в качестве материала для втулки опорной каретки (балансира) самосмазывающегося полимера – граффито наполненного капролона. Физико-механические свойства капролона (полиамид-6 блочный) позволяют использовать его вместо цветных металлов и сплавов (меди, бронзы, баббита). Для повышения антифрикционных свойств полимера капролон насыщают графитом (около 2% по массе). Граффитонаполненный капролон сохраняет практически все свойства обычного капролона, но имеет значительно меньший коэффициент трения, который при трении по стали может составлять около 0,15. Особенно хорошо зарекомендовал себя граффитонаполненный капролон при высоких нагрузках. Использование такого материала, не требующего обслу-

живания, обеспечивает сокращение трудоёмкости ТО, и повышает надёжность трибоузла, а при изменении периода обслуживания только одного структурного элемента A_{212} (сопряжение втулки опорной каретки с осью) до 960 моточасов, экономия времени обслуживания по результатам анализа с использованием имитационной модели составляет около 8 чел.ч. за сезон.

Анализ структурной модели позволил выявить узлы, имеющие сходные триботехнические параметры (таб. 4.2).

Таблица 4.2.

Трибоузлы с консистентной смазкой

Сопряжения	Обозначение элемента	Сопряжение подвижное	Сопряжение скольжения	Сопряжение качения	Сопряжение антифрикционное	Сопряжение фрикционное	Сопряжение неподвижное	Сопряжение с зазором	Сопряжение с натягом	Сопряжение регулируемое	Сопряжение перемещаемое	Сопряжение закрытое	Сопряжение открытое	Сопряжение без смазки	Сопряжение с консистентной смазкой	Сопряжение с жидкой смазкой	Периодичность ТО-1, 60 мото.час	Периодичность ТО-2, 240 мото.час	Периодичность ТО-3, 960 мото.час	Периодичность ТР, 1920 мото.час	Периодичность КР, 3840 мото.час	Общий ресурс, мото.час	Трудоёмкость ТО, чел./час
Втулка и опорная ось	A212	1	1	0	1	0	0	1	0	0	1	1	0	0	1	0	1	1	1	1	1	1920	0,3
Втулка и палец	D311	1	1	0	1	0	0	1	0	0	1	0	1	0	1	0	1	1	1	1	1	3840	0,2
Втулка рамы главной и палец рамы сопел	D511	1	1	0	1	0	0	1	0	0	1	0	1	0	1	0	1	1	1	1	1	3840	0,2
Втулка и палец	E22	1	1	0	1	0	0	1	0	0	1	0	1	0	1	0	1	1	1	1	1	3840	0,2
Толкатель и втулка	E41	1	1	0	1	0	0	1	0	0	1	0	1	0	1	0	1	1	1	1	1	3840	0,2

Наиболее нагруженным из узлов, представленных в таблице 4.2, является узел A212 – сопряжение втулки и оси опорной каретки (балансира) рамы несущей. Диаметр опорной оси 50 мм, выполнена из стали 40X с твёрдостью поверхности 50 по шкале HRC, шероховатостью Ra 0,16-0,32 мкм. Типовая втулка выполнена из бронзы БрО-10Ц2. Сопряжение требует периодического обслуживания из-за срабатывания смазки на контактных поверхностях (периодичность обслуживания 60 моточасов). Давление на рабочей поверхности сопряжения 3,3-3,8 МПа. Для оптимизации сопряжения A212 необходимо провести исследования его триботехнических характеристик и предложить пути совершенствования узла.

Выявляя наиболее значимые свойства сопряжений, на основе разработанной структурной модели и синтезируя трибосопряжения с требуемыми пара-

метрами, можно управлять изменением технического состояния узлов и машины в целом, что позволяет оптимизировать эксплуатацию и повысить экономическую эффективность всей технологической системы.

4.2 ПОВЫШЕНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ТРИБОУЗЛОВ ТОРФЯНЫХ МАШИН С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АНТИФРИКЦИОННОГО ПОЛИМЕРНОГО МАТЕРИАЛА

Исследование триботехнических характеристик узлов трения способствует выявлению основных недостатков сопряжения на этапе проектирования, что позволяет оптимизировать подшипники к условиям эксплуатации.

Натурные испытания могли бы дать исчерпывающие данные для сравнения работоспособности деталей из различных материалов, но такие испытания достаточно продолжительные по времени, дорогие по стоимости и, следовательно, не всегда целесообразны и могут сочетаться с лабораторными методами изучения сравнительного износа контрольных образцов в условиях интенсификации нагрузок [36, 138]. Для этих целей широко используются специальные лабораторные установки, моделирующие условия близкие к реальным [23, 75].

При рассмотрении элемента А212 – сопряжение втулки и оси опорной каретки рамы несущей известны условия трения: движение возвратно-вращательное с небольшой амплитудой (до 10 мм) и малыми скоростями (до 0,01 м/с.), давление в трибопаре 3,3-3,8 МПа.

Исходя из этих данных, было разработано лабораторное устройство для испытаний антифрикционных материалов [71].

В настоящее время используются различные схемы узлов трения для триботехнических испытаний. Наиболее удобная для моделирования, представленного трибоэлемента, является схема узла трения, в которой пальчиковые образцы трутся по плоской поверхности индентора. Так как диаметр образцов можно принять небольшой, то для создания необходимого давления не требу-

ется высокая нагрузка, что существенно упрощает конструкцию устройства для исследований.

В пальчиковых машинах трения применяются различные виды движения: вращательное одностороннее, обратное поступательное, обратное вращательное и другие. Наиболее близкое к реальным условиям эксплуатации, рассматриваемого сопряжения является возвратно-вращательное движение, которое может быть реализовано с помощью кривошипно-шатунного механизма, приводимого в движение от асинхронного электродвигателя с червячным редуктором. Асинхронный электродвигатель обеспечивает достаточно устойчивую скорость вращения при изменяющейся нагрузке, а червячный редуктор позволяет получить требуемое передаточное отношение за счёт относительно несложного устройства.

Скорость движения, в этом случае, наиболее рационально регулировать за счёт изменения расстояния от оси вращения выходного вала редуктора до точки крепления шатуна (при изготовлении кривошипа необходимо предусмотреть выполнение нескольких отверстий для крепления оси шатуна на различном расстоянии от оси вращения).

В качестве индентора нужно использовать диск из стали 40Х с рабочей поверхностью, имеющей шероховатость $Ra\ 0,16 - 0,32\ \mu m$, твёрдостью 50 единиц по шкале HRC, что соответствует параметрам опорной оси.

Индентор может быть установлен на подшипник качения и закреплён к неподвижному основанию через тензобалку, что позволит измерять момент трения. Если пальчиковые образцы будут прижиматься к индентору с одной стороны, то подшипник качения будет воспринимать всю нагрузку, что может привести к существенной ошибке. Поэтому в предлагаемом устройстве для испытаний пальчиковые образцы устанавливаются с двух сторон от индентора, компенсируя осевое усилие, друг друга. Суппорт 1 (рис.4.1) для пальчиковых образцов 2 может изготавливаться непосредственно из одного массива с тензобалкой (закалённые пластины с наклеенными тензодатчиками), что позволит упростить конструкцию узла для измерения момента трения.

Нагрузка на образцы может задаваться через рычаги 3 с помощью грузов (на рисунке не показаны). Привод движения индентора 4 может осуществляться шатуном 5, соединённым с кривошипом 6. Кривошип может быть установлен на выходном валу червячного редуктора 7, который приводится в движение электродвигателем 8. Привод нагружения, установленный непосредственно на суппорте, позволяет получать стабильную силу прижатия пальчиковых образцов к индентору, независимо от их перемещения в вертикальной плоскости из-за прогиба тензобалки.

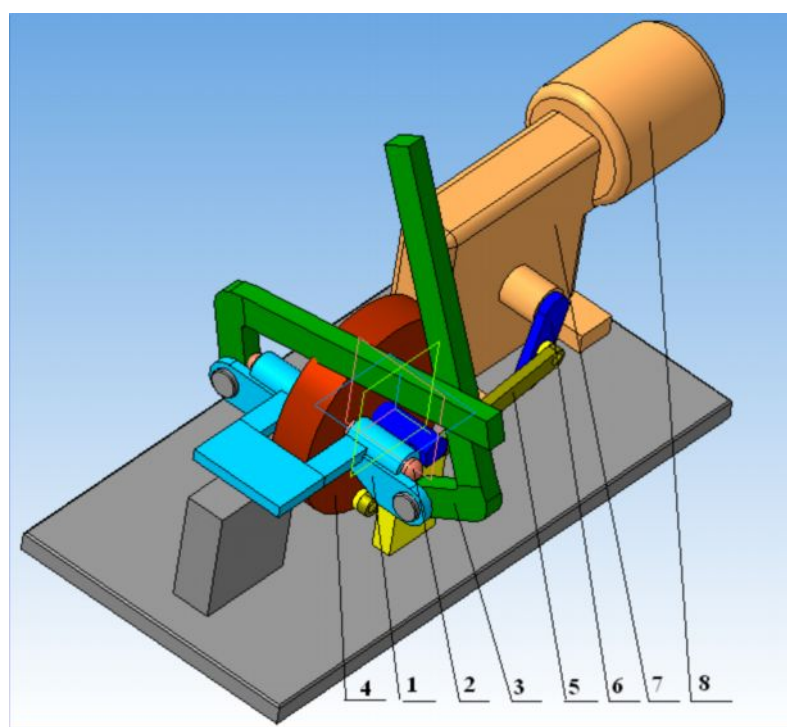


Рис. 4.1. Схема устройства для испытаний с нагрузочными рычагами, установленными непосредственно на суппорт

После проведения кинематического анализа предлагаемого устройства оказалось, что собственные колебания системы для измерения момента трения и нагружения могут оказывать значительное влияние на точность получаемых результатов. Масса деталей, установленных на тензобалку велика, а частота собственных колебаний системы может привести к резонансным явлениям, что не позволит получать достоверные результаты измерения коэффициента трения.

Устранить указанный недостаток можно с помощью полиспастной системы нагружения (рис.4.2).

Вместо тяг на вершинах нажимных рычагов можно установить шкивы 1, через которые пропускается тяговый трос, на который подвешивается груз. При износе пальчиковых образцов груз на тросе будет опускаться вниз, существенно не изменяя силы нагружения, что обеспечит более стабильные результаты измерений.

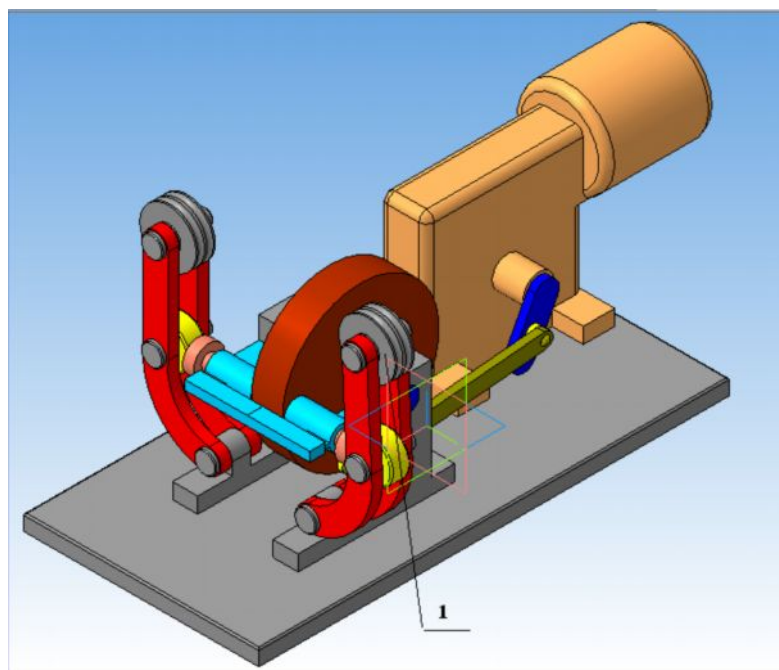


Рис. 4.2. Устройство для исследования коэффициента трения с полиспастной системой нагружения

Для измерения момента трения лучше использовать стандартные полупроводниковые тензобалки, у которых имеются два тензодатчика подключенных по мостовой схеме. Тензодатчики помещены в нагруженной и ненагруженной частях балки, а измеряемый потенциал зависит от изменения относительного сопротивления датчиков. Таким образом, изменение температуры не приведёт к существенным изменениям показаний устройства.

Исходя из представленных рассуждений, в качестве основного измерительного элемента использовалась тензобалка LPS-30 (рис.4.3). Тензобалка LPS-30 имеет рабочий коэффициент передачи 2 мВ/В , входное/выходное со-

противление 410/350 Ом, погрешность измерения 0,02% в интервале температур от +30 до -30⁰С. Балка имеет сертификаты соответствия OIML C3, NTER III 5000 S. Кроме того, конструкция балки имеет высокую жёсткость, и даже при изменении точки приложения силы на 20 мм не возникают дополнительные погрешности, а величина максимального вертикального смещения не превышает 0,1 мм. После выбора принципиальной схемы устройства была проведена детальная проработка и изготовление устройства для испытаний антифрикционных материалов.



Рис. 4.3. Тензобалка LPS-30

Устройство для испытаний триботехнических материалов представляет собой основание 7 с индентором 6 в виде кольца, по которому трётся пальчиковый образец, установленные на тензобалку 16 (схема трения плоскость – торец пальчика, движение возвратно-вращательное) (рис 4.4).

Привод индентора осуществляется через кривошипно-шатунный механизм от электродвигателя 9 с редуктором 8. Нагрузка на образцы задаётся нажимными рычагами 2 от полиспастного механизма 5 грузом (на рисунке не показан). С помощью тензобалки измеряется сила трения между индентором и образцом, по ней рассчитывается коэффициент трения для испытуемого материала. Величина износа образцов определяется по изменению расстояния между нажимными подшипниками 4.

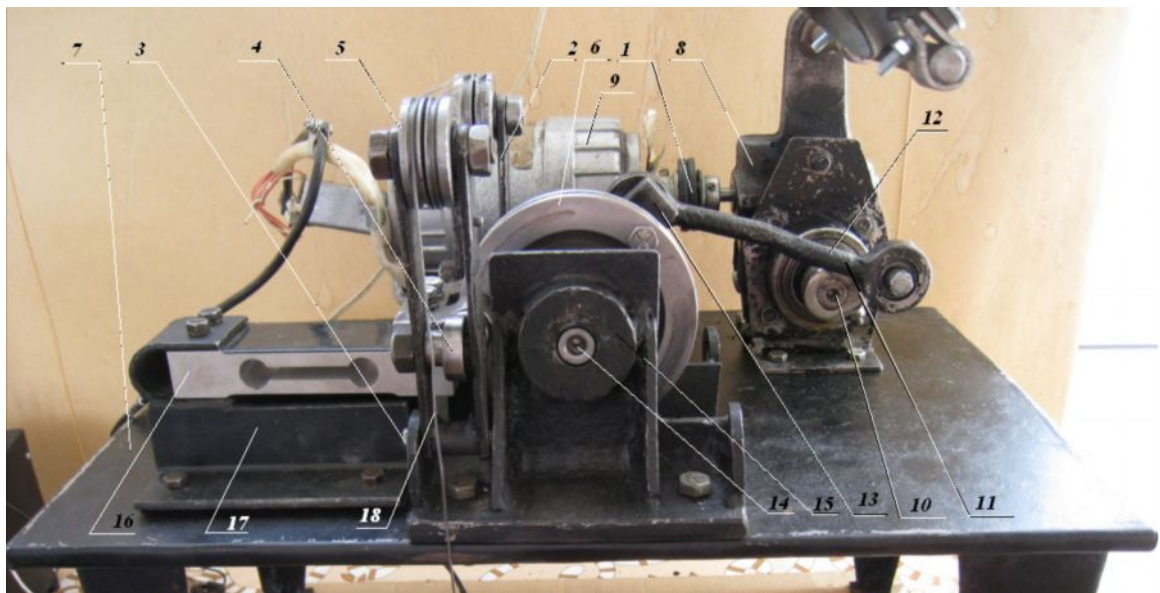


Рис.4.4. Общий вид установки для испытания антифрикционных материалов:

1 – муфта; 2 – нажимной рычаг; 3 – ось; 4 – нажимной подшипник; 5 – полиспастный механизм; 6 – контр тело; 7 – основание; 8 – редуктор; 9 – электродвигатель; 10 – выходной вал редуктора; 11 – кривошип; 12 – шатун; 13 – рычаг; 14 – вал привода; 15 – кронштейн; 16 – тензобалка; 17 – основание тензобалки; 18 – трос

Перед началом испытаний необходимо установить исследуемые образцы 8 в направляющую оправку 7 и затем в отверстия суппорта 9, предварительно смазав их консистентной смазкой (рис.4.5).

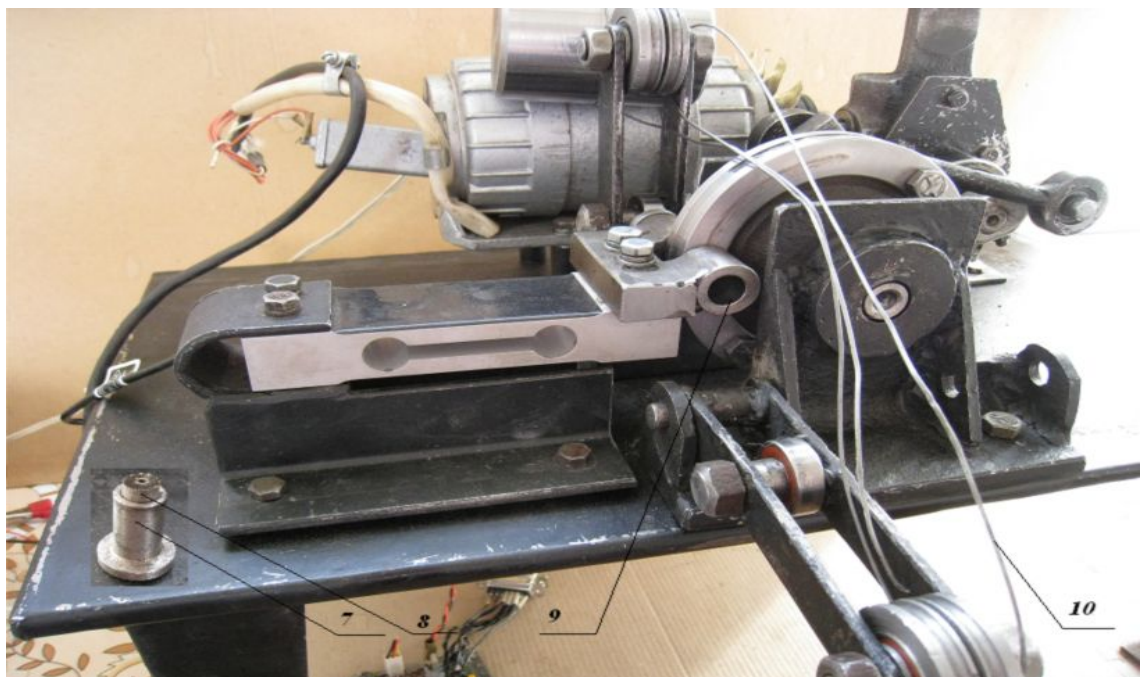


Рис. 4.5. Схема установки образцов для испытаний

Далее подвести нажимные рычаги до упора подшипниками в торцы направляющих втулок образцов, протянуть через ручки шкивов трос *10* и подвесить на него груз, установленного веса.

После выполнения указанных операций необходимо подсоединить разъём *1* проводов от тензобалки к разъёму аналого-цифрового блока *2*, а также к разъёму компьютера *3*, включить блок питания *4* аналого-цифрового блока, запустить управляющую программу на компьютере (рис. 4.6).

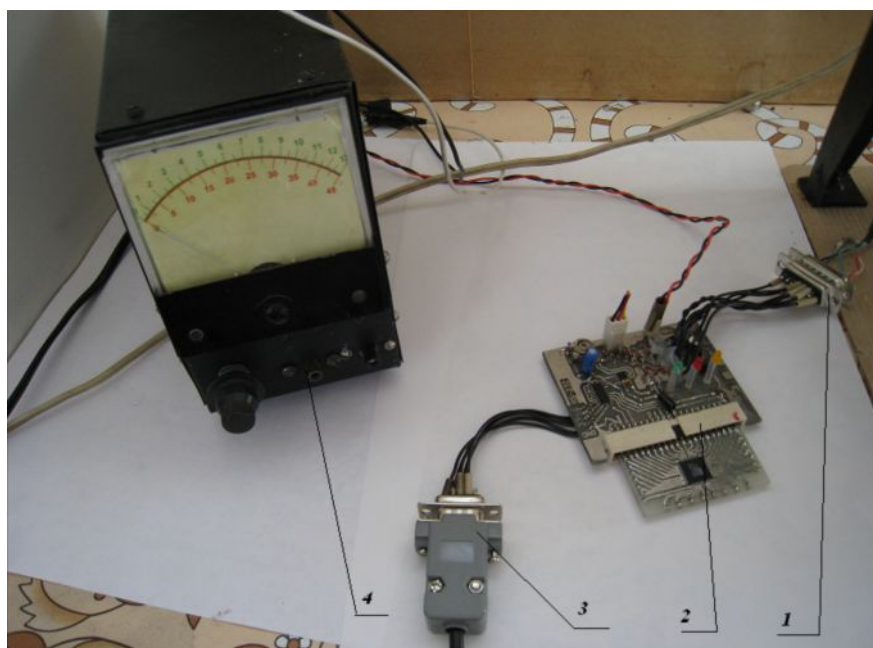


Рис. 4.6. Схема подключения измерительного устройства

До момента запуска установки, провести калибровку измерительной системы нажатием с помощью мышки на кнопку *1* «Калибровка», отображённой в диалоговом окне программы (рис. 4.7).

Если коммутация датчика с блоком и компьютером нормальная, то в левой верхней ячейке *2* окна высвечивается надпись «Устройство на линии», если надписи нет, то необходимо проверить наличие питания и коммутацию элементов измерительной системы. Затем включается привод устройства на 5 – 7 минут, для притирки образцов.

После остановки привода измерялось расстояние снаружи нажимных подшипников с помощью микрометра с пределами измерений от 125 до 150

мм, и результат записывался в бланк. Измерения необходимо проводить всегда в одном и том же положении кольцевых инденторов относительно пальчиковых образцов после полного остывания узла трения в течение часа.

Для проведения испытаний включался привод устройства, проверялись показания измерительной системы и устройства записи. Текущее значение усилия на тензобалку отображалось в ячейке 3 диалогового окна программы и изображалось в виде функции 4 в координатах время – усилие (см. рис. 4.9). Значения усилия, полученные в процессе измерений, сохраняется в памяти в виде массива чисел и в виде графиков изменения усилия на тензобалке за половину цикла движения.

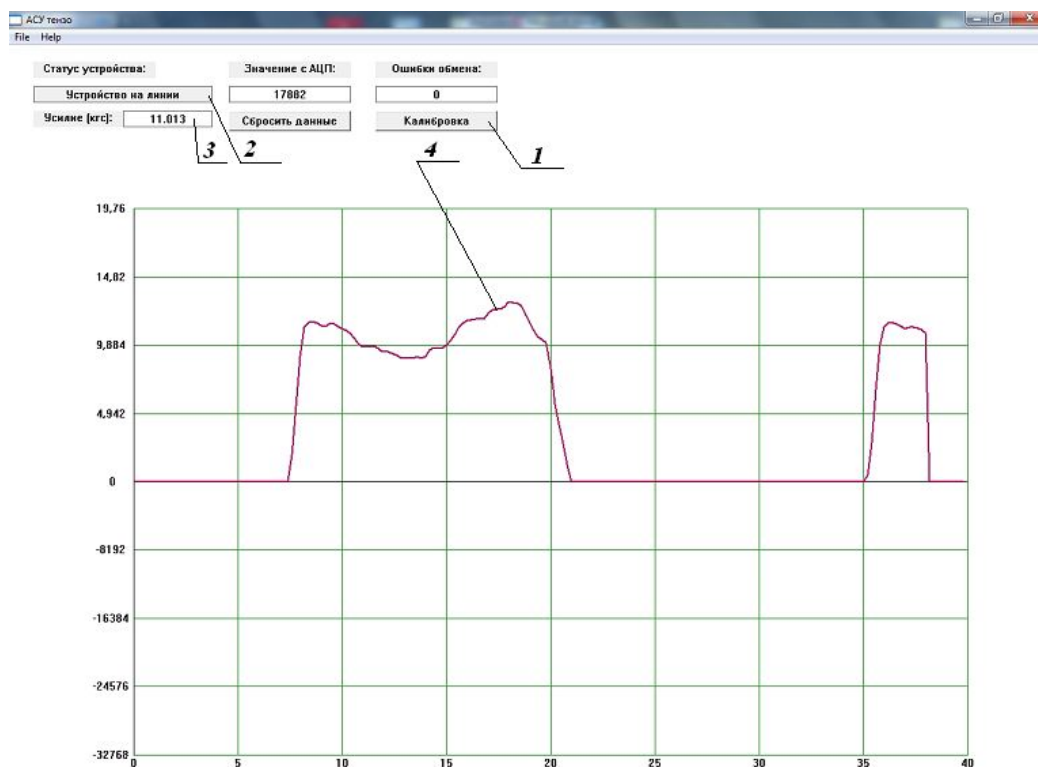


Рис. 4.7. Диалоговое окно программы управления измерениями

Исследования проводились в течение 50 часов, с промежуточным контролем работы устройства через 2 часа. После проведения испытаний вторично измерялось расстояние снаружи нажимных подшипников. Разница между предыдущими и измеренными значениями делилась пополам, и определялась величина износа пальчиковых образцов.

По записанным данным от измерительной системы рассчитывались:

- максимальный коэффициент трения, полученный за время испытаний,
- минимальный коэффициент трения,
- среднее значение коэффициента трения,
- динамика изменения коэффициента трения в течение одного цикла поворота кольцевых инденторов,
- динамика изменения коэффициента трения в течение всего испытания.

Затем проводились аналогичные исследования на образцах исследуемых материалов, и делался общий анализ испытаний.

На первом этапе исследований проводились испытания на пальчиковых образцах из бронзы БрО-10Ц2, из которой изготавливается втулка опорной оси рамы несущей. Пальчиковые образцы устанавливались на устройство для испытаний антифрикционных материалов (см. рис. 4.6), и проводились исследования в условиях, соответствующих условиям эксплуатации комплексного агрегата (давление 3,5 МПа, скорость скольжения до 0,01 м/с, узел смазывался консистентной смазкой Солидол С, ГОСТ 4366-76). Для размещения смазки использовалась маслёнка в виде коробчатого корпуса с наклоненными стенками под углом 45^0 к поверхности кольцевого индентора. Маслёнка 1 устанавливалась на суппорт 2 таким образом, чтобы между наклонными стенками 3 и индентором 4 был зазор около 0,5 мм (рис. 4.8).

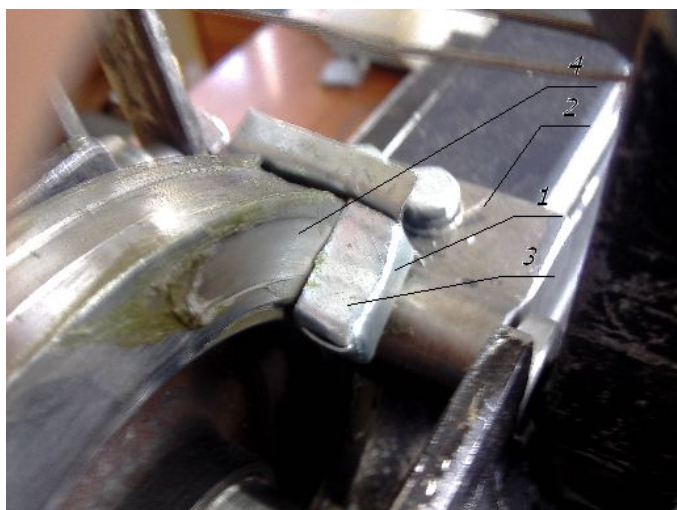


Рис. 4.8. Установка маслёнки на устройство для испытаний

При движении индентора смазка из маслѐнки намазывается на контактную поверхность, подпитывая узел трения. Наклонные стенки корпуса маслѐнки способствуют лучшему переносу смазки на индентор. На рисунке 4.9 показано изменение силы трения за один цикл движения.

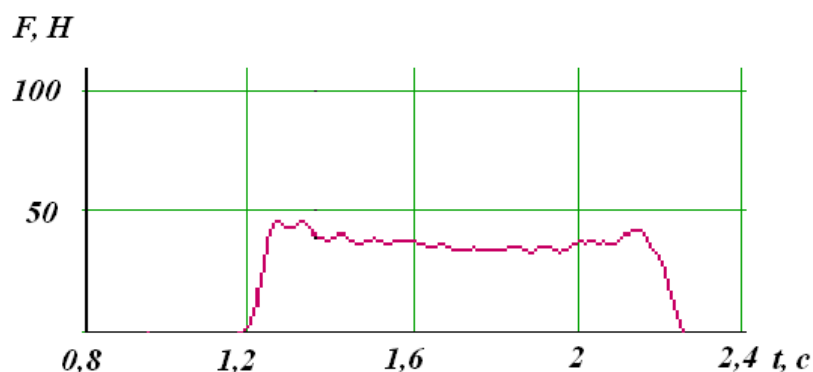


Рис. 4.9. Изменение силы трения за один цикл движения при испытаниях на бронзе БрО-10Ц2, с использованием консистентной смазки (условия трения $P=3,5$ МПа, V до $0,01$ м/с, $T \sim 300$ К)

Из графика видно, что максимальная величина силы трения наблюдается в момент начала движения индентора и в конце цикла при остановке, когда скорость скольжения близка к нулю. Максимальный коэффициент трения за цикл $0,13$, минимальный, полученный при максимальной скорости скольжения ($0,01$ м/с) $0,09$, то есть с ростом скорости скольжения коэффициент трения снижается. Интенсивность линейного износа образцов для принятых условий испытаний получилась $7,48 \times 10^{-9}$.

На втором этапе исследования образцы из бронзы испытывались в условиях недостаточного смазывания. По мере расходования смазки из маслѐнки коэффициент трения постепенно возрастал, и при полном её срабатывании максимальное значение достигло $0,23$ (минимальное значение за цикл $0,2$). При этом во время движения индентора возник характерный высокочастотный виброакустический сигнал. Изменение силы трения в конце второго этапа исследования за один цикл движения показан на рисунке 4.10.

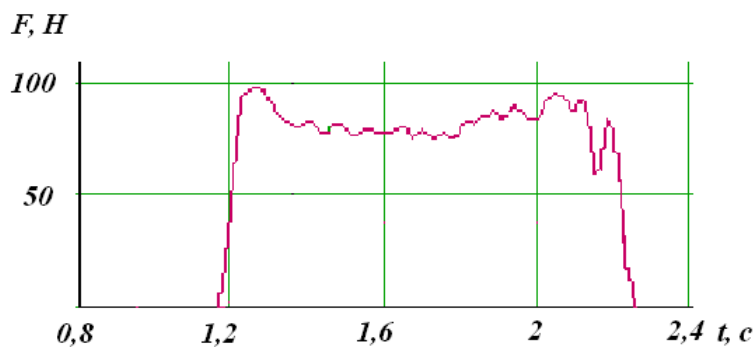


Рис. 4.10. Изменение силы трения за один цикл движения при испытаниях на бронзе

БрО-10Ц2, с дефицитом консистентной смазки

(условия трения $P=3,5$ МПа, V до $0,01$ м/с, $T \sim 300\text{K}$)

Интенсивность износа на втором этапе исследований при дефиците смазки составила $1,22 \times 10^{-8}$.

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 оптимизации узла трения требуется использовать материалы, которые не требуют постоянного контроля и частых сервисных работ.

В качестве таких материалов можно использовать самосмазывающиеся полимеры, такие как углепластики на фенольной основе, фторопласт, капролон с различным наполнением (материалы устойчивые к фреттингу и фреттингкоррозии в условиях высокой кислотности торфа) и др. [13, 18, 133, 176, 181, 182, 185].

На следующем этапе исследований проводились испытания трибоузла с использованием углепластика АМС-3. Его основные свойства:

- плотность – $1,74 - 1,76$ г/см³,
- $\sigma_{сж}$ – $160-180$ МПа при 20^0C , $30-40$ МПа при 200^0C ,
- $\sigma_{изг}$ – $50-70$ МПа,
- $T_{экспл}$ – -50^0 до $+200^0\text{C}$,
- f без смазки – $0,1$ (по справочным данным).

Образцы из углепластика изготавливались в виде цилиндров диаметром 8 мм. Усилие прижатия к контртелу 17,4 кг, что обеспечивает требуемое давление 3,5 МПа. В начальный момент испытаний коэффициент трения был 0,22, в процессе испытаний увеличился до 0,31. Всего за испытание прошло 23100 циклов движения, что соответствует пути 1848 метров. Износ образца составил 0,08 мм, интенсивность линейного износа $4,3 \times 10^{-8}$. На рисунке 4.11 показано изменение силы трения за один цикл движения в начале испытаний. Коэффициент трения достаточно стабильный в пределах цикла изменялся от 0,22 до 0,2.

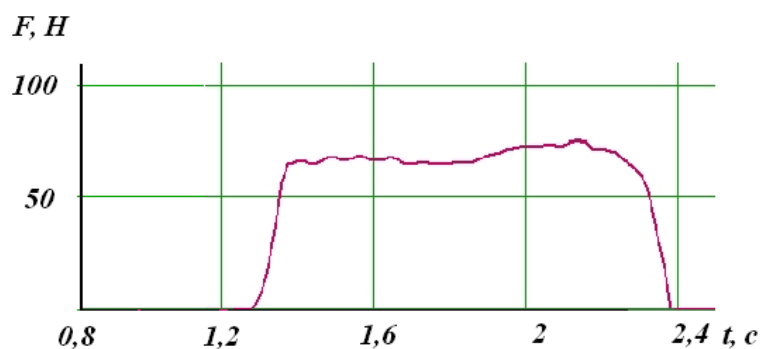


Рис. 4.11. Изменение силы трения внутри одного цикла движения в начале испытаний углепластика (условия трения $P=3,5$ МПа, V до 0,01 м/с, $T \sim 300$ К)

В конце испытаний параметры трения существенно изменились, коэффициент трения вырос и стал нестабильным. В пределах цикла максимальное значение коэффициента трения – 0,31, минимальное – 0,26 (рис. 4.12).

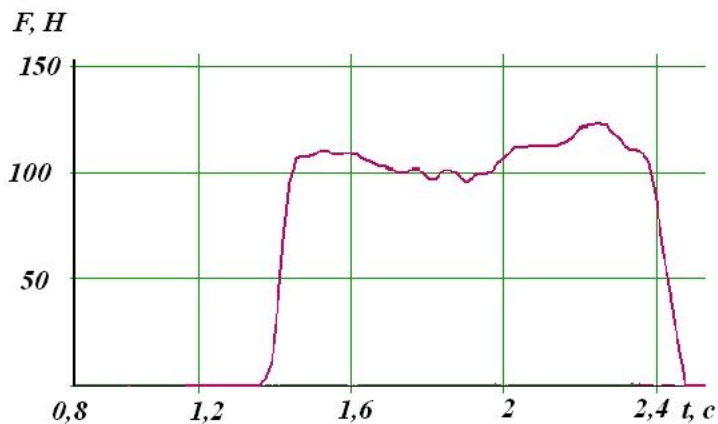


Рис. 4.12. Изменение силы трения внутри одного цикла движения в конце испытаний углепластика (условия трения $P=3,5$ МПа, V до 0,01 м/с, $T \sim 300$ К)

Увеличение коэффициента трения объясняется изменением состояния поверхности индентора. За счёт трения шероховатость поверхности индентора сгладилась, а на поверхности появились следы переноса, состоящие из фенольной смолы с графитом (рис. 4.13).



Рис. 4.13. Поверхность индентора после испытаний на углепластике

Так как шероховатость поверхности существенно уменьшилась, то увеличилась площадь контакта, а следовательно и адгезионная составляющая силы трения, которая в момент начала и конца движения индентора приводит к росту силы трения [99]. Кроме того, перенесённая на индентор фенольная смола имеет хорошую адгезию к стали, что ухудшает трение. В этом случае трение углепластика происходит не по стали, а частично по продуктам переноса, что существенно увеличивает коэффициент трения.

На следующем этапе исследований проводились испытания образцов выполненных из армированного фторопласта Ф-4.

Основные характеристики фторопласта Ф-4:

- плотность – $2100-2200 \text{ кг/м}^3$,
- рабочая температура – от -260 до $+260$,
- разрушающее напряжение при растяжении, МПа 20-30,

- коэффициент трения по стали 0,2,
- твердость по Бринеллю, МПа 30-40.

При испытаниях фторопласт показал достаточно стабильный коэффициент трения независимо от скорости скольжения и длительности испытаний (рис. 4.14).

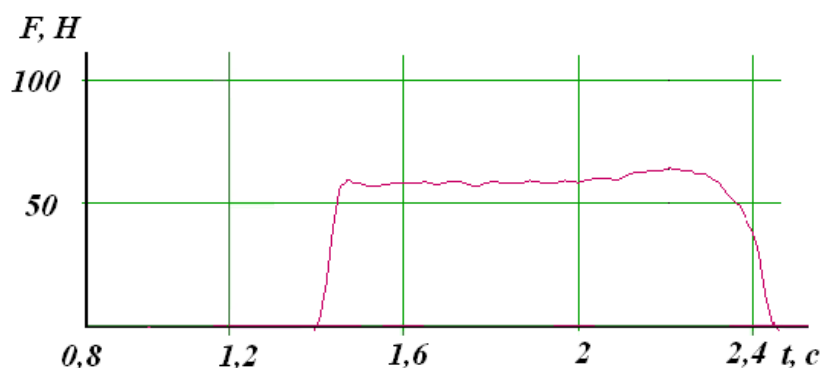


Рис. 4.14. Изменение силы трения внутри одного цикла движения при испытаниях фторопласта Ф-4 (условия трения $P=3,5$ МПа, V до $0,01$ м/с, $T \sim 300$ К)

Среднее значение коэффициента трения было 0,17, и в пределах одного цикла изменялось от 0,16 до 0,18. Недостатком фторопласта является его текучесть, что приводит к быстрому износу образца. По результатам испытаний интенсивность линейного износа для принятых условий исследования составила $2,35 \times 10^{-6}$. В процессе испытаний на поверхности кольцевого индентора появилась мелкодисперсная фторопластовая стружка.

На следующем этапе исследований проводились испытания образцов выполненных из капролона-42.

Основные физико-механические свойства капролона-42:

- плотность материала составляет порядка 1150...1160 кг/м. куб,
- температура плавления находится в пределах 220...225°C,
- рабочий диапазон температур - от -40°C до +70°C,
- твердость по Бринеллю составляет не менее 130 МПа,
- предел прочности при сжатии – не менее 90 МПа,
- предел прочности при изгибе – не менее 80 МПа,

- относительное удлинение при разрыве составляет 10%,
- модуль упругости при сжатии – 2,0...4,0 МПа,
- коэффициент трения капролона-42 по стали без смазки – 0,1 (по справочным данным).

В процессе испытаний коэффициент трения был достаточно стабилен и вырос в течение всего исследования от 0,14 до 0,16. Внутри одного цикла движения, в начале испытаний, изменялся от 0,13 до 0,14 (рис. 4.15).

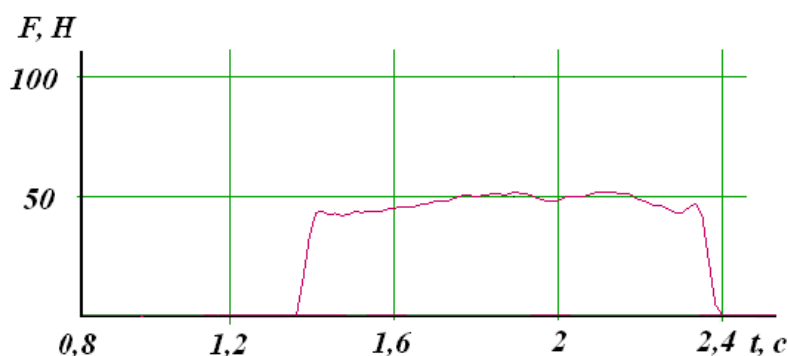


Рис. 4.15. Изменение силы трения внутри одного цикла в начале испытаний капролона-42 (условия трения $P=3,5$ МПа, V до 0,01 м/с, $T \sim 300\text{K}$)

В конце испытаний коэффициент трения внутри одного цикла изменялся от 0,14 до 0,16 (рис. 4.16). В момент начала и конца движения, при скоростях близких к нулю, рост силы трения не наблюдается, что оказывает положительное влияние на узел трения с точки зрения динамики движения деталей в сопряжении. Интенсивность износа образцов из капролона-42 для принятых условий испытаний по результатам исследования получилась $4,05 \times 10^{-8}$.

На следующем этапе исследования антифрикционных материалов проводилось испытание маслонаполненного капролона. Основные физико-механические характеристики маслонаполненного капролона соответствуют характеристикам капролона-42. Отличие состоит в том, что в качестве смазки в нем используется нефтяное масло в связанном состоянии (масло вносится в капролон в процессе его изготовления при полимеризации), а количество графита менее 0.5%.

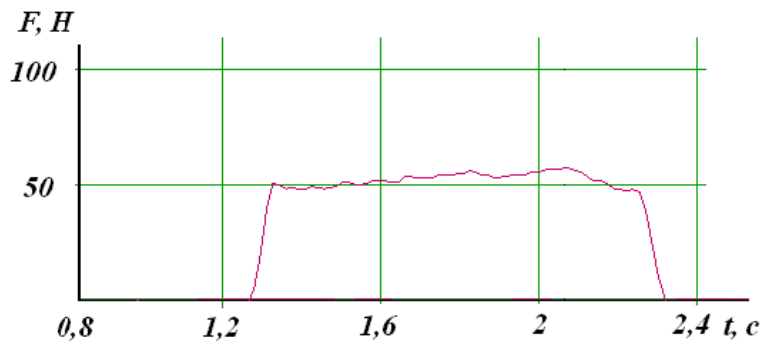


Рис. 4.16. Изменение силы трения внутри одного цикла движения в конце испытаний капролона-42 (условия трения $P=3,5$ МПа, V до $0,01$ м/с, $T \sim 300$ К)

В процессе трения при износе поверхностного слоя смазка переходит из связанного состояния в свободное, снижая коэффициент трения.

В начале испытаний максимальный коэффициент трения в одном цикле движения был $0,16$, минимальный $0,13$ (рис. 4.17).

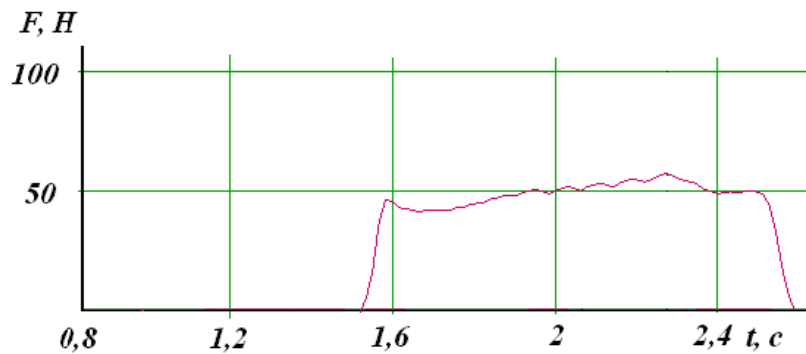


Рис. 4.17. Изменение силы трения внутри одного цикла движения в начале испытаний маслonaполненного капролона (условия трения $P=3,5$ МПа, V до $0,01$ м/с, $T \sim 300$ К)

В процессе испытаний максимальный коэффициент трения постепенно увеличился до $0,2$, а в пределах одного цикла стал неравномерным (минимальное значение коэффициента трения $0,15$, максимальное $0,2$, рис. 4.18).

Существенная неравномерность коэффициента трения в пределах одного цикла может привести к дополнительным динамическим нагрузкам в узле, и повышенному износу при минимальных скоростях скольжения. По результатам испытаний интенсивность линейного износа получилась $7,25 \times 10^{-8}$.

Капролон-42 обладает хорошими триботехническими свойствами и обрабатываемостью, что позволяет использовать его для изготовления деталей

различного назначения, но у этого материала есть существенный недостаток – достаточно высокое влагопоглощение.

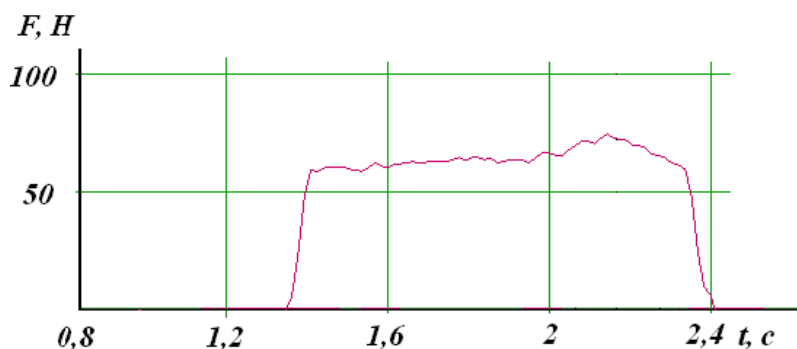


Рис. 4.18. Изменение силы трения внутри одного цикла движения в начале испытаний маслонаполненного капролона (условия трения $P=3,5$ МПа, V до $0,01$ м/с, $T \sim 300$ К)

При работе во влажных условиях он постепенно насыщается водой, что приводит к существенному изменению размеров и некоторому увеличению пластичности. Насыщенный водой капролон при отрицательных температурах снижает свою прочность, что в некоторых случаях приводит к преждевременному разрушению конструкции. Торфяные машины эксплуатируются в условиях повышенной влажности, что отрицательно сказывается на свойствах капролона, который при межсезонном хранении ТМ в условиях отрицательных температур может разрушаться.

Для предотвращения насыщения капролона-42 водой необходимо после изготовления деталей дополнительно обрабатывать специальными нефтяными пропитками, которые создадут в поверхностном слое непреодолимый для воды барьер нефтепродукта. Специальные исследования по влагонасыщению капролона позволили подтвердить это предположение.

Нефтяные масла не оказывают значимого влияния на механические свойства капролон-42, но при этом могут существенно улучшать его триботехнические свойства, и кроме этого обеспечивать дополнительную защиту металлических контактных поверхностей от коррозии.

В процессе исследований, образцы для испытаний на машине трения (см. рис. 4.4) изготовленные из капролона-42 взвешивались на лабораторных весах, а за тем помещались в ванну с водой и выдерживались в ней 24 часа. После этого образцы взвешивались снова и проверялись их размеры. Исследования показали, что после выдерживания образцов в воде они увеличили свою массу приблизительно на 1,5%, что подтверждает высокое влагонасыщение материала, при этом образцы диаметром 8 мм увеличились в разных сечениях на 0,03-0,05 мм. Такое изменение размера может оказать неблагоприятное воздействие на трибосопряжения, или даже привести к заклиниванию деталей.

Для уменьшения водонасыщения капролона-42 образцы дополнительно модифицировались нефтяными маслами. Пропитка маслами осуществлялась в течение 24 часов в специальных термостатах, заполненных маслом, в которых поддерживалась температура 60-70 С⁰. В исследованиях использовались масла с различной вязкостью и наличием ПАВ. Для уменьшения погрешностей при сравнении результатов все образцы из капролона-42 изготавливались из одной заготовки одинаковым способом обработки, так как микрогеометрия поверхности может оказать существенное влияние на маслоснасыщение материала. Результаты исследований представлены в таблице 4.3.

Таблица 4.3

Результаты исследования капролона-42 на маслоснасыщение

	И-8А	И-20А	И-40А	Модифицированное И-8А
Масса образца до испытаний, гр.	1,585	1,657	1,578	1,655
Масса образца после испытаний, гр.	1,596	1,665	1,584	1,670
Насыщение образца, % от массы	~0,7	~0,5	~0,4	~0,9

Исследования показали, что с ростом вязкости, маслоснасыщение капролона-42 снижается (для принятых условий испытаний). Наибольшее маслосна-

сыщение (около 0,9%) получено на минеральном масле И-8А, модифицированном комплексной присадкой производства концерна EXXONMOBIL. Наличие ПАВ (поверхностно активных веществ) объясняет хорошую проникающую способность модифицированного масла.

После маслосыщения капролона-42 все образцы помещались в ёмкость с водой на 24 часа, после чего снова взвешивались. Изменения массы образцов не зафиксировано, то есть после обработки маслом капролона-42 водонасыщение прекращается, что очень важно для деталей, работающих при повышенной влажности в условиях торфяных месторождений.

Ещё одним положительным фактором (для маслосыщенного капролона-42) стало улучшение триботехнических свойств материала, которые были выявлены при испытаниях на машине трения (см. рис. 4.4).

В процессе испытаний коэффициент трения был достаточно стабилен и за два часа испытаний вырос незначительно. Внутри одного цикла движения, в начале испытаний, изменялся от 0,12 до 0,14 (рис. 4.19).

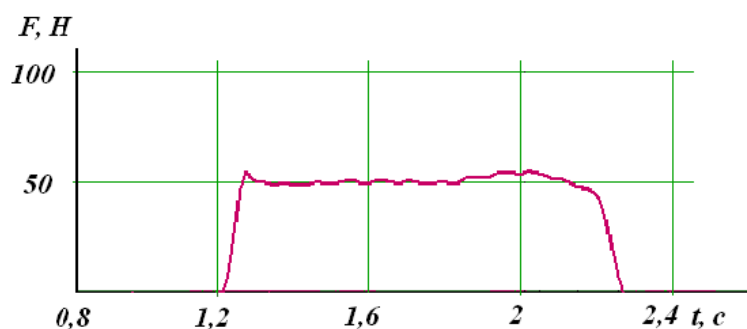


Рис. 4.19. Изменение силы трения внутри одного цикла движения в начале испытаний модифицированного капролона-42 (условия трения $P=3,5$ МПа, V до 0,01 м/с, $T \sim 300$ К)

После двенадцати часов испытаний коэффициент трения внутри одного цикла изменялся от 0,14 до 0,16 (рис. 4.20), что соответствует параметрам немодифицированного капролона-42. Это объясняется тем, что маслосыщенный слой изнашивался (по результатам исследования толщина модифицированного слоя составила $3-5 \times 10^{-5}$ м), и свойства стали соответствовать базовому материалу. В начальный момент и в конце цикла, при скоростях близких к нулю, не наблюдается существенный рост силы трения, что оказывает положитель-

ное влияние на узел трения с точки зрения динамики движения деталей в сопряжении. Интенсивность износа образцов из маслосыщенного капролона-42 для принятых условий испытаний по результатам исследования получилась $3,45 \times 10^{-8}$.

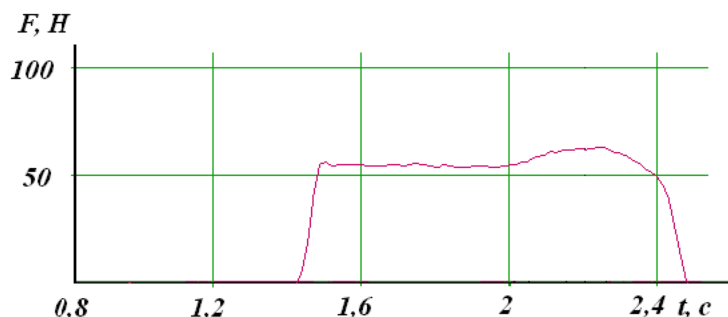


Рис. 4.20. Изменение силы трения внутри одного цикла движения в конце испытаний модифицированного капролона-42 (условия трения $P=3,5$ МПа, V до $0,01$ м/с, $T \sim 300$ К)

Общие результаты исследования и физико-механические свойства испытанных материалов представлены в таблице 4.4.

Таблица 4.4

Основные физико-механические свойства испытанных антифрикционных материалов

	БрО-10Ц2 со смазкой Солидол С	АМС-3	Армированный Ф-4	Капролон-42	Капролон маслосапо- ленный	Модифицированный ка- пролон-42
Плотность, кг/м ³	8500	1740-1760	2100-2200	1150-1160	1150-1160	1150-1160
Предел прочности на сжатие $\sigma_{сж}$, МПа		160-180		90	90	90
Предел прочности на изгиб $\sigma_{изг}$, МПа		50-70		80	80	80
Предел прочности на растяжение $\sigma_{в}$, МПа	225		20-30			
Температура эксплуатации, °С	-50...+200	-50...+200	-260...+260	-40...+70	-40...+70	-40...+70
Твёрдость НВ	75		30-40	130	130	130
Относительное удлинение, %	10%	3%	25%	10%	10%	10%
Коэффициент трения	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	4,3	235	4,05	7,25	3,45

По результатам исследований видно, что лучшие параметры для узла трения – сопряжения А212 имеет модифицированный капролон-42. Этот же материал можно использовать для узлов: Д311, Д511, Е41.

Недостатком рассматриваемого материала является то, что при относительно небольшой толщине модифицированного маслом слоя, он не позволяет сохранять улучшенные триботехнические характеристики на всём интервале эксплуатации. Вследствие этого необходимо выявить возможный механизм транспортирования смазки к контактной поверхности.

Капролон (полиамид-6 блочный) имеет пористую структуру, которая получается вследствие особенностей технологического процесса при изготовлении. Это свойство можно использовать для подачи смазки на рабочую поверхность за счёт капиллярного эффекта. Для проверки этого предположения были проведены специальные исследования, по определению количества смазки транспортируемой к рабочей поверхности из полости для хранения масла за счёт капиллярного эффекта.

Установка для проведения исследований представляла собой ванну 1 с маслом 3, в которую устанавливались образцы 4 из капролона-42, таким образом, чтобы образец был погружен в смазку на глубину 2-3 мм. Для облегчения доступа масла к погруженной поверхности образец устанавливался на подставку из тонкой изогнутой полосы 2 (рис. 4.21).

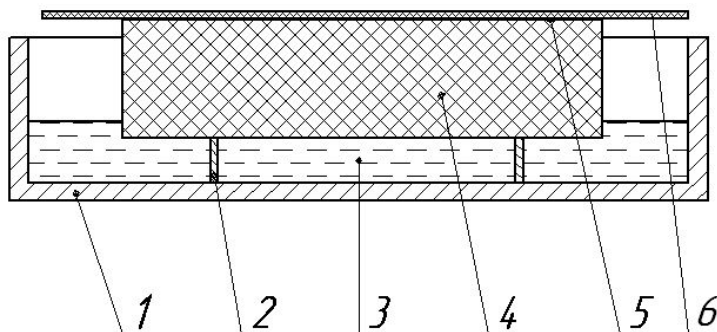


Рис. 4.21. Схема установки для изучения капиллярного эффекта

Количество масла поступающего на поверхность 5 определялось по разнице веса салфетки 6 до испытаний и после её промокания. Взвешивание про-

изводилось на лабораторных весах. Испытания проводились при температуре 20°C в течение нескольких суток на маслах, представленных в таблице 4.3.

Исследования процесса проникновения масла через капилляры капролона показали, что данный эффект наблюдается у всех исследуемых смазочных материалов, а скорость этого процесса коррелирует с маслонасыщением. На рисунке 4.22 показана зависимость удельного проникновения смазки от вязкости масла, полученная на капролоне-42.

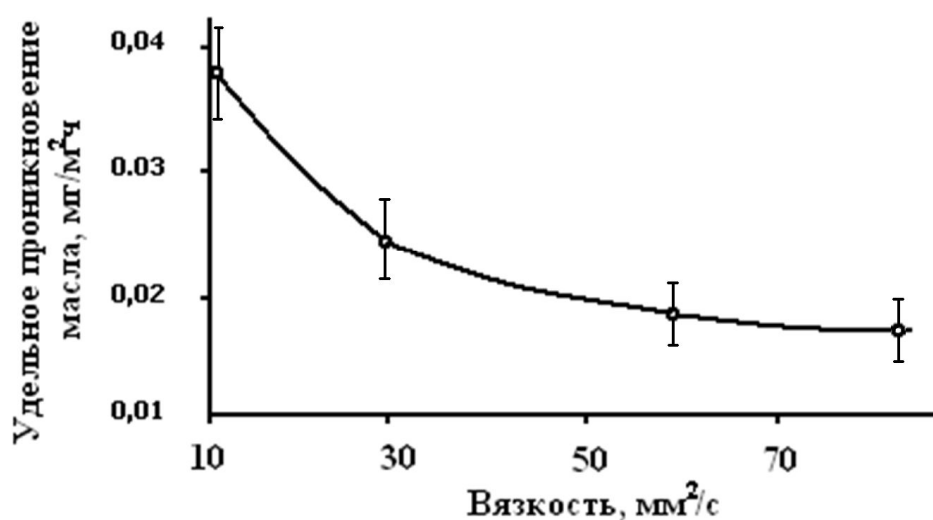


Рис. 4.22. Зависимость проникновения масла от его вязкости

В процессе исследований проникновения масла через капролон было установлено, что количество масла на поверхность 5 (см. рис. 4.21) растёт до полного её перекрытия, и в последующем не увеличивается. После удаления смазки с поверхности через 2-3 часа масло появляется на отдельных участках, и через 6-8 часов масляный слой восстанавливается полностью. Этот эффект позволяет регулировать поток масла в зависимости от его срабатывания в трибоузле, и останавливать подачу смазки при отсутствии движения.

На основе проведённых исследований был выявлен механизм смазывания трибоузла с нормированной подачей масла. Задавая требуемый период обслуживания узла в конкретных условиях эксплуатации, зная объём полости для хранения масла, можно подобрать смазочный материал, с нужными свойствами, что бы обеспечить качественное функционирование сопряжения. По ре-

результатам моделирования для узла А212 при объеме масляного кармана около 20 мл, требуется масло с кинематической вязкостью 17-20 мм²/с, чтобы обеспечить эксплуатацию узла в течение 960-1000 часов.

При использовании разработанного способа подачи смазки в сопряжение можно сократить трудоёмкость ТО (около 12 чел.ч.), так как в течение 960 часов данные узлы обслуживать не нужно. В сезон добычи торфа технологические машины обычно имеют фактическую наработку значительно меньше 900 моточасов, поэтому сопряжения нужно обслуживать один раз в сезон перед началом добычи.

У комплексного агрегата есть сопряжения, модификация которых может также увеличить ресурс трибоэлементов, например, сопряжение Д321 – сопряжение муфты фрезерующего устройства. Муфта представляет собой сопряжение цилиндрического отверстия фрезы и сферы диаметром 100 мм. Из-за неровностей на поверхности торфяной залежи, рама вместе с фрезой может разворачиваться на угол до 3°, в результате чего, при вращении начинается проскальзывание цилиндрической поверхности отверстия 1 муфты относительно сферы 2, установленной на шлицевой вал привода фрезы (рис. 4.23).

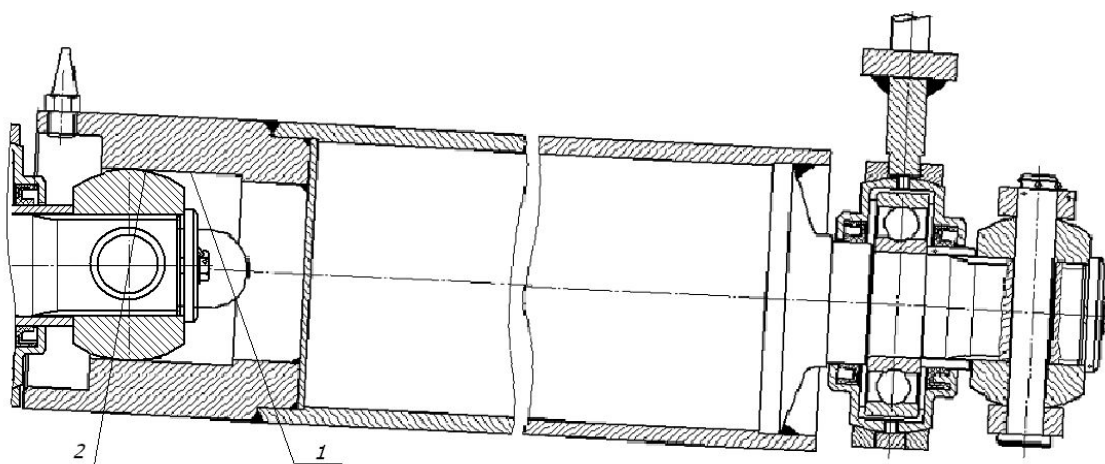


Рис. 4.23. Схема разворота фрезы из-за неровностей на поверхности торфяной залежи

Так как диаметр сферической поверхности муфты 100 мм, то при развороте корпуса фрезы на 3° происходит проскальзывание контактных поверхностей муфты на 5, 2 мм за один оборот. При скорости вращения 1000 оборотов

в минуту, скорость скольжения будет 0,087 м/с, что при контактном давлении около 4МПа в паре стали 17ГС корпуса фрезы и стали 45 сферической муфты без смазки приводит к существенному износу (рис. 4.24).

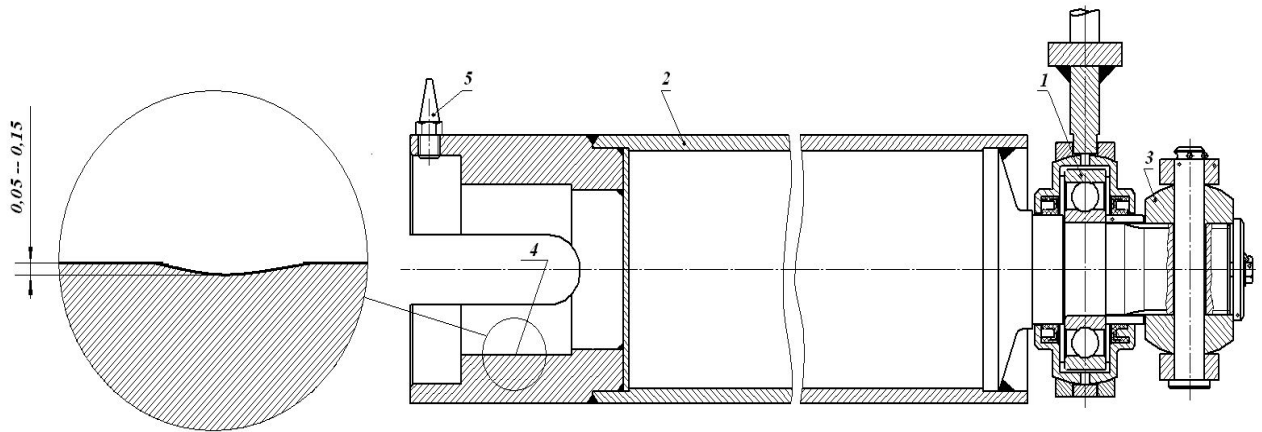


Рис. 4.24. Схема расположения износа на контактной поверхности муфты

1 – опорный подшипник фрезы, 2 – корпус фрезы, 3 – сферическая поверхность муфты, 4 – контактная поверхность муфты в корпусе фрезы, 5 – зуб фрезы

Из-за дисбаланса фрезы при вращении происходит смещение корпуса относительно сферической поверхности муфты в одну сторону, в результате происходит локальный контакт поверхностей, где происходит интенсивное изнашивание, и как следствие увеличение динамических сил. Уменьшить износ можно за счёт модификации трибопары, если одну из деталей изготавливать из материала с улучшенными триботехническими параметрами. Для этих целей можно использовать полимерный самосмазывающийся материал – капролон-42, исследования которого показали его высокую эффективность в необслуживаемых узлах. Из капролона-42 можно изготавливать сферическую часть муфты, которая устанавливается на шлицевой вал, и по мере износа, может быть легко заменена на новую [139].

Для изучения триботехнических характеристик модернизированного узла были проведены исследования на модели фрезерующего устройства (рис. 4.25).

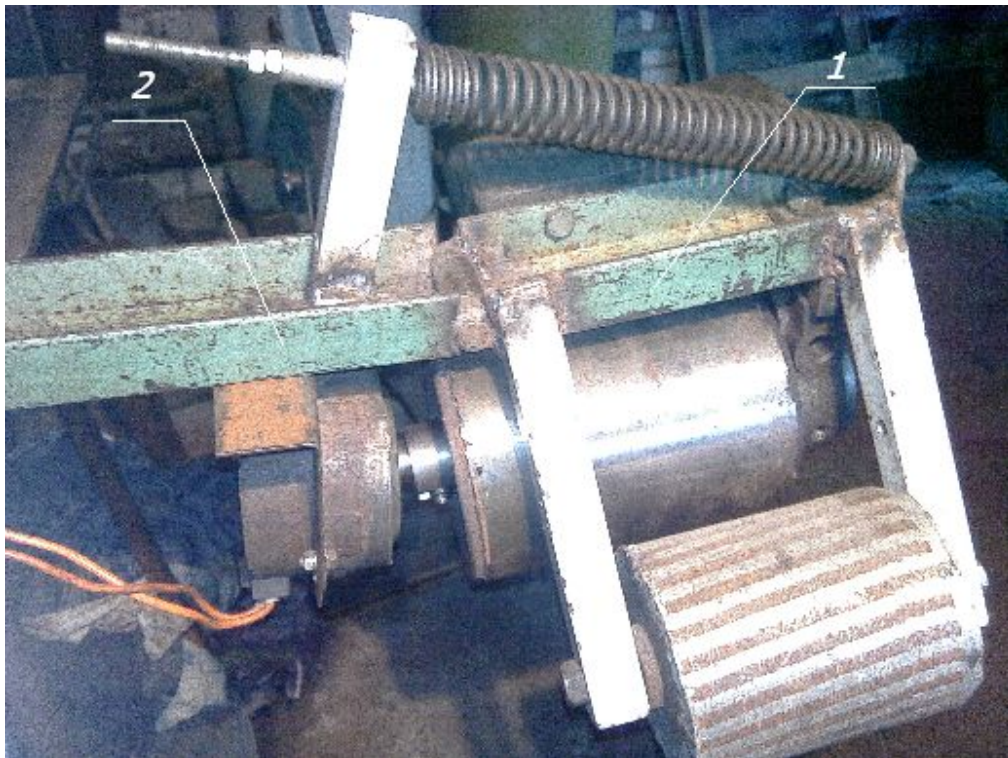


Рис. 4.25. Модель фрезерующего устройства при испытаниях кулачковой муфты на износ

Так как у модели фрезерующего устройства диаметр сферической муфты 50 мм, то для получения необходимой скорости скольжения на контактных поверхностях рама 1 была развёрнута относительно основания 2 на угол 6° .

Кулачковая муфта показана на рисунке 4.26.



Рис. 4.26. Вид на кулачковую муфту фрезерующего устройства

Модель в движение приводилась от коллекторного электродвигателя (скорость вращения 1000 оборотов в минуту). Эквивалентная нагрузка на муфту получалась из-за нормированного дисбаланса корпуса фрезы, что обеспечивало требуемое давление на контактные поверхности.

Испытания проводились в течение 24 часов, величина износа определялась взвешиванием цилиндрической части муфты до и после испытаний.

После исследований на стальной паре из соответствующих материалов были проведены испытания в паре сталь – капролон-42.

На рисунке 4.27 представлена фотография сферической части муфты, выполненной из капролона-42.

Перед испытаниями цилиндрическая часть муфты, выполненная из стали 17ГС, была взвешена на лабораторных весах, её вес составил 125,093 г. После испытаний деталь весила 124,825 г, потеря веса составила 0,268 г. При испытаниях в паре сталь 17ГС и сталь 45, давление в контакте было около 4МПа, скорость скольжения 0,087 м/с интенсивность массового износа цилиндрической части муфты получилась 36 мкг/м.



Рис. 4.27. Сферической части муфты, выполненной из капролона-42

После этого были проведены аналогичные исследования в паре сталь 17ГС и капролон-42 модифицированный, интенсивность массового износа цилиндрической части муфты получилась 5,3 мкг/м, то есть уменьшилась почти

на порядок. При этом интенсивность массового износа сферической части муфты получилась 7,25 мкг/м (надо учитывать, что капролон весит в шесть раз меньше стали).

Аналогично можно модифицировать шарнирные механизмы подвески фрезерующих устройств, ворошильных секций, секций и скребков валкователей.

При работе механизмов торфяных машин возникают высокочастотные механические колебания конструкций, а так как большое их количество связано между собой шарнирно, то в местах сопряжений возникает фреттинг-износ. Поэтому достаточно часто происходит заклинивание шарнирных механизмов подвески без видимых причин. Для фреттинга характерно высокочастотное колебательное движение с небольшой амплитудой в режиме старт – стоп, что при недостатке смазки приводит к схватыванию поверхностей на локальных участках трибопары, с последующим отделением мельчайших частиц.

Кроме того, на интенсивность износа оказывают существенное влияние электрохимические процессы, которые возникают в трибосопряжениях при возникновении гальванических пар, что характерно для узлов торфяных машин при недостаточном количестве смазки.

Механизм фреттинг-износа достаточно сложный, он зависит от механических свойств узлов трения, сопротивляемости абразивному износу, а также адгезионных и усталостных процессов в зоне контакта [153].

Использование в шарнирных соединениях самосмазывающихся материалов, таких как модифицированный капролон-42, имеющих значительно лучшие триботехнические свойства, чем у типовых материалов, позволяет уменьшить влияние фреттинга на надёжность торфяных машин.

Таким образом, применение в трибоузлах торфяных машин современных самосмазывающихся материалов может существенно повысить эффективность их использования за счёт сокращения простоев в ТО и ремонтах, а также повышения ресурса дорогостоящих узлов.

4.3 МОДИФИКАЦИЯ ТРИБОУЗЛОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МАГНИТНЫХ СМАЗОК

Альтернативой использования самосмазывающихся материалов могут стать узлы трения с магнитожидкостной смазкой. Использование таких смазок обеспечивает переход узлов от режима сухого трения к граничному или даже гидродинамическому, что может снизить интенсивность изнашивания поверхностей трения на порядок. Магнитожидкостные подшипники имеют большие потенциальные возможности для применения в узлах и механизмах торфяных машин. Использование таких подшипников в узлах трения торфяного оборудования обеспечит ему высокую надежность, эффективную и экономичную работу. Достоинством подшипников с магнитожидкостной смазкой заключается в широком нагрузочно - скоростном режиме, где они работают в гидродинамическом режиме автономно за счет самоорганизующегося в магнитном поле замкнутого цикла циркуляции масла в зоне трения.

Основная задача, которая решалась при создании долговечных магнито-жидкостных подшипников, заключалась в правильном выборе материалов вала и втулки. Для этого были проведены исследования различных сочетания материалов вала и втулки: полиамид-сталь, латунь-сталь, бронза-сталь, сталь-сталь, керамика (МДО-покрытие) -сталь [34, 64].

Во время исследований изучались свойства магнитожидкостного подшипника при граничном режиме смазки (рис. 4.28) с магнитной системой, выполненной по симметричной схеме. Корпус 1 подшипника изготовлен из немагнитного материала. Внутри корпуса имеется постоянный магнит 2 с двумя осесимметричными магнитопроводами 3, а также немагнитная втулка 4. Во втулке имеется несколько канавок 5 для смазки, находящихся в ненагруженных зонах подшипника. Форма и размеры магнитопроводов 3 выполнены в соответствии с требуемыми характеристиками магнитного поля в области 6 и зоне канавок, где хранится дополнительный объем магнитной смазки. Маг-

нитное поле между магнитопроводами 3 и валом 7 имеет градиент, который направлен в сторону магнита, вал 7 изготовлялся из магнитомягкого материала, что обеспечивает замыкание магнитной цепи подшипника.

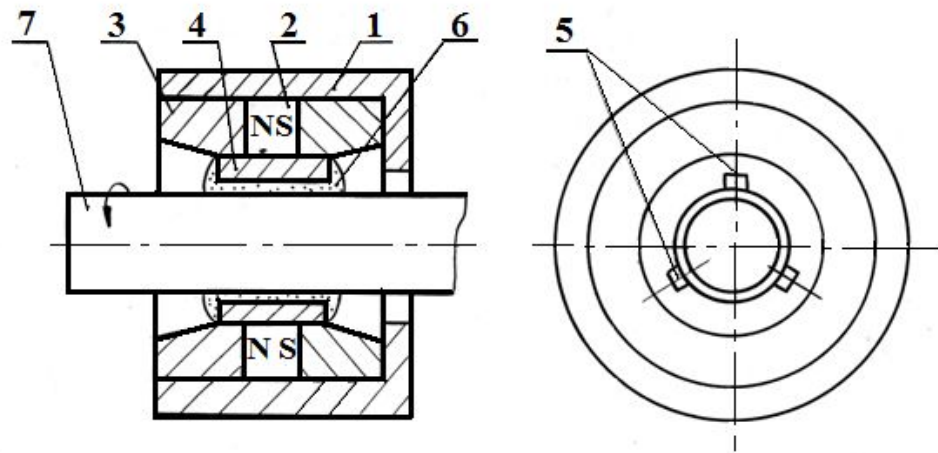


Рис. 4.28. Магнитожидкостный подшипник

Во время вращения вала магнитное масло поступает от канавки и с помощью магнитных сил притягивается к нему, заполняет радиальный зазор, намазываясь на контактную поверхность. В результате чего, создаётся воспринимаящий нагрузку смазочный слой с избыточным давлением, откуда масло частично выдавливается к торцам втулки в область с резервным маслом, где впоследствии охлаждается. Охладившееся масло из резервного объёма притягивается магнитным полем обратно к смазочной канавке, восполняя его потери.

В центральной части втулки подшипника имеется углубление в виде кольца по ширине магнита, таким образом, по краям имеются две опорных поверхности. Для получения граничного режима смазки подшипника выбрано соотношение $l/d=0,25$ опорной длины втулки к диаметру вала. Зазор между втулкой и валом был $3 \cdot 10^{-3}$. При высоте микронеровностей R_z вала и втулки не менее 5 - 6 мкм, ε подшипника – коэффициент нагруженности при граничном режиме смазки, не более 1 - 1,5 и определялся по выражению:

$$\varepsilon = \frac{P \Psi^2}{\eta \omega}, \quad (4.1)$$

где P – давление, Ψ – относительный зазор, η – коэффициент вязкости масла, ω – скорость вращения вала.

Испытания проводились на специальной установке, разработанной для исследований различных материалов контактных поверхностей магнитных подшипников [35]. При испытаниях использовался вал из стали У8А или 40Х, диаметром 20 мм, который вращался с частотой от 1 до 30 с⁻¹, давления на рабочие поверхности изменялось в интервале 0,1 - 2 МПа. Суммарный износ втулки и вала измерялся периодически через 5-7 часов после охлаждения подшипника до температуры 20⁰С. Систематическая погрешность измерения износа при измерении составляла не более 0,3 мкм. Для исследований подшипников с валом более 30 миллиметров применялась машина трения СМЦ-2.

Втулки подшипников изготавливались из различных материалов: бронзы БРАЖ9-4, латуни ЛЖМц 59-1-1, нержавеющей стали 12Х18Н9Т и полимера – полиамид ПА- 6, так же использовался алюминиевый сплав Д16 с керамическим покрытием.

Наиболее перспективным материалом для магнитных подшипников являются детали с керамическими оксидными покрытиями, которые получают с помощью анодирования в электролитическом разряде – микродуговым оксидированием (МДО) [34].

Верхний керамический слой обладает микротвердостью 4-5 ГПа, нижний, граничащий на границе с металлом, 15-20 ГПа. Слой покрытия МДО с оксидным составом имеет пористость 5-15%, силикатный слой – до 40%. Размер пор варьируется от 5 до 30 мкм. Анализ керамического покрытия с точки зрения фазового состава оксидного слоя показал, что в большей мере он состоит из α и γ модификаций Al_2O_3 . (корунда), так же присутствует оксид кремния (около 9%), железа (до 2%) и натрия (до 2%). То есть, керамическое покрытие обладает гетерофазным составом, а высокотвёрдая фаза $\alpha-Al_2O_3$ охвачена менее прочной средой из $\gamma-Al_2O_3$.

Контртело – вал изготавливали из стали 40Х в первом случае с последующей лазерной закалкой и отпуском (микротвердость около 8 ГПа), во

втором лазерное оплавление с глубоким охлаждением в жидком азоте (микротвердость около 10 ГПа). Параметры термообработки обеспечивали формирование аморфного (бескристаллитного) слоя на рабочей поверхности трения глубиной не менее 0,2 мм.

В качестве смазки использовалось перспективное магнитное масло на основе диоктилсебагината, имеющее намагниченность насыщения 24 кА/м, и вязкость около 0,08 Па·с в магнитном поле 0,2 Тл при температуре 293 К.

Для торможения процессов деструкции, полимеризации и окисления магнитных наночастиц в масле использовалась специальная антиоксидантная присадка, которая позволяет эксплуатировать масло при температурах до 450К.

В процессе испытаний интенсивность износа рассчитывалась как среднее значение по двум парным испытаниям, в том случае если разброс между полученными значениями был не более 10-15%, результат принимался, если разброс был более значительным, то испытания дублировались. Длительность испытаний с металлическими подшипниками была более 50 часов, а с керамическим покрытием 200-300 часов, результаты представлены в таблице 4.5.

Результаты исследования показывают, что интенсивность износа металлических подшипников значительно выше, чем подшипников с МДО покрытием, а коэффициент трения в подшипниках с МДО - покрытием значительно меньше. Износостойкость трибопары полиамид ПА-6 -сталь в условиях принятых испытаний оказалась достаточно низкой, что связано как с низкой абразивной износостойкостью полимера, так и с усиленным износом вала за счёт шаржирования частицами магнетита из масла насыщенных в поверхности пластмассы.

Исследования показали, что наилучшие характеристики имеют магнитожидкостные подшипники для узлов, втулки которых изготовлены из алюминиевого сплава Д16, а поверхности трения упрочнены методом МДО.

Таблица 4.5

Результаты фрикционных испытаний магнитных подшипников
изготовленных из различных материалов

Материалы пары трения	Условия трения		Фрикционные свойства	
	P, МПа	v, м/с	f	$I_h \cdot 10^{-9}$
Сталь У8А – бронза БрАЖ9-4	1	0,6	0,11	0,9
	3	1,1	0,11	3,1
	5	1,5	0,12	4,2
Сталь У8А – латунь ЛЖМц 59-1-1	1	0,6	0,12	1,2
	3	1,1	0,13	3,9
	5	1,5	0,13	5,6
Сталь У8А – сталь 12Х18Н9Т	1	0,6	0,10	0,8
	3	1,1	0,15	1,7
	5	1,5	0,13	3,4
Сталь У8А – керамика	1	0,6	0,07	0,05
	3	1,1	0,09	0,18
	5	1,5	0,09	0,25
Сталь 40 х (закалка) - ке- рамика	1	0,6	0,09	0,06
	3			
Сталь 40 х (аморфная) - керамика	1	0,6	0,08	0,05
	3			
		1,1	0,09	0,14
Сталь У8А- полиамид	1	0,6	0,05	1,4

На рисунке 4.29 представлена конструкция муфты фрезерующего устройства с магнитожидкой смазкой. Внутри стального корпуса фрезы 4 установлена сферическая муфта 3, в которую вмонтирован постоянный магнит 2 с радиальной намагниченностью. Снаружи магнита установлено кольцо 1, выполненное из сплава Д-16. Кольцо с внешней стороны имеет МДО покрытие, что обеспечивает высокую износостойкость поверхности. В зазоре между корпусом 4 и муфтой 3 находится магнитное масло, которая

обеспечивает смазку контактных поверхностей. Анализ результатов исследования показал, что интенсивность износа трибоузла снижается больше, чем на порядок.

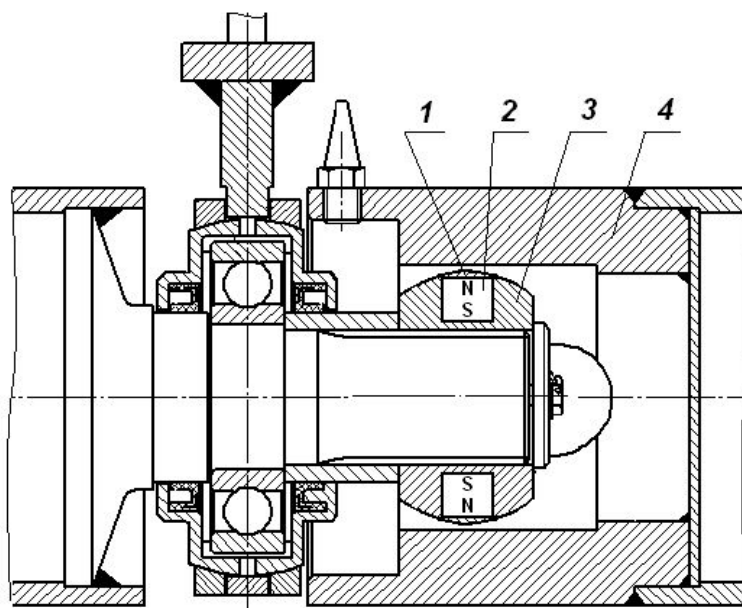


Рис. 4.29. Конструкция муфты фрезерующего устройства с магнитожидкостной смазкой

Применение в трибоузлах торфяных машин современных самосмазывающихся материалов и магнитных смазок может существенно повысить эффективность их использования за счёт сокращения простоев в ТО и ремонтах, а так же повышения ресурса дорогостоящих элементов.

4.4 МАГНИТОПОРОШКОВАЯ ГЕРМЕТИЗАЦИЯ УЗЛОВ ТОРФЯНЫХ МАШИН В АБРАЗИВНЫХ СРЕДАХ

В настоящее время одним из основных факторов, лимитирующих долговечность и надежность узлов трения машин и механизмов торфяной и горно-рудной промышленности, является абразивный износ деталей [203]. Учитывая, что именно в этих отраслях наиболее высока потребность в подшипниках, зубчатых передачах, важной остается задача эффективной герметизации их от попадания абразива.

Используемые для этих целей контактные уплотнения и, в частности, манжетные и торцевые уплотнения сами подвержены сильному износу и имеют сравнительно большие потери энергии на трение.

Сейчас все больший интерес вызывают магнитные уплотнения и особенно магнитожидкостные (МЖ) [20, 34]. Последние позволяют повысить качество и надежность герметизации от попадания газов и некоторых однофазных жидкостей. Механизм герметизации МЖ уплотнений заключается в том, что немагнитные, например, абразивные частицы не пропускаются пробкой из магнитной жидкости в результате действия магнитогидростатической выталкивающей силы. Однако практически использовать МЖ уплотнения затруднительно из-за большого расхода магнитной жидкости, вызванного ее уносом абразивными частицами. Исключить этот негативный процесс использованием магнитных жидкостей с лиофобными свойствами пока не удастся.

Как дальнейшее развитие магнитных методов герметизации слабомагнитных абразивных сред был предложен магнитопорошковый (МП) метод. В уплотнениях, выполненных по этому методу, магнитный порошок заполняет герметизируемый зазор и удерживается в нем неоднородным магнитным полем. Кроме того, поле способствует образованию такой структуры в расположении частиц порошка, при которой создается высокий градиент магнитной энергии частиц в направлении движения абразива. Такое состояние характеризуется сильным самоуплотнением магнитного порошка.

С термодинамических позиций задержка абразивных частиц уплотнением объясняется тем, что по мере продвижения их в уплотнении повышается полная энергия магнитной системы уплотнения, а самопроизвольное протекание такого процесса маловероятно.

Долговечность МП уплотнений ограничена лишь температурно-временной стабильностью порошка и при правильном его выборе может составлять десятки лет. Работоспособность уплотнений не нарушается из-за абразивного износа его элементов и действия сил трения. Уплотнения могут эксплуатироваться в широком температурном диапазоне с верхним пределом

до 800—900 К и ничем не ограниченным нижним пределом. При эксплуатации МП уплотнений в средах, содержащих кроме абразива жидкие компоненты, последовательно с ними устанавливается традиционное уплотнение, отсекающее жидкость.

Следует отметить схожесть механизмов герметизации МЖ и МП уплотнений. В то же время в МП уплотнениях герметизация достигается с помощью материала, имеющего на порядок большую намагниченность, чем магнитная жидкость, и на три порядка превосходящую магнитную проницаемость. Кроме того, в МП уплотнениях, несомненно, более существенное влияние на герметичность оказывают сдвиговые напряжения, разупорядочивающие магнитный порошок. Эти особенности МП уплотнений не позволяют априорно распространить на них принцип конструирования, разработанный применительно к МЖ уплотнениям. Поэтому экспериментально изучались закономерности функционирования МП уплотнений, и оценивалась их эффективность.

Исследования проводились на установке, схема которой приведена на рисунке 4.30.

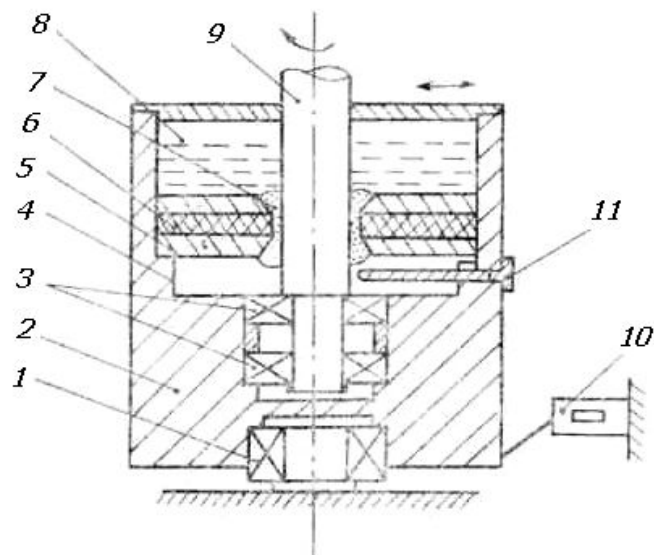


Рис. 4.30. Схема экспериментальной установки для исследования магнитопорошкового уплотнения

Установка состоит из цилиндрического корпуса 2 выполненного из немагнитного материала, закрепленного на самоустанавливающемся подшипни-

ке качения *1*, создающего возможность его свободного вращения и колебания. Внутри корпуса проходит вал *9* диаметром 14 мм, один конец которого установлен в подшипниках *3*. Для установки уплотнения выполнен выступ *4*. Для измерения момента сил трения в уплотнении корпус установки соединялся с тензобалкой *10*.

Для оценки качества герметизации МП уплотнением перед подшипниковым узлом *3* была установлена клейкая прокладка *11*, которая при необходимости легко вынималась. Частицы абразива, проникшие через уплотнение, прилипали к прокладке, и их можно было наблюдать визуально. Герметичность уплотнения контролировалась с периодичностью 0,5 ч и считалась нарушенной при обнаружении первых частиц абразива.

В экспериментальной установке на рисунке показано одно из исследуемых МП уплотнений. Уплотнение состоит из постоянного магнита *6*, однозубцовых полюсных наконечников *5* и магнитного порошка *7*. Магнитное поле создавалось магнитом с остаточной намагниченностью 0,78 Тл и имеющего размеры 40×20×10 мм. Магнитопроводы изготавливались из стали 45. Толщина полюсных наконечников составляла 7 мм, угол при вершине зубца 45°. Герметизация осуществлялась порошком никеля дисперсностью 10—50 мкм или, для снижения трения и износа вала, антифрикционной композицией из смеси никеля и графита с отношением компонентов 3:1 [20]. Корундовый абразивный порошок дисперсностью 1 —100 мкм помещался в область *8*.

Исследования проводились при частоте вращения вала 17 с⁻¹. С этой же частотой и амплитудой 10 рад колебался весь корпус *2* относительно подшипника *1* для придания вибрации абразиву и ужесточения тем самым условий работы уплотнения. Момент трения в уплотнении с чистым магнитным порошком составлял 4-5 Н×см, а с антифрикционной композицией — 3-4 Н×см. Герметичность соответственно нарушалась через 3 и 5 ч после начала работы.

Анализ механизма процессов, протекающих в уплотнении, показывает, что абразивные частицы проникают через узкую область, примыкающую к валу, в которой сосредоточены наиболее сильные сдвиговые напряжения. В этой

области роль магнитных сил нивелируется по сравнению с силами трения, вызывающими интенсивное перемешивание порошка. Попавшие сюда частицы абразива перемешиваются с магнитными частицами и постепенно под действием силы тяжести диффундируют через уплотнение. Причина нарушения герметичности заключается в недостаточно сильном самоуплотнении магнитного порошка. Это связано с тем, что в отличие от МЖ уплотнений неоднородность эффективного магнитного поля, действующего на отдельную частицу в герметизируемом зазоре МП уплотнения, сильно снижается после введения в него материала с высокими магнитными свойствами. В 1,5-2 раза повышает герметичность немагнитный кольцевой выступ, выполненный на валу со стороны абразива, который защищает уплотнения от прямого попадания частиц и дополнительно уплотняет магнитный порошок. При другой модификации уплотнения на валу выполнялась винтовая канавка, предназначенная для удаления диффундирующих вдоль вала абразивных частиц. Винтовая канавка имела форму равностороннего треугольника высотой 0,7 мм, угол подъема канавки 10° . Предполагалось, что пониженное значение напряженности магнитного поля в канавке будет способствовать попаданию в них немагнитных абразивных частиц и дальнейшему удалению их из уплотнения. Эксперименты подтвердили преимущества такого конструктивного решения, первые абразивные частицы проникали более чем через 12 ч. Поток абразивных частиц был значительно меньше, чем в предыдущих конструкциях, а момент сил трения составлял 5,0-5,5 Н×см. Для уплотнений с другими магнитными системами были получены несколько худшие характеристики.

Для сравнительной оценки МП уплотнений с другими типами уплотнений оценивалась долговечность манжетного и торцевого уплотнений в указанных условиях. Герметичность манжетного уплотнения необратимо нарушалась через 0,5-1,0 ч даже при установке дополнительных устройств, защищающих его от прямого попадания абразива. Торцевое уплотнение выполнялось из двух кольцевых магнитов, один из которых крепился на валу, а другой к корпусу установки. Сила прижатия создавалась за счет притяжения между

магнитами, для снижения силы трения магнитов уплотнение смазывалось маслом И-20А. Несмотря, на наличие смазочного масла и высокую твердость материала магнитов, наблюдалось их интенсивное изнашивание, и герметичность нарушалась через 5—6 ч.

Приведенные данные показывают, что магнитопорошковые уплотнения имеют некоторые преимущества перед другими уплотнениями при герметизации узлов трения от попадания сред, содержащих абразив. Поэтому применение МП уплотнений может существенно увеличить ресурс трибоэлементов торфяных машин, что способствует снижению затрат на техническое обслуживание и ремонт, и как следствие повышает эффективность использования ТМ в сезон добычи торфа.

4.5. МОДИФИКАЦИЯ ТРИБОУЗЛОВ ТОРФЯНЫХ МАШИН С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НОВОГО ФРИКЦИОННОГО ПОЛИМЕРНОГО МАТЕРИАЛА

Общей тенденцией развития торфяных машин является повышение надёжности. Вместе с этим, всё актуальнее становится проблема фрикционных передач. В настоящее время для фрикционных систем применяют различные материалы, такие как чугун, фрикционные композиционные материалы с полимерной матрицей, металлокерамику, спеченные фрикционные материалы на основе порошков различных металлов [201].

Известно, что энергия торможения машины массой 20000 кг движущейся со скоростью около 10 км/час с ускорением $(-0,8) \text{ м/с}^2$ составляет порядка 60 кВт на тормозную пару. Это приводит к тому, что температура в зоне трения фрикционной пары может достигать 800-900 К. Всё это приводит к росту энергонагруженности тормозных устройств, что стимулирует исследования по созданию новых типов фрикционных материалов с более высокими эксплуатационными характеристиками.

В настоящее время у нас в стране технологические машины комплектуются тормозными колодками и фрикционными муфтами различной конструкции. Но вместе с тем заводы изготавливают их практически по одной и той же технологии и из одного и того же сырья с разным соотношением компонентов (в состав формовочной смеси входят фенольные смолы, каучуки и металлические включения в виде порошков и стружки, абразивы, стабилизаторы трения и другие компоненты) рис.4.31.

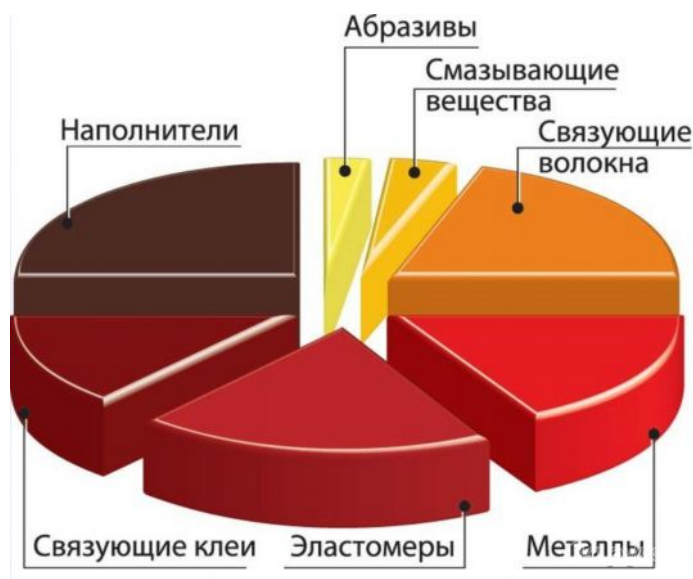


Рис. 4.31. Состав материалов для фрикционных муфт и тормозных колодок

Обычно в качестве материала для контртела используют чугуны, в основном марки СЧ24 ГОСТ 1412-85, твердостью 187-241 НВ. В этом случае значения коэффициента трения в паре «фрикционный материал – контртело» будут близки (в пределах 0.3 – 0.4). Если принять, что на фрикционные накладки во время эксплуатации действуют приблизительно одинаковые давления, то интенсивность изнашивания контртела ($3-7 \cdot 10^{-7}$) на 1 м тормозного пути, а также тормозных колодок будет одна и та же вне зависимости от типа технологической машины.

Однако на износ фрикционного узла влияет также: манера управления, исправность приводов, различные технологические факторы и другие. Следовательно, всё это может приводить к сверхнормативному износу фрикционных элементов и как следствие к дополнительным затратам на восстановление. За-

мена ведущих фрикционных дисков – операция достаточно простая и не требует больших затрат, а при износе ведомых и тормозных дисков или барабанов затраты могут возрасти на порядок, кроме того резко возрастает трудоёмкость ремонта, и как следствие простои, что может существенно нарушать технологический процесс добычи торфа.

Для решения этой проблемы в состав фрикционных накладок можно включить материалы, которые имеют достаточно хорошую адгезию к контртелу (ведомым и тормозным дискам, тормозным барабанам), и при фрикционном взаимодействии, будут переноситься на него, компенсируя износ основного материала [33, 90, 94].

В качестве материала, компенсирующего износ можно использовать ряд металлов: медь, алюминий, цинк, титан, олово. Однако, обладая хорошей адгезией, цинк и олово из-за относительно невысокой температуры плавления в тормозных системах применяются ограниченно.

При контакте фрикционной накладки с ведомым диском его поверхность за счет трения очищается от оксидов и адгезионных плёнок. Это способствует хорошей схватываемости с материалом, компенсирующим износ. Для исследования процесса переноса было сконструировано специальное устройство (рис. 4.32) представляющее собой пару трения – диск из чугуна СЧ24 и колодка с фрикционной накладкой из композита Е-130 Егорьевского завода.

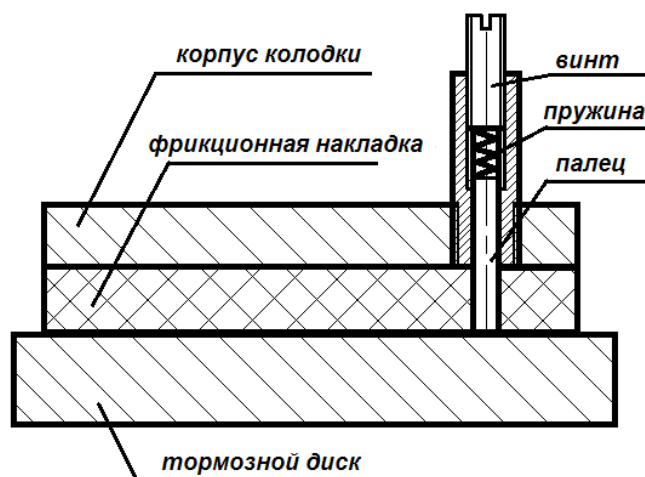


Рис. 4.32. Схема установки для испытаний

По заявлениям производителя, материал E-130 обеспечивает стабильно высокую эффективность торможения, сохраняет работоспособность при длительном воздействии температур до 350°C и кратковременном до 500°C . В корпусе колодки получено отверстие, через которое к диску прижимался палец из металла. Давление пальца на диск $0,2\text{ МПа}$, регулировалось с помощью винта и пружины.

Скорость скольжения при исследованиях поддерживалась от 1 до 3 м/с, давление $0,5\text{ МПа}$. Испытания проводились циклами по 5 минут всего 10 циклов, при этом температура диска достигала 250°C .

При испытаниях с медным пальцем видимого эффекта переноса на тормозном диске не наблюдалось.

При испытаниях с пальцем из титана наблюдался повышенный износ тормозного диска, после 10 циклов испытаний он составил около 10 мкм. Это произошло из-за относительно высокой твёрдости титанового пальца.

Эффект переноса наблюдался при испытаниях с алюминиевым, цинковым и оловянным пальцем (для предотвращения расплавления оловянного образца испытания проводились со скоростью скольжения 1 м/с). На рис. 4.33 показаны участки вдоль траектории движения пальца, покрытые тонким слоем алюминия, причём адгезионная связь с материалом диска достаточно прочная. Это позволяет сделать вывод о том, что компенсация износа тормозного диска таким способом возможна.

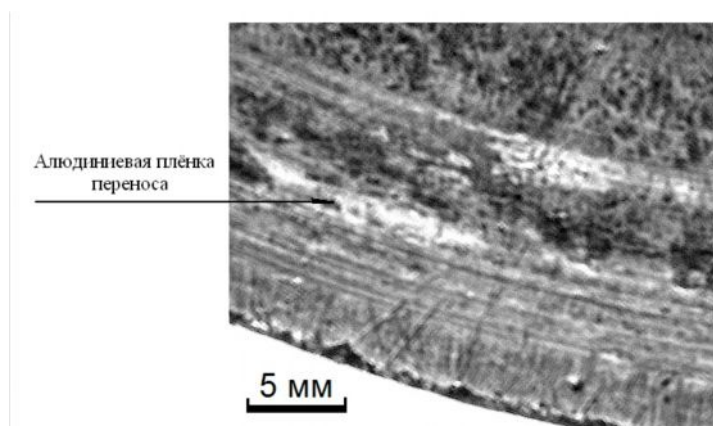


Рис. 4.33. Фотография фрикционного диска с участком покрытым алюминием

При исследованиях с алюминиевыми и цинковыми образцами после четырёх, пяти циклов испытаний появлялась ощутимая вибрация. Это объясняется нестабильностью коэффициента трения, так как перенос материала на диск на отдельных участках был неравномерный.

При скорости скольжения 3 м/с тепловыделение существенно увеличивалось, что приводило, по-видимому, к существенному росту температуры в контакте и как следствие повышению пластичности материала пальца. Так в результате алюминий деформировался и растекался под фрикционной накладкой (рис. 4.34), но прочных связей при этом не получилось.

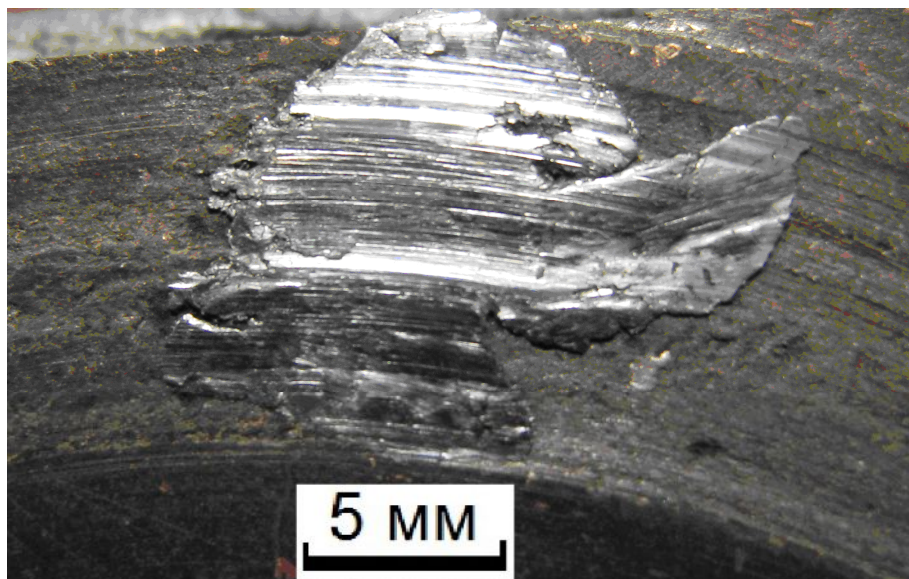


Рис. 4.34. Алюминиевая поверхность на фрикционной накладке

При скорости скольжения 2 м/с площадь алюминиевого пятна была существенно меньше, а при 1 м/с пятна практически не наблюдалось. После разборки узла трения и извлечения пальца была измерена толщина алюминиевого пятна на фрикционной накладке, она составила от 0,01 – до 0,015 мм.

Исследования показали, что компенсация износа тормозных дисков возможна, но для стабилизации процесса необходимо в состав фрикционного материала включать активаторы поверхности, обеспечивающие стабильные ад-

гезионные свойства контртела. Это обеспечит более равномерный перенос металла с полимерной накладки на фрикционный диск.

В качестве активатора поверхности в исследованиях использовался тетраборат натрия. Он размещался в специальном кармане перед пальчиковым образцом (рис.4.35).

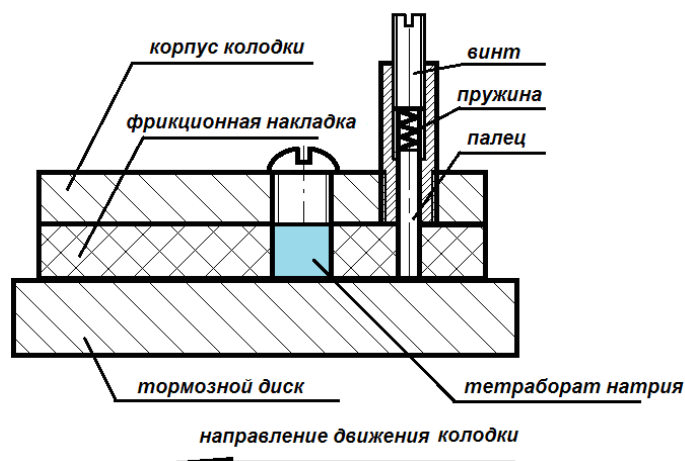


Рис. 4.35. Схема установки для испытаний с активатором поверхности

В результате использования активатора поверхности удалось получить более стабильный перенос металла с фрикционной накладки на тормозной диск (рис. 4.36).

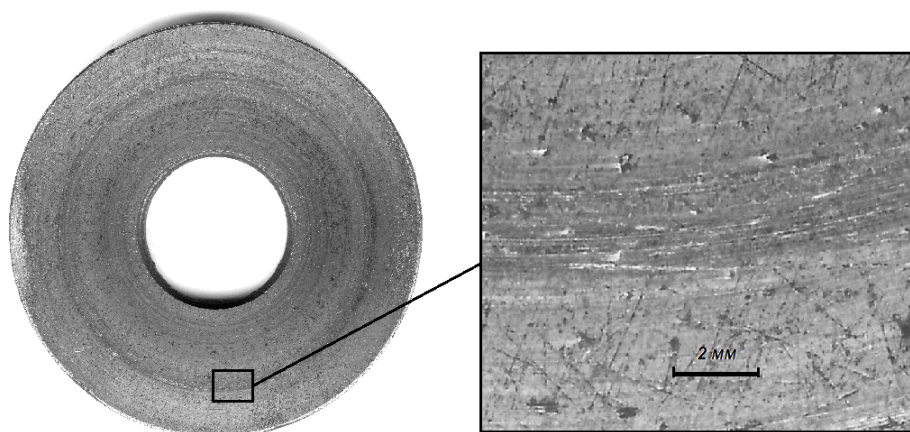


Рис. 4.36. Перенос металла на тормозной диск при испытаниях с активатором поверхности

Толщина слоя перенесённого металла, полученного в результате исследований, составила около 0.5 мкм и несколько отличалась на разных участках. Измерения толщины слоя проводились на микроскопе МИС 11.

На основе проведённых исследований был разработан фрикционный материал с улучшенными триботехническими свойствами, на который был получен патент RU 2457268 [5].

Наличие в предложенном составе тетрабората натрия, выполняющего функцию активатора поверхности и обеспечивающего очистку фрикционного диска от оксидных плёнок и других загрязнений позволяет за счёт управляемого соотношением компонентов переноса металла входящего в состав фрикционной накладки восстанавливать диск в процессе его работы. Наряду с эффектом восстановления наблюдается существенный рост коэффициента трения за счёт адгезионной составляющей, что обеспечивает при одинаковом усилии на фрикционную пару более эффективную передачу крутящего момента.

Разработанный материал содержит в весовых процентах железо $7\div 20$, графит $7\div 20$, электрокорунд $1,5\div 2,0$, ферромолибден $0,5\div 2$, олово $2\div 9$, тетраборат натрия $2\div 5$ и остальное медь. При содержании олова меньше 2% вес, стабильны эффект переноса не наблюдался, а при увеличении количества олова больше 9% вес проявлялся повышенный износ фрикционной накладки. Также и количество тетрабората натрия должно быть в указанных пределах. Если тетрабората натрия будет меньше 2% веса, стабильного эффекта переноса не наблюдается, а если тетрабората натрия будет больше 5% веса, то коэффициент трения уже не растёт и увеличивается износ фрикционной накладки.

За основу был принят известный материал по патенту RU № 2371497, предназначенный для накладок дискового тормоза, который изготавливают методом порошковой металлургии из металлических и неметаллических порошков: меди, олова, железа, графита, абразивного порошка электрокорунда, ферромолибдена, в который после спекания локально в предварительно обработанное отверстие вводили в виде отдельного элемента смесь олова и активатора поверхности тетрабората натрия.

Накладка представляет собой стальную основу с напрессованным и припеченным металлокерамическим фрикционным слоем, в котором обработано

отверстие и в него введён элемент, состоящий из смеси олова и тетрабората натрия, общая пропорция компонентов (в вес.%): медь – 73,5; олово – 5; железо – 5,6; графит – 10,4; электрокорунд – 1,5; ферромolibден – 1,5; тетраборат натрия – 2,5. Полученный материал обеспечивает повышение износостойкости фрикционного диска и повышение коэффициента трения:

- интенсивность линейного износа менее $2 \cdot 10^{-7}$
- коэффициент трения в зависимости от скорости 0,32-0,5

Представленные данные показывают, что использование предложенного состава материала обеспечивает повышение износостойкости фрикционного диска и повышение коэффициента трения. Результаты исследований представлены на графике (рис. 4.37), где кривая 1 – зависимость интенсивности линейного износа I_h от количества тетрабората натрия в %, а кривая 2 – зависимость коэффициента трения μ от количества тетрабората натрия в %.

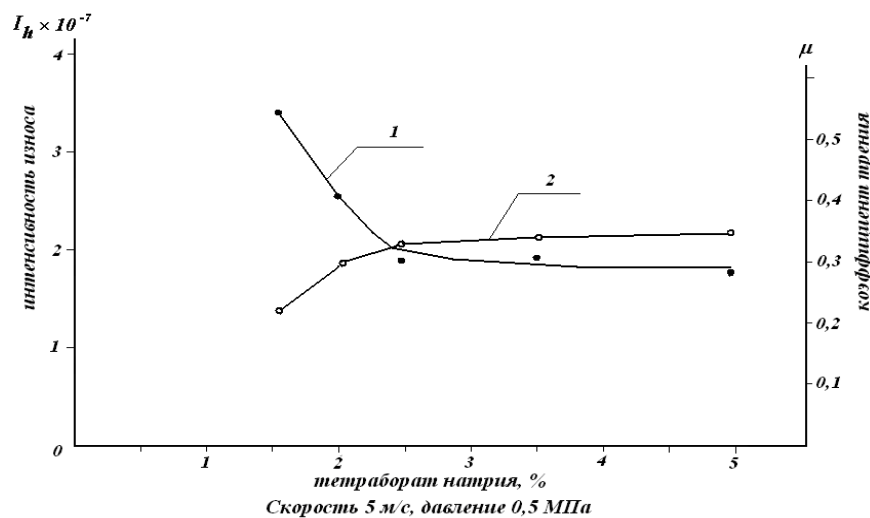


Рис. 4.37. Влияние количества тетрабората натрия на параметры трения

Кривая 1 показывает, что интенсивность линейного износа существенно снижается (от $3,6 \times 10^{-7}$ до $1,9 \times 10^{-7}$) в интервале от 2 до 3% тетрабората натрия, а при дальнейшем увеличении его содержания практически не изменяется.

Кривая 2 показывает, что коэффициент трения увеличивается с 0,28 при количестве тетрабората натрия 2% от общей массы фрикционного материала

до 0.34 при 3%, а при большем содержании тетрабората натрия существенно не растёт.

Исследования фрикционного материала показали, что использование разработанного материала в трибоузлах торфяных технологических машин позволяет увеличить ресурс ведомых дисков на 60%, с учётом их самовосстановления и снижения нагрузки из-за более высокого коэффициента трения, что обеспечивает снижение трудоёмкости ТО и ремонтов в среднем на 16 чел.час. за сезон.

4.6. ИССЛЕДОВАНИЕ МЕРОПРИЯТИЙ ПО МОДИФИКАЦИИ ТРИБОЭЛЕМЕНТОВ НА ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ

Эффективность предлагаемых мероприятий по улучшению параметров трибоэлементов торфяных машин проверялась на модели. Для определения зависимости изменения производительности уборочной машины МТФ-43А от увеличения цикла обслуживания трибоэлементов за счёт модификации с учётом их количества, требуется открыть программу анализа технического состояния торфяной машины (см. рис. 2.10), перейти на вкладку «Редактирование структуры», выбрать модифицируемый трибоэлемент (например, втулка и опорная ось балансира) и изменить интервал обслуживания, убрав галочки из раздела свойств «ТО-1» и «ТО2» (рис. 4.38).

После этого перейти на вкладку «Расчёт обслуживания» и ввести предшествующую наработку машины (см. рис. 2.9). Далее перейти на вкладку «Прогнозирование обслуживания» выбрать количество метеонеблагоприятных дней (см. рис.2.11) и запустить систему анализа.

По результатам моделирования система покажет количество часов работы машины и время нахождения в ТО и ремонтах.

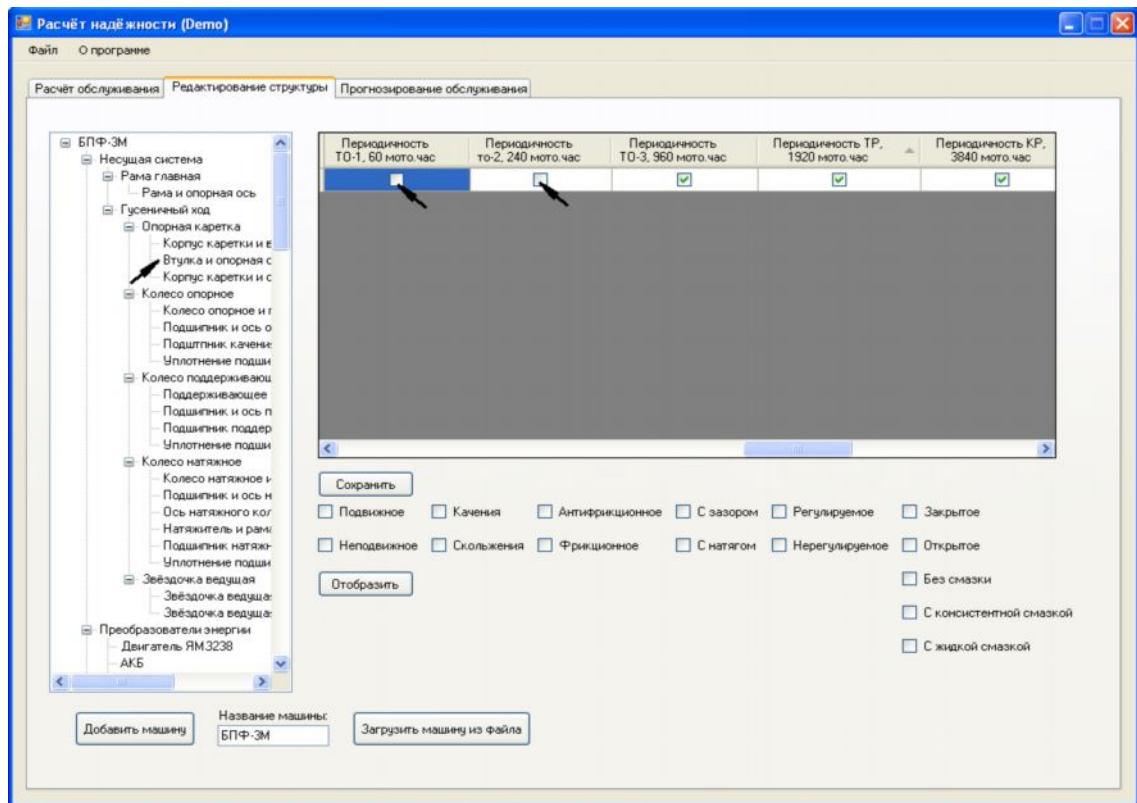


Рис.4.38. Диалоговое окно системы анализа технического состояния при изменении свойств модифицированных трибоэлементов

С помощью модели уборочной машины МТФ-43А был проведён анализ изменения сезонной производительности. На рисунке 4.39 показана зависимость изменения производительности Q (с наработкой 2000 мотоочасов с начала эксплуатации при 70 метеонеблагоприятных днях за сезон) при увеличении цикла обслуживания за счёт модификации трибоэлементов.

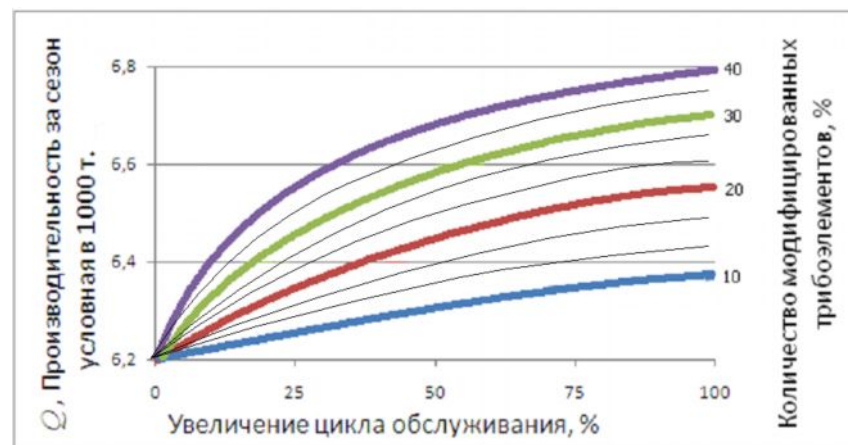


Рис. 4.39. Номограмма изменения производительности Q за сезон МТФ-43А за счёт модификации трибоэлементов

ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ

1. Анализ трибоэлементов торфяных машин показал, что имеются узлы, требующие частых сервисных работ. Для снижения объёма ТО необходима модификация трибоэлементов, обеспечивающая увеличение цикла обслуживания за счёт использования самосмазывающихся полимеров, магнитных смазок и материалов, обладающих самовосстановлением за счёт эффекта переноса.

2. 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%.

3. Модифицированный капролон-42 имеет пористую структуру, что позволяет за счёт капиллярного эффекта организовать подачу смазки на поверхность трения. Установлено, что использование смазки с различной вязкостью позволяет регулировать период обслуживания узла.

4. Модификация трибоэлементов за счёт магнитожидкостной смазки и магнитопорошковых уплотнений требует существенных дополнительных затрат, но не обеспечивает требуемой долговечности из-за коагуляции магнитных элементов смазки на частицах пыли, попадающих из окружающей среды.

5 РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ВОССТАНОВЛЕНИЕ ТРИБОЭЛЕМЕНТОВ МЕТОДОМ ПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ

5.1 РАЗРАБОТКА СПОСОБА ВОССТАНОВЛЕНИЯ ИЗНОШЕННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Чаще всего восстанавливают металлоемкие, дорогостоящие детали – корпуса торфяных фрез, коробок скоростей, раздаточных коробок, редукторов приводов технологических устройств, тормозные барабаны, фрикционные диски и другие [53]. При этом используются хорошо отработанные технологические способы ремонта, однако, они не всегда применимы в условиях небольших торфопредприятий из-за отсутствия сложного технологического оборудования.

После завершения сезона добычи торфяные машины проходят углублённую диагностику и анализ технического состояния с целью определения остаточного ресурса основных элементов и перспектив эксплуатации в следующем году. Узлы, у которых недостаточный ресурс разбираются, определяются годные детали, для негодных проводится дефектация, и ремонтпригодные элементы подвергаются восстановлению. Характерными дефектами деталей являются: износ, который связан с нарушением размеров, взаимного расположения и формы рабочих поверхностей, механические дефекты в виде остаточных деформаций, сколов, трещин, выкрашивания и повышенной шероховатости. Детали при эксплуатации под действием трения и других причин подвергаются нагреву, что приводит к изменению размеров, формы и взаимного расположения рабочих поверхностей, так же нарушается шероховатость поверхностей и снижается их прочность, ухудшаются некоторые триботехнические свойства рабочих поверхностей деталей. После дефектации определяются конкретные параметры износа, и устанавливается целесообразность восстановления деталей и выбирается метод ремонта [45, 46].

Все методы восстановления изношенных деталей можно разбить на две группы: методы наращивания и методы обработки. К методам наращивания можно отнести такие, при которых на изношенную поверхность детали наносятся другие материалы, в том числе полимерные. К таким методам относятся сварка, наплавка, металлизация, напыление, нанесение полимерных материалов и электролитических металлических покрытий.

Также для восстановления изношенных поверхностей сейчас широко используются эффективные комбинированные методы, которые сочетают в себе как обработку, так и нанесение материалов. В ремонтной практике торфяных и других предприятий достаточно часто используют сочетание методов пластического деформирования при восстановлении и других методов, например, обкатывание и электрохимическое покрытие, а также наплавка электродом и обкатывание шариками или роликами [63].

Наиболее перспективным методом восстановления является пластическое деформирование, так как данный метод не требует дорогостоящего технологического оборудования и значительных энергетических затрат.

В большинстве ремонтных технологий применяются две основных разновидности механической обработки давлением: горячая и холодная. Пластическое деформирование при восстановлении без нагрева происходит в результате вытеснения части деформируемого материала в зону изношенной поверхности. В большинстве случаев при этом в деформируемых слоях материала происходит существенное изменение механических свойств: пластические свойства металла снижаются, уменьшается предел текучести, а прочности и твердость несколько повышается [21, 22, 25, 93, 108].

В отличие от деформирования в холодном состоянии, обработка давлением с нагревом проводится при температурах несколько выше температуры рекристаллизации, что позволяет значительно увеличить масштаб деформаций при восстановлении деталей.

В зависимости от направления основного воздействия на деталь, пластическое деформирование бывает нескольких видов:

- осадка (для втулок, пальцев, зубчатых колес),
- раздача (для поршневых пальцев, пальцев кулисных механизмов),
- обжатие (для вкладышей подшипников, втулок),
- вдавливание (для зубчатых колес, шлицевых валов),
- правка (для гладких и коленчатых валов, осей и рычагов),
- накатка (для шеек и цапф валов).

В то же время, большое число компаний ведут разработки современных технологий для восстановления трущихся поверхностей методом пластического деформирования. Так, например, в Германии компания «Waller Krupp» создала эффективный технологический процесс, а также комплекс оснастки для восстановления поверхностей направляющих втулок клапанов для двигателей внутреннего сгорания. Данный метод основан на использовании специального твердосплавного ролика. С помощью него в отверстии направляющей втулки прокатывают паз спиральной формы. При деформации ролик вытесняет деформируемый материал в сторону уменьшения размера отверстия, в результате этого внутренний диаметр отверстия под стержень клапана становится существенно меньше. При дальнейшей механической обработке специальной разверткой достигается номинальный размер изношенной поверхности. Кроме того, спиральный паз остающийся после деформирования роликом, дополнительно обеспечивает сопряжение смазкой. Вследствие чего, зазор между стержнем клапана и направляющей втулкой можно уменьшить, что приводит к улучшению работы механизма и повышает срок эксплуатации трибосопряжения.

В прошлом многие отечественные и зарубежные учёные-трибологи исследовали проблемы в области изучения влияния микро- и макрорельефа на триботехнические свойства узлов трения. В работе [106] определялись основные геометрические параметры шага и размеров канавок на поверхностях трения для обеспечения оптимальной смазки узлов.

Наличие дополнительных масляных карманов, чаще всего, обеспечивает предотвращение схватывания контактных поверхностей трибопары и облегча-

ет удаление продуктов износа, также по мере её срабатывания смазки дополнительно питает фрикционный контакт. Таким образом, рельеф, появляющийся на восстановленной поверхности детали, может существенно улучшать триботехнические характеристики узла [78].

Используемые до настоящего времени методы восстановления изношенных поверхностей пластической деформацией в большинстве случаев требуют последующей механической обработки, что приводит к значительным потерям металла. Этого недостатка не имеют методы восстановления поверхностей с помощью накатки с использованием электрического разогрева. Такие методы обеспечивают получение номинальных размеров деталей без удаления вытесненного материала. Вытесненные при восстановлении излишки металла, обратно вдавливаются в деталь, приводя к увеличению площади контактной поверхности. Однако, применение обкатывания роликами после проведения холодного деформирования малоэффективно, потому, что в этом случае может преодолеваться предел прочности восстанавливаемого материала и наступает его разрушение.

Используемые в настоящее время методы восстановления пластическим деформированием изношенных поверхностей имеют существенные недостатки. Наиболее значительный недостаток, тормозящий развитие современного ремонтного производства, это использование трудоёмких технологических процессов восстановления, основанных на использовании высокоточного, дорогостоящего оборудования [96]. В настоящее время наиболее актуальны методы ремонта, которые могли бы позволить в условиях относительно небольших торфяных предприятий производить восстановление сложных дорогостоящих деталей на принципиально новом уровне, с использованием относительно несложных устройств [5]. Способ восстановления локально изношенных поверхностей скольжения (методом пластического деформирования по прилегающей (кондукторной) поверхности - ПДКП), разработанный в диссертации, наиболее полно удовлетворяет современным требованиям при ремонте и эксплуатации торфяных

технологических машин, как по затратам, так и по условиям применения [55-58].

Теоретический анализ разработанного способа восстановления проводился на основе известных закономерностей, полученных до настоящего времени, как в области пластического деформирования, так и в трибологии, однако их прямое применение невозможно без новых приёмов при решении задач восстановления работоспособности торфяных технологических машин [7, 87].

Основная цель исследования — это формирование нового направления в области восстановления изношенных контактных поверхностей скольжения, на основе которого требуется обеспечить требуемые геометрические параметры трибоузла и приобретением им качественно новых триботехнических свойств.

Восстановление изношенной поверхности предлагается осуществлять за счет объединения участков полученных в результате местного деформирования в установленных точках поверхности детали. Принципиальная схема восстановления показана на рис. 5.1 [150].

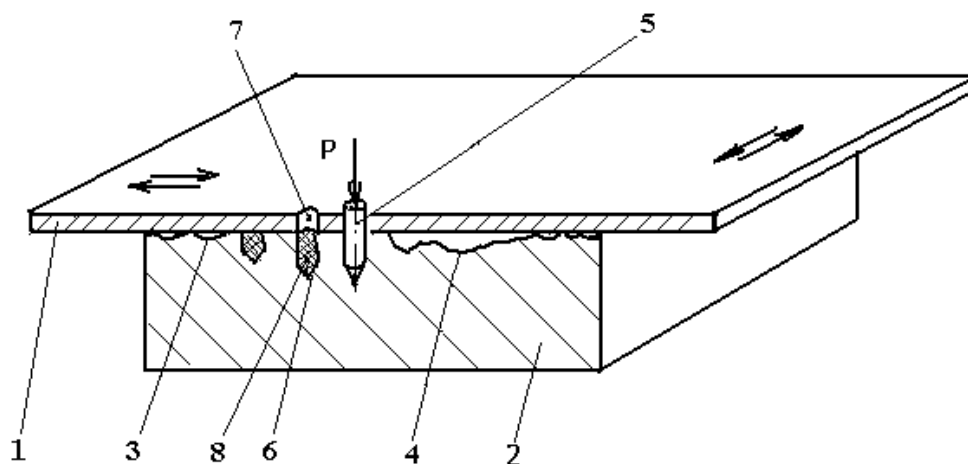


Рис. 5.1. Принципиальная схема способа восстановления локально изношенной поверхности

Разработанный способ восстановления осуществляется таким образом. На первом этапе ограничитель деформации 1 (кондуктор, имеющий размеры и форму номинальной поверхности) размещают на детали 2, чтобы калибрующая поверхность заняла положение, соответствующее номинальному контуру.

Затем снимают топограмму поверхности (трёхмерную модель) изношенной части 4 с помощью индентора 5.

На основе анализа топограммы изношенной поверхности определяют положение точек внедрения, а также их величину. Далее с помощью усилия P внедряют индентора 5 в изношенную поверхность, получая углубления 6, в результате этого участки деформированной поверхности поднимаются до упора в кондукторную поверхность, образуя номинальный профиль, не требующий механической обработки. После завершения деформирования, отверстия от индентора 6 через канал 7 заполняют консистентным антифрикционным материалом (например, УП-5-222) 8 и снимают ограничитель 1 с детали 2. В результате последовательного деформирования и заполнения отверстий от индентора антифрикционным материалом формируется композиционная поверхность с абсолютно новыми триботехническими свойствами.

Для деформирования материалов имеющих ограниченную пластичность, а также ремонта деталей с большим износом способ восстановления был усовершенствован и для его реализации разработано и запатентовано устройство (рис. 5.2).

В отличие от способа восстановления показанного на рисунке 5.1 в усовершенствованном способе изношенная поверхность предварительно деформируется выдвижным упором для создания пластического ядра, которое позволяет достигать эффекта повышенной пластичности даже для материалов с ограниченной пластичностью (таких как чугун), а также проводить деформацию с большими масштабами (восстановление поверхностей с износом более 0,2 мм). На следующем этапе деформирование осуществляется индентором 6, с одновременным перемещением выдвижного упора в исходное положение [151]. В остальном способ восстановления реализуется аналогично предыдущему.

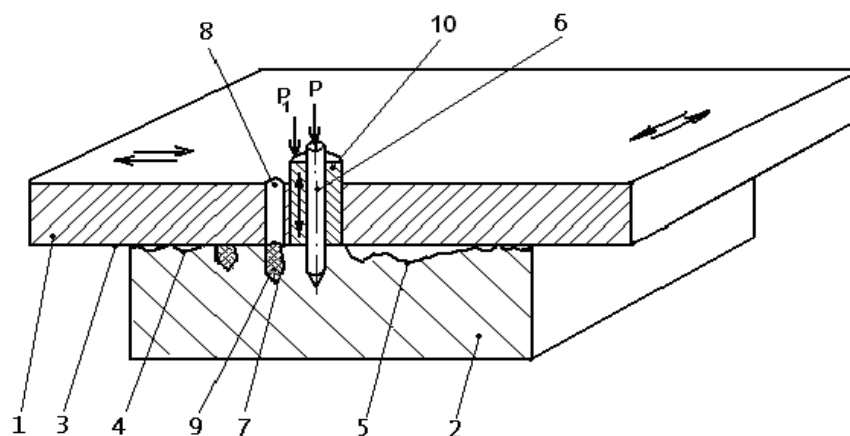


Рис. 5.2. Принципиальная схема способа восстановления локально изношенной поверхности корпусных деталей, изготовленных из пластичных материалов и материалов с ограниченной пластичностью, и устройство для его реализации. Патент RU 2447981 С2, МПК В23Р 6/00

(1 – деталь, 2 – кондуктор, 3 – базовая поверхность, 4 – поверхность детали не требующая восстановления, 5 – изношенная поверхность, 6 – индентор, 7 – углубление от индентора, 8 – отверстие для заполнения полимером, 9 – антифрикционный материал, 10 – выдвигной упор)

Предлагаемым способом ремонта на основе пластического деформирования и получения композиционной структуры можно осуществить качественное восстановление изношенных поверхностей деталей торфяных машин.

Износ распределяется на поверхности трения неравномерно [112], следовательно, деформацию необходимо увязывать с величинами износа в каждой точке.

Перед тем как проводить эксперимент для различных материалов, требуется с помощью уже известных методов анализа получить верхнюю границу требуемого усилия достаточного для проведения деформации в нужном объёме для изношенной части поверхности трения [4, 191, 192]. Одним из требований к восстановлению локального участка является то, что площадь полученной номинальной поверхности должна быть больше площади поперечного сечения индентора в 4-5 раз. Определённое на основе анализа теоретической модели сила, необходима для установления силовых

параметров разрабатываемого устройства для восстановления конкретного трибоэлемента ТМ.

В разработанном способе восстановления локально изношенных деталей, с помощью пластических деформаций по прилегающим кондукторным поверхностям, основным отличием от уже известных технологий [96] является то, что вытесняемый при деформировании индентора материал, ограничивается кондукторной поверхностью, соответствующей форме и размерам номинальной поверхности детали. Калибрующая поверхность, обладает достаточно высокой точностью размеров и формы, а также соответствующую шероховатость, это позволяет получать реконструируемую поверхность нужного качества и без последующей механической обработки. Особенно важно, что полученная шероховатость восстановленной поверхности детали имеет достаточно сглаженные вершины, что имеет положительный эффект при трении и обеспечивает улучшенные характеристики трибоузла [25, 59].

В исследуемой задаче формирования локально изношенной поверхности возникает сложное пластическое состояние, которое можно охарактеризовать неоднородными полями напряжений, деформаций, скоростей, температур, а также упрочнением, структурными изменениями и определёнными граничными условиями [160, 170. 205]. Провести анализ процесса пластического деформирования можно на основе результатов лабораторного эксперимента с использованием моделирующего ПДКП устройства [25, 31], а также расчетно-аналитическим методом [54, 81, 115, 189, 204, 208, 209]. Анализ на основе уравнений, описывающих процесс деформирования материала, мог бы обеспечить достаточно широкую картину изучаемого процесса пластического течения, но в тоже время математические трудности при осуществлении такого подхода могут привести к необходимости выявления ряда ограничений и допущений (деформируемый материал принимается жестко-идеально-пластическим, линии полей скольжения выходят на свободную поверхность под углом 45^0). Решение, полученное на основе этих допущений, является ме-

нее общим, но может использоваться для получения закономерностей в конкретной задаче [7, 72, 87, 191].

Так как пластические деформации в рассмотренном решении несопоставимо больше упругих, поэтому последними можно пренебречь. Материалы, используемые для изготовления поверхностей скольжения (алюминиевые и медные сплавы, малоуглеродистые стали и др.) [72] имеют относительно невысокое деформационное упрочнение, что позволяет их представлять как жестко-идеально-пластичную среду, подверженную пластическому течению практически при одинаковом напряжении k (при сдвиге) или Y (при растяжении или сжатии). На основе анализа с помощью энергетического метода можно определить давление на рабочую часть индентора используя выражение:

$$q/2k = 0,5 \left(\sum v_i l_i + 2\mu \sum v_j l_j \right), \quad (5.1)$$

где l_i , l_j и v_i , v_j безразмерные длины линий скольжения и скорость движения жестких блоков. Данные величины могут быть легко определены из кинематически возможных полей линий скольжения блоков и соответствующих планов скоростей [4].

Теоретическое решение задачи по восстановлению изношенной поверхности производилось на основе закономерностей, полученных для плоской задачи, если принять индентор в виде плоского клина. Параметры процесса пластического деформирования определялись на основе анализа возможных полей линий скольжения, соответствующих условиям восстановления в локальной точке износа по прилегающей поверхности, и плана скоростей движения блоков. Анализ соответствующих полей линий скольжения и закономерности для плоской задачи при внедрении клина в идеально-жестко-пластичский материал, позволили определить величину максимального контактного давления на рабочей поверхности индентора.

При решении поставленной задачи должны выполняться ряд условий: условие пластичности (критерий Треска), сетка полей линий скольжения

должна соответствовать напряженному состоянию материала, отвечающему основным дифференциальным уравнениям равновесия [191] и условиям на границах деформируемого полупространства (направление линий скольжения во всех рассматриваемых точках должно совпадать с направлением главного касательного напряжения).

Анализ поставленной задачи необходимо проводить в два этапа. На первом определяется давление на рабочую поверхность индентора до наступления момента касания деформируемым материалом ограничивающей кондукторной поверхности. Второй этап начинается с началом формирования восстановленной поверхности при достижении материалом ограничивающей кондукторной поверхности.

Анализ параметров на первом этапе деформирования позволяет определить давление на клин и необходимую силу для внедрения индентора на соответствующую глубину, а также форму деформированной поверхности.

Для анализа был принят клин с углом полураствора 45° , что обеспечивает совпадение линии скольжения с гранью клина.

Кинематически возможное поле линий скольжения для первого этапа деформирования показано на рис. 5.3.

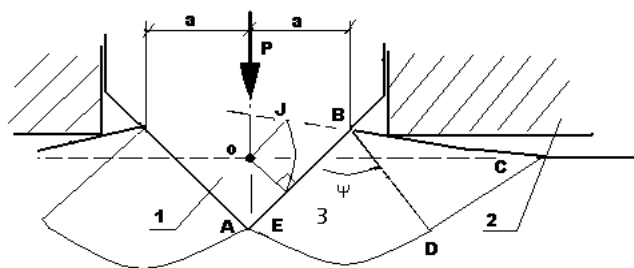


Рис. 5.3. Возможное поле линий скольжения для первого этапа деформирования восстанавливаемой поверхности.

(1—индентор, 2—кондукторная поверхность, 3—деформируемый материал)

Анализ давления на рабочей поверхности проводился на основе энергетического метода [4]. Этот метод основывается на экстремальных принципах теории пластичности. При этом действительное поле линий скольжения заменяется более простым полем, которое состоит из отдельных жестких блоков,

удовлетворяющих принятым граничным условиям, как по скоростям, так и по перемещениям.

Потребная мощность при такой схеме деформирования, несколько превышает значение действительной мощности сил для формоизменения, соответственно, давление в этом случае, является верхней границей их реального значения.

Эквивалентная схема кинематически возможного поля линий скольжения представлена на рис. 5.4. Принято поле линий скольжения, состоящее из треугольных блоков, позволяющих определить контактное давление на рабочую поверхность индентора для первого этапа внедрения. На рис. 5.4 индентор 1, внедряемый в материал, угол его полураствора 45° , при этом линии скольжения между принятым индентором и жестким блоком 2 совпадают с образующей клина.

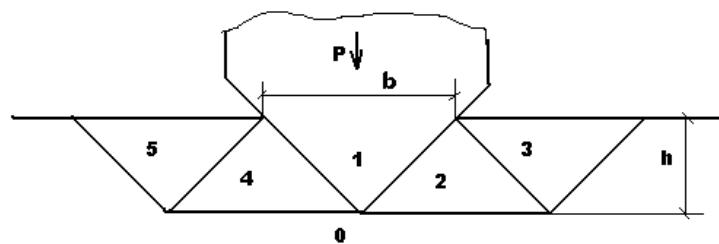


Рис. 5.4. Кинематически возможное поле линий скольжения для первого этапа деформирования

h - глубина внедрения индентора, b - размер проекции контактной поверхности. Если размер проекции контактной поверхности принять за единицу ($b=1$), то все необходимые значения длин линий скольжения l_{ij} выражаются через её длину (i и j – номера блоков). Жесткие блоки 2, 3, 4, 5, являются равнобедренными треугольниками с основанием b , значит

$$l_{0,4} = l_{0,2} = b = 1, \quad (5.2)$$

$$l_{0,5} = l_{4,5} = l_{1,4} = l_{1,2} = l_{3,2} = l_{3,0} = \sqrt{2}/2. \quad (5.3)$$

Скорости относительного движения жестких блоков определены исходя из плана скоростей (рис. 5.5) для первого этапа внедрения индентора. V - скорость внедрения индентора, если принять её за единицу, то искомые величины разрыва скоростей между соседними блоками будут:

$$V_{1,2} = V_{1,4} = \sqrt{2}, \quad (5.4)$$

$$V_{0,4} = V_{0,2} = 1, \quad (5.5)$$

$$V_{4,5} = V_{5,0} = V_{0,3} = V_{2,3} = \sqrt{2/2}. \quad (5.6)$$

Из выражения 5.1 получим:

$$\begin{aligned} q/2k &= 0,5(V_{0,4} l_{0,4} + V_{0,2} l_{0,2} + V_{4,5} l_{4,5} + V_{5,0} l_{5,0} + V_{0,3} l_{0,3} + V_{2,3} l_{2,3} + 2\mu(V_{1,2} l_{1,2} + V_{1,4} l_{1,4})), \\ q/2k &= 0,5(4 + 4\mu), \\ q &= 4k(1 + \mu), \end{aligned} \quad (5.7)$$

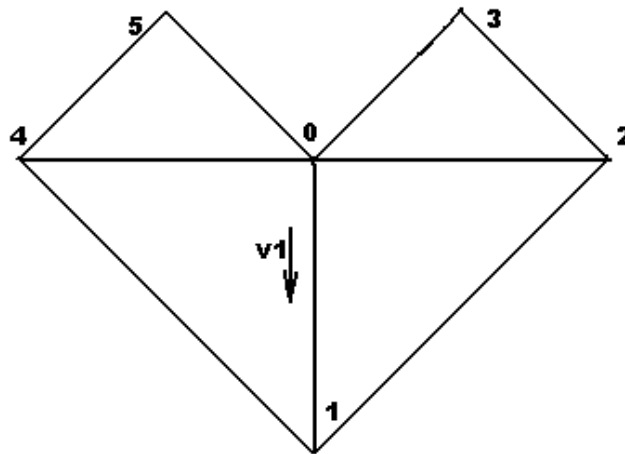


Рис.5.5. Принятый план скоростей движения блоков на первом этапе внедрения

Если глубину внедрения увеличить, то начинается второй этап деформирования восстанавливаемой поверхности. После чего вытесненный в свободную зону деформируемый материал упирается кондукторную поверхность.

При больших значениях износов индентор выходит цилиндрической частью из ограничивающей кондукторной плиты, в результате этого скольжение деформируемого материала происходит не только по рабочей

поверхности индентора, но и по его цилиндрической части. Поле скольжения для этого случая представлено на рис.5.6.

Жесткий блок 4 остаётся неподвижным относительно прилегающей поверхности кондукторной плиты 5, а относительное скольжение блоков 4 и 3 происходит по линии, которая продолжает линии скольжения относительно индентора 1 и блоком 2.

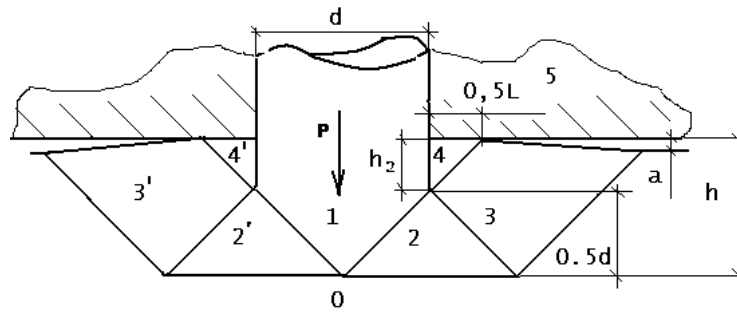


Рис. 5.6 Кинематически возможное поле линий скольжения после выхода цилиндрической части индентора из прилегающей кондукторной плиты (1– индентор, 5 – кондукторная плита, 2 ... 4' - блоки равных скоростей и перемещений, d – диаметр индентора, h – глубина внедрения, a – восстанавливаемый зазор)

При увеличении h глубины внедрения увеличивается L - протяженность восстановленной поверхности. В этом случае давление на рабочую поверхность индентора будет по формуле (5.1).

$$\text{При } l_{12} = l_{23} = b\sqrt{2/2}, b = d=1, l_{02} = 1, l_{34} = 0,5 h_2/\sqrt{2} = h_2/\sqrt{2},$$

$$l_{30} = l_{12} + l_{43} = \sqrt{2/2} + h_2/\sqrt{2},$$

разрывы скоростей между соседними жесткими блоками определены на основе плана скоростей на рис.5.5.

$$V_{14} = V_{01} = V_{02} = V_1 = 1, V_{12} = \sqrt{2}, V_{03} = V_{32} = V_{43} = \sqrt{2/2}.$$

Контактное давление будет:

$$q/2k = 0.5 (V_{02}l_{02} + V_{23}l_{23} + V_{03}l_{03} + V_{43}l_{43} + 2\mu(V_{12}l_{12} + V_{14}l_{14})) 2,$$

$$\begin{aligned} q/2k &= 2 + h_2 + 2\mu(1 + 0.5h_2), \\ q &= 2k(2 + h_2 + 2\mu(1 + 0.5h_2)). \end{aligned} \quad (5.8)$$

Полученное выражение на основе плоской задачи, не подходит в полной мере для конического индентора, но многие исследователи применяли данный для решения осе симметричных задач. Шилд [184] определил, в том случае если материал находится в состоянии развитого пластического течения, то можно получить соответствующее возможное поле линий скольжения, которое определяет напряженное состояние. Данное поле должно согласовываться с принятым планом скоростей. Также Локетт строил возможные поля линий скольжения для жесткого гладкого конуса, внедряемого в жестко-идеальнопластическое полупространство. Полученное возможное поле линий скольжения в основном подобно полю для плоского клина, но сами линии скольжения, и профиль деформированной свободной поверхности уже не являются прямолинейным. На основе предложенной модели поля линий скольжения, Локетт установил контактное давление на рабочей поверхности конуса. Однако, величина среднего давления на рабочую поверхность конуса оказалось несколько выше чем у клина, кроме того значение давления несколько изменялось в разных уровнях сечения конуса [118, 128].

Предлагаемый в диссертационном исследовании процесс восстановления, имеет общее сходство с процессом глубокой прошивки металла, который подробно исследовался А.Д. Томленовым [191]. В своём исследовании он представил подробные расчеты контактного давления для различных глубин внедрения пуансона. По работам А.Д. Томлёного максимальное давление на рабочую поверхность пуансона возникает при полном его внедрении, когда линии скольжения не выходят на свободную поверхность деформируемого материала. Соответственно при увеличении глубины внедрения давление не растёт. Данная гипотеза подтверждается экспериментальными исследованиями. Также было установлено, что на усилие прошивки влияет трение деформи-

руемого материала по цилиндрической части пуансона, поэтому для исключения данного фактора их делают с меньшим сечением за основанием.

Исходя из этих данных при восстановлении, давление на контактную поверхность индентора растёт до момента начала формирования реконструируемой поверхности, до касания ограничивающего кондуктора, в этом случае достигается величина некоторого гидростатического давления под прилегающей поверхностью, а сила внедрения растёт только за счет силы трения по цилиндрической части индентора.

Значение давления на рабочей поверхности индентора до момента контакта деформируемой поверхности с ограничивающей поверхностью по формуле (5.7), будет

$$q = 4k(1 + \mu) . \quad (5.9)$$

Определив значение контактного давления $q_{ц}$, величину активной площади индентора $S_{ц}$, а также коэффициент пластического трения μ можно получить силу трения P_t по цилиндрической части индентора. Так как при касании деформируемым материалом прилегающей поверхности давление на индентор достигает максимального значения (5.7), и материал не сжимаем, следовательно, на цилиндрической части оно будет

$$q_{ц} = 4k. \quad (5.10)$$

Площадь цилиндра индентора $S_{ц}$ будет

$$S_{ц} = \pi d h_2,$$

где d – диаметр индентора, h_2 – величина цилиндрической части индентора вышедшая из кондукторной поверхности.

В этом случае глубина внедрения индентора h на втором этапе деформирования будет состоять из двух величин – высоты конуса h_k и длины цилинд-

рической части, выходящей из прилегающей поверхности. Если угол полураствора конуса 45^0 , то $h_k = 0.5d = 1$ при $d=2\text{мм}$, тогда

$$h_2 = h - h_k. \quad (5.11)$$

В этом случае глубина внедрения индентора будет пропорциональна величине восставленного участка $h_2 = 0.5L$. При этом значение коэффициента трения меняться, от 0,5 максимального значения до значения соответствующего для исследуемых материалов. Эти значения определяются различными методами, некоторые из них представлены в книге [191].

Соответствующая сила трения P_T на цилиндрическую часть индентора будет

$$P_T = \mu q_{\text{ц}} S_{\text{ц}} = \mu 4k 2\pi r h_2. \quad (5.12)$$

Суммарная сила внедрения P рассчитывается как сумма максимальной P_M (сила внедрения на первом этапе деформирования), и силы трения P_T , на втором этапе

$$P = P_M + P_T,$$

где $P_M = qS_k = 4k(1+\mu)\pi r^2 \sqrt{2}$, $S_k = \pi r^2 \sqrt{2}$ – площадь конической части индентора для угла полураствора конуса 45^0 :

$$P = 4k\pi r (r\sqrt{2} (1 + \mu) + 2\mu h_2). \quad (5.13)$$

Для анализа полученного выражения требуется установить зависимости глубины внедрения от силы и сравнить их с эмпирически полученными данными. Для сравнимости теоретических и эмпирических зависимостей требуется их получить, используя результирующие характеристики в безразмерных величинах. Для этого глубину внедрения нужно выразить через относительное внедрение δ :

$$\delta = h/d. \quad (5.14)$$

Силу внедрения нужно выразить через относительную силу Δ полученную как отношение соответствующей силы внедрения P к величине P_0 , выбранной по результатам исследования, так чтобы она была однозначно получена как теоретически, так и эмпирически

$$\Delta = P/P_0. \quad (5.15)$$

Для конкретных исследований приняты следующие значения

- зазор между восстанавливаемой поверхностью и ограничивающим кондуктором, a равен 0.1мм,
- величина P_0 при h равной 0.5мм.

Для теоретического решения приняты упрощения, так, например, при анализе параметров зоны деформации и не учитывалось выпучивание свободной поверхности. Следовательно, при расчёте величины P_0 теоретически глубина внедрения $h=0.5$, а глубина фактического контакта h_k будет несколько большей (рис.5.7), данная величина была определена эмпирически.

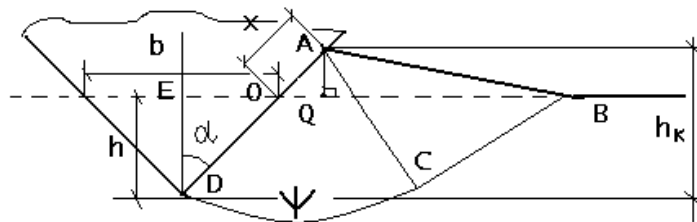


Рис. 5.7. Схема определения фактической глубины контакта

$$S_k = \pi r(\sqrt{r^2 + h_k^2}) = \pi 0.65(\sqrt{0.65^2 + 0.65^2}) = 0.42\pi\sqrt{2}, \quad (5.16)$$

$$P_0 = qS_k = q0.42\pi\sqrt{2}, \quad (5.17)$$

где r – радиус основания конуса, h_k – высота конуса, q – контактное давление.

Выбирая глубину внедрения и определяя соответствующую силу внедрения (таб.5.1) был получена теоретическая зависимость этих величин для первого этапа внедрения.

Таблица 5.1

Зависимость силы внедрения P от глубины внедрения h полученная расчётом на первой стадии деформирования (q – контактное давление на рабочую поверхность индентора).

$h_{\text{мм}}$	0.2	0.4	0.6	0.8	1
P	$0.04q\pi\sqrt{2}$	$0.16q\pi\sqrt{2}$	$0.36q\pi\sqrt{2}$	$0.64q\pi\sqrt{2}$	$q\pi\sqrt{2}$

Аналогично получена зависимость для второго этапа внедрения индентора, также был осуществлён переход к относительным величинам (таб.5.1).

Таблица 5.2

Зависимость относительной силы $\Delta=P/P_0$ от относительной глубины внедрения $\delta=h/d$ на первой стадии деформирования полученная расчётом (d – диаметр индентора 2 мм).

h/d	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
P/P_0	0.1	0.38	0.86	1.52	2.4

После начала второго этапа деформирования пластическая зона будет соответствовать варианту, представленному на рис. 5.6. Соответствующее давление на рабочую поверхность индентора можно вычислить по формуле (5.8).

Если принять значение коэффициента пластического трения $\mu=0.5$ (максимальное) то получим,

$$q = 6k + 3k h_2. \quad (5.18)$$

Установив значение контактного давления и площадь рабочей поверхности индентора S_k , для выбранной глубины внедрения h_2 на втором этапе деформирования получим зависимость силы внедрения P_2 от глубины соответствующей глубины h_2 (таб. 5.3)

$$P_2 = S_k q = \pi\sqrt{2} (6k + 3k h_2). \quad (5.19)$$

Таблица 5.3

Зависимость силы внедрения P_2 от глубины h_2 на втором этапе деформации

$h_2 \text{ мм}$	0.2	0.4	0.6	0.8	1
P_2	$29.3k$	$32k$	$34.6k$	$37.3k$	$40k$

Если использовать безразмерные величины, то зависимость силы внедрения от глубины будет соответствовать значениям в таблице 5.4.

Таблица 5.4

Зависимость относительной силы внедрения от относительной глубины на втором этапе деформации

h_2/d	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
P_2/P_0	2.6	2.8	3	3.3	3.5

Если предположить, что процесс деформации при восстановлении локально изношенной поверхности соответствует условиям прошивки [191], то давление на рабочую поверхность индентора достигает максимального значения (выражение 5.7), а после этого увеличиваться не будет. Тогда сила внедрения будет увеличиваться только из-за трения по цилиндрической части индентора, и значение силы внедрения будет

$$P_2 = 4k(1 + \mu)\pi r^2 \sqrt{2} + \mu 4k 2\pi r h_2 \quad (5.20)$$

$$P_2 = 26.7k + 12.6k h_2,$$

если принять $\mu = 0.5$, $d = 2\text{ мм}$ для рассматриваемого случая.

На основе выражения (5.16) определим зависимость силы внедрения P_2 от соответствующей глубины h_2 (таб. 5.5).

Таблица 5.5

Зависимость силы внедрения P_2 от соответствующей глубины h_2 на втором этапе деформирования по выражению (5.16)

$h_2 \text{ мм}$	0.2	0.4	0.6	0.8	1
P_2	27.9k	29.1k	30.3k	31.7k	32.9k

В безразмерных величинах зависимость силы внедрения P_2 от соответствующей глубины h_2 показана в таб. 5.6.

Таблица 5.6

Зависимость относительной силы внедрения от относительной глубины внедрения на втором этапе деформации для выражения (5.16)

h_2/d	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
P_2/P_0	2.47	2.57	2.68	2.8	2.9

Проверку представленных зависимостей необходимо осуществить с помощью дополнительного исследования с использованием систем автоматизированного инженерного анализа, и эмпирического исследования.

На основе анализа полученных результатов можно начать разработку деформирующего приспособления для восстановления изношенной поверхности в локальной точке.

5.2. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВОССТАНОВЛЕНИЯ ПЛАСТИЧЕСКИМ ДЕФОРМИРОВАНИЕМ

Основная цель данного исследования – проверка гипотезы, принятой для анализа силовых параметров разрабатываемого процесса восстановления пластическими деформациями с прилегающей кондукторной поверхности.

Решалась задача в осесимметричной постановке при вдавливании конического индентора в упругопластическое полупространство.

Исходные данные:

- абсолютно жесткий конус с углом при вершине 90 градусов вдавливается вертикально вниз в полупространство 0,1 м на 0,1 м;
- диаметр основания клина 0,002 м, высота вершины клина составляет 0,001 м;
- характеристики материала (сталь 17ГС): модуль упругости 2×10^5 МПа, коэффициент Пуассона 0,45, предел текучести 340 МПа, предел прочности 500 МПа, относительное удлинение 0,23;

- введена контактная пара – абсолютно жёсткая ограничивающая прилегающая поверхность, установленная с зазором относительно деформируемого тела;
- учитывалось трение, коэффициент составлял от 0,15 (проверялось влияния на процесс пластического деформирования);
- для моделирования устранения дефектов к модели была добавлена вогнутость (гладкий вырез), которая должна устраниться в процессе вдавливания;
- полупространство закреплено через боковые грани в радиальном и вертикальном направлении, и в вертикальном направлении по нижней грани;
- верхняя грань имеет ограничивающую поверхность, установленную с зазором (на цветовых диаграммах прилегающая поверхность показана, синей линией).

Задача была решена в 85 неравных шагов. Все диаграммы представлены в порядке возрастания относительной глубины h/R (R радиус конуса) и составляют соответственно: 0,05; 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; 1 и далее.

Результаты приведены в виде цветовых полей с легендой внизу. В приложении 8 представлена серия диаграмм для распределения эквивалентных напряжений по Мизесу по нескольким стадиям внедрения, а на рис. 5.8 и 5.9 показано формирование пластического ядра в начале и в конце процесса деформирования.

В приложении 9 приведены эпюры распределения нормальных давлений по всем контактным парам (клин - тело и ограничивающая поверхность - тело), а на рис. 5.10 *а – в* показано изменение нормальных контактных давлений в начале, средней части и в конце деформирования.

В приведённом случае пределу текучести на легенде соответствует число «.185E+09» - то есть 185 МПа. Следовательно, ядро пластичности можно определить полями соответствующих цветов.

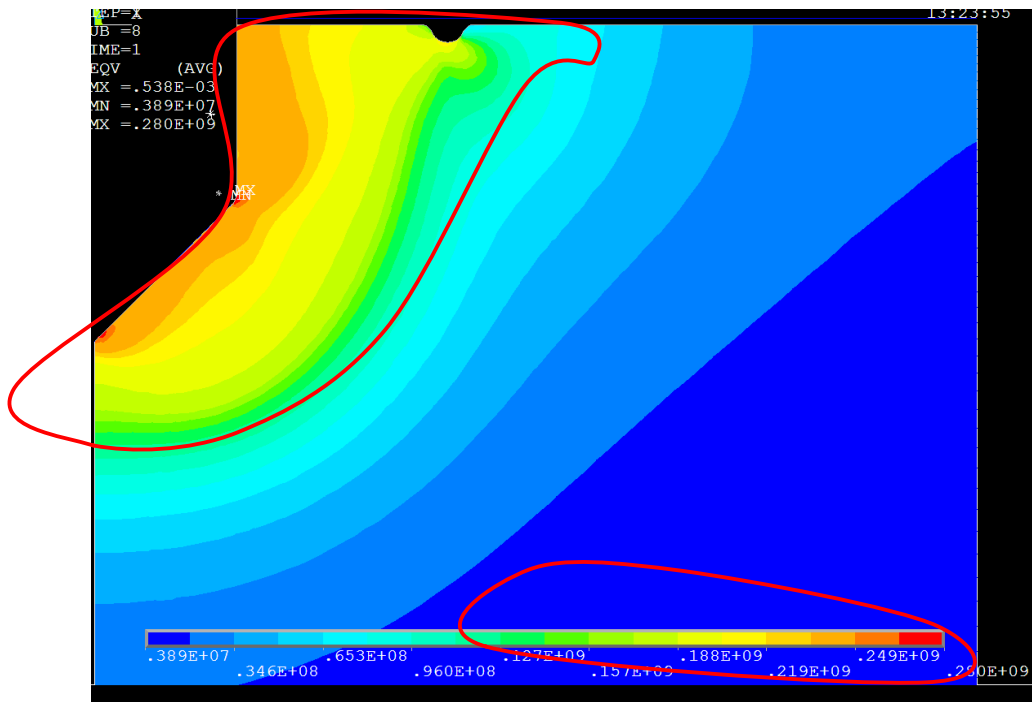


Рис. 5.8. Развитие пластического ядра на начальной стадии деформирования

По представленным диаграммам распределения эквивалентных напряжений по Мизесу видно, что при достижении некоторой глубины внедрения на конической части индентора развивается максимальное давление (около 250 МПа). И при дальнейшем внедрении оно не растёт, а увеличивается размер пластического ядра (обведён замкнутыми линиями на рис. 5.8 и 5.9).

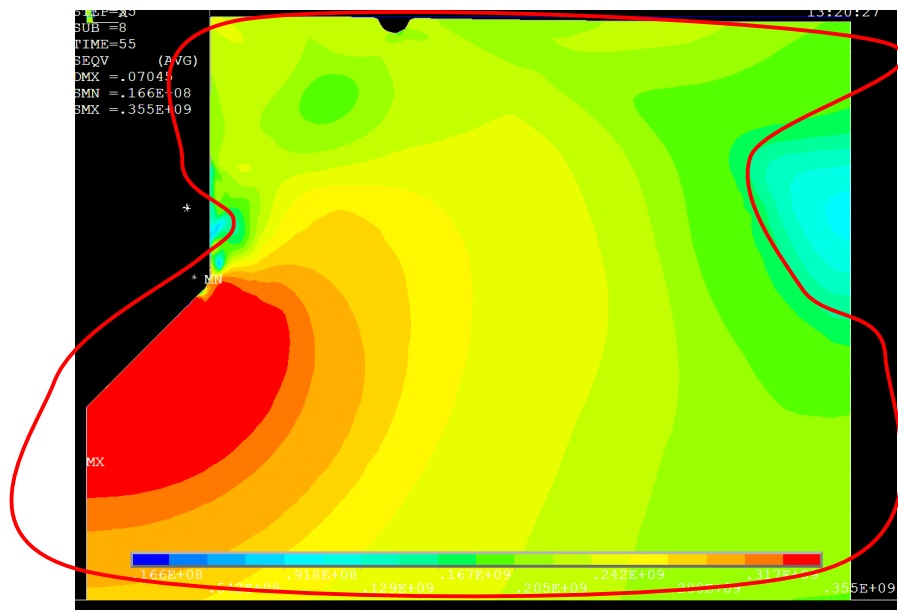


Рис. 5.9. Развитие пластического ядра на конечной стадии деформирования

В соответствии с принятой гипотезой материал плавно заполняет весь зазор в направлении от отверстия под индентор к периферии, наблюдается волна пластически текучего материала, движущегося от пластического центра.

Это соответствует выводам профессора Томлёнова [192], для развитого пластического течения в процессе глубокой прошивки металла и гипотезе выдвинутой при разработке теоретической модели описанной в разделе 5.1.

На диаграммах распределения нормальных контактных давлений видно, что сначала давление на коническую часть индентора растёт (рис. 5.10 *а* и *б*), а при дальнейшем внедрении снижается (рис. 5.10 *в*). Значит на процесс пластического деформирования оказывают значительное влияние касательные напряжения возникающие от сил трения между деформируемым материалом и индентором. Это предположение подтверждается результатами исследования представленными на рис. 5.11.

В приложении 10 приведены эпюры касательных контактных давлений, которые вызваны трением. По ним можно определить места наиболее вероятного скольжения деформируемого материала по поверхности.

Касательные напряжения на рабочей части индентора практически не изменяются (условия трения в паре коническая часть индентора – деформируемый материал постоянные), а трение на цилиндрическую часть индентора со стороны деформируемого материала постепенно увеличиваются (рис. 5.11). То есть, часть энергии от индентора за счёт сил трения передаётся деформируемому материалу, в результате чего нормальные контактные давления на коническую часть индентора несколько снижаются.

Ещё одним важным результатом исследования пластического деформирования при восстановлении локально изношенной детали с использованием прилегающей поверхности является то, что небольшие дефекты при деформировании, для принятых условий, существенно уменьшают свои размеры и могут полностью залечиваться. Это подтверждается результатами исследований, показанными на рисунках в приложении.

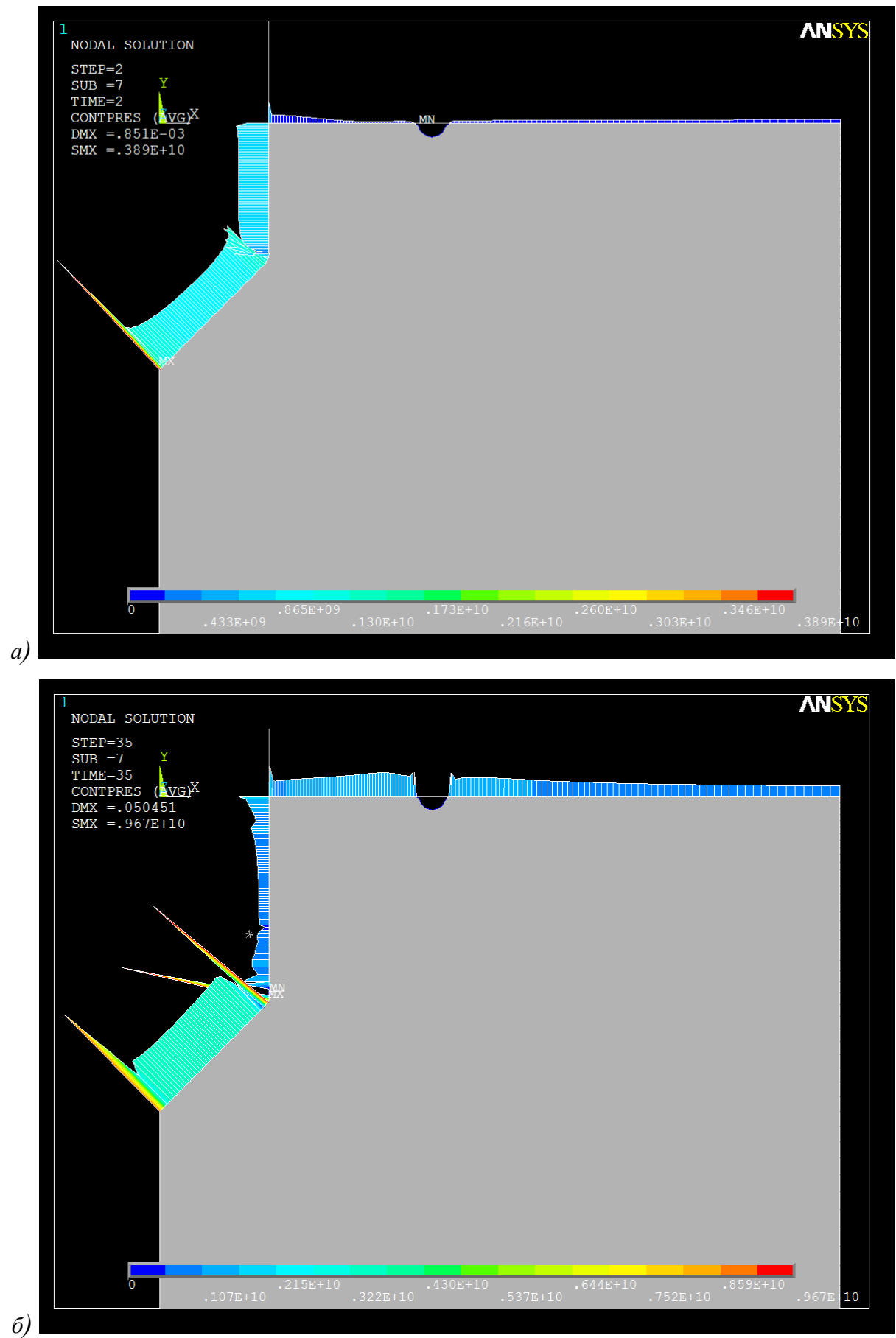


Рис. 5.10. Распределения нормальных давлений

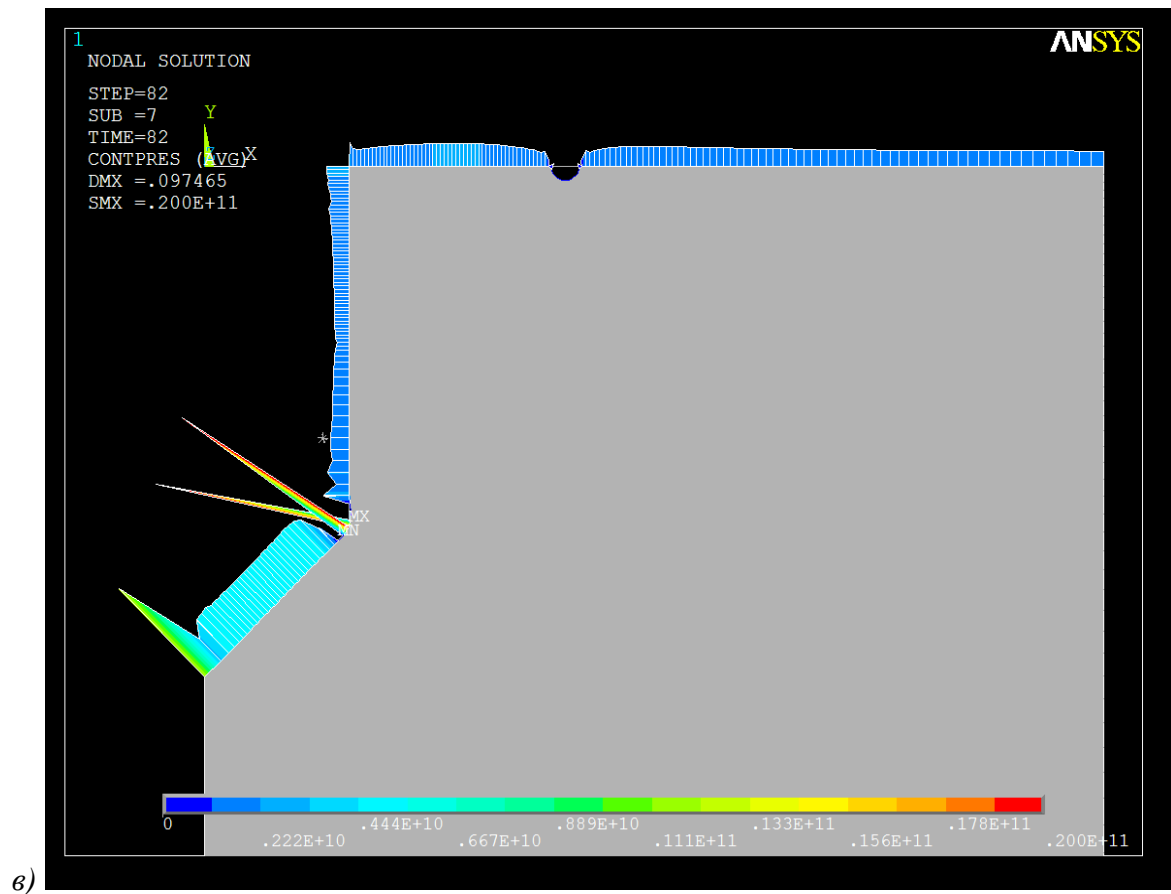


Рис. 5.10. Распределения нормальных давлений. Окончание

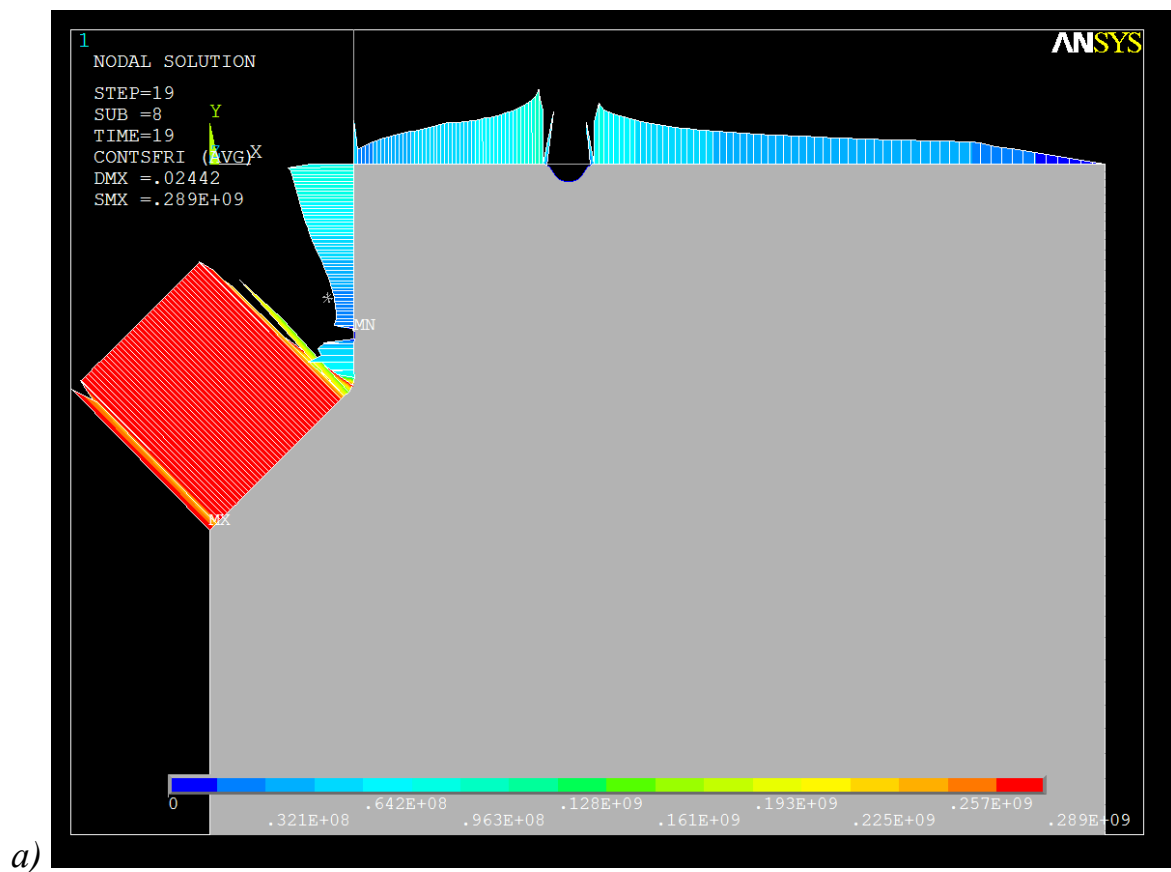


Рис. 5.11. Распределения касательных контактных напряжений.

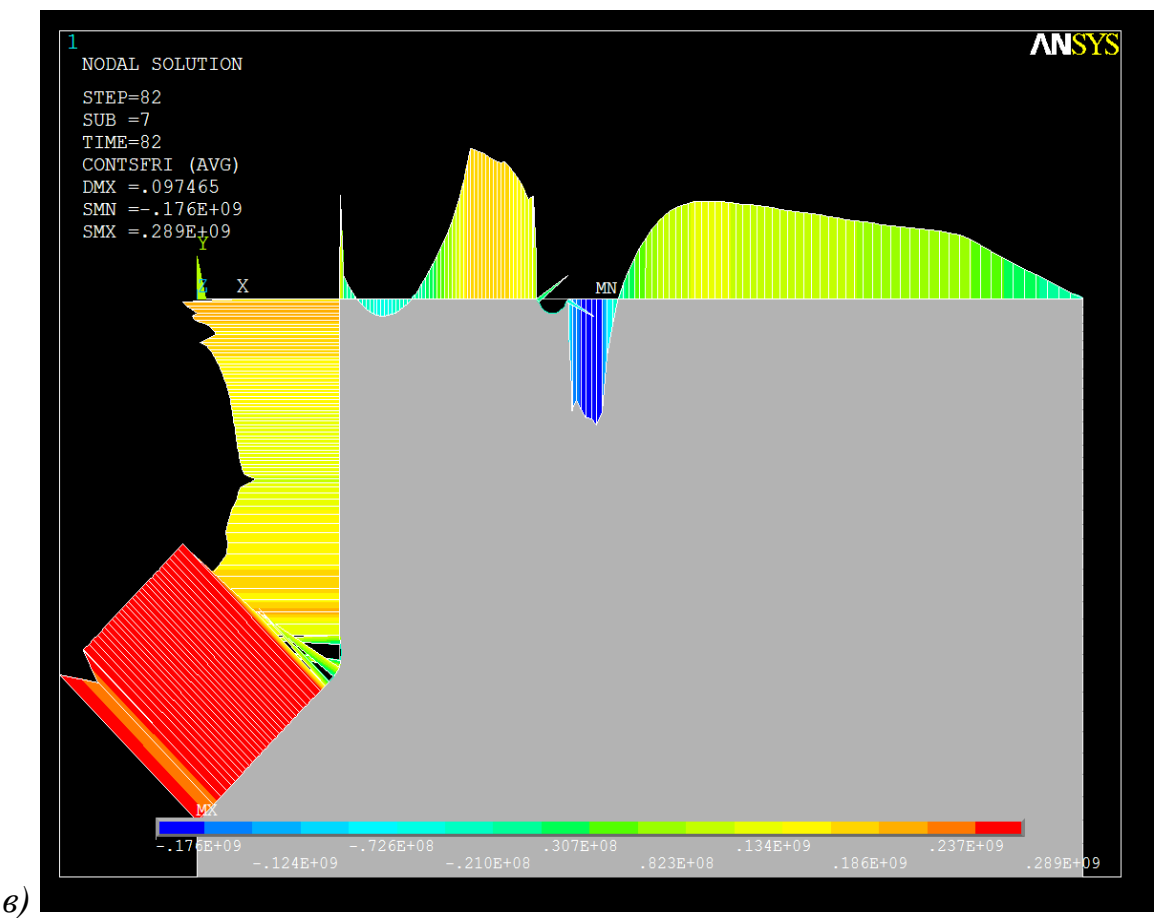
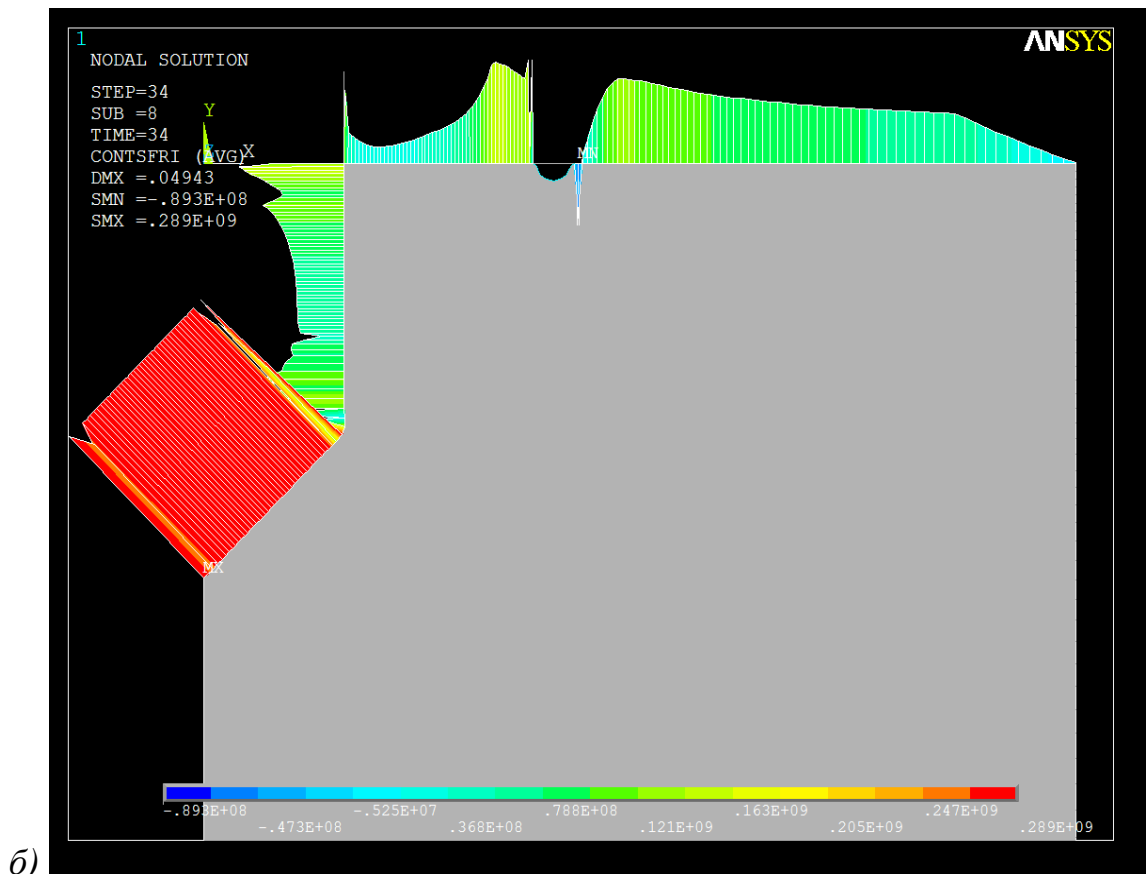
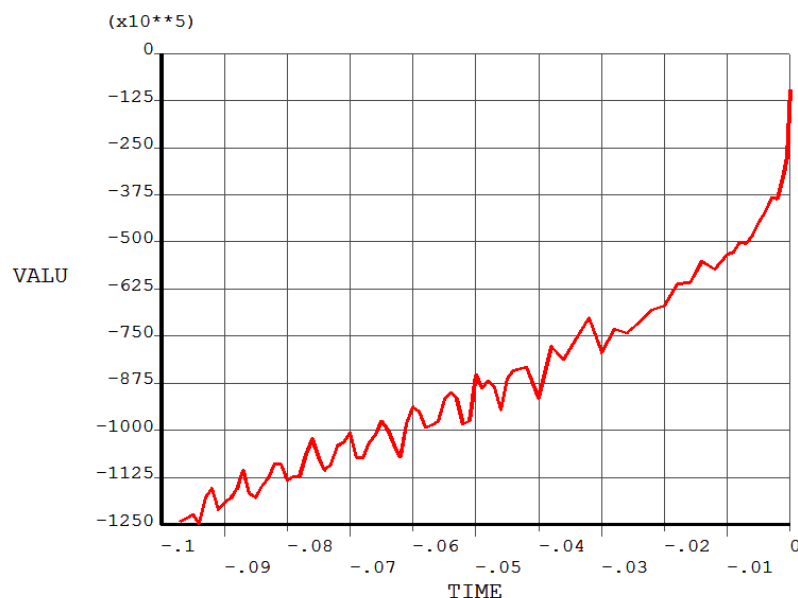


Рис. 5.11. Распределения касательных контактных напряжений. Окончание

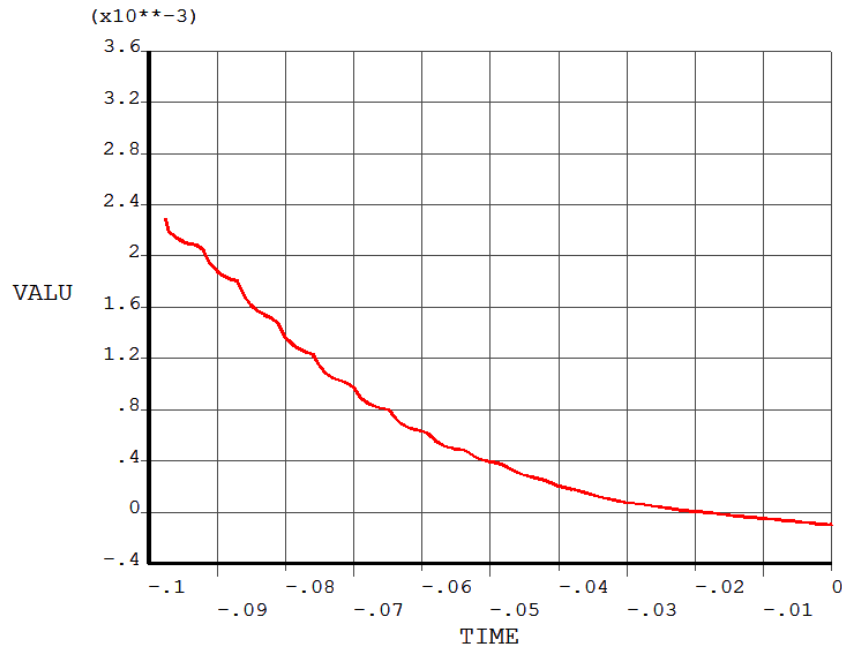
По результатам исследования получены зависимости для трёх параметров: сила внедрения «N» (вертикальная сила давления на клин), глубина внедрения «a» (глубина заглабления клина) и вертикальное перемещение нижней точки вогнутости «y» (выпучивание дефекта поверхности). Зависимости данных параметров друг от друга в различных комбинациях приведены на рисунке 5.12. Полученные колебания характеристик можно объяснить проскальзыванием клина (при переходе от трения покоя к трению скольжения).

Исследования процесса пластического деформирования при восстановлении локально изношенных деталей разработанным способом с помощью системы автоматизированного инженерного анализа ANSYS показало, что предложенная теоретическая модель, рассмотренная в разделе 5.1, в целом соответствует полученным результатам. Некоторые различия наблюдаются при развитии пластическом течении, это может объясняться тем, что модель, принятая в системе ANSYS не учитывает изменения пластичности материала при всестороннем сжатии, а реально такой эффект присутствует [72]. Поэтому для окончательного заключения необходимо провести эмпирические исследования.



$$N = f(a)$$

Рис. 5.12. Изменение силы внедрения N и величины дефекта y от глубины внедрения индентора a



$$y = f(a)$$

Рис. 5.12. Изменение силы внедрения N и величины дефекта y от глубины внедрения индентора a (продолжение)

Эмпирическое исследование восстановления локально изношенных поверхностей пластическими деформациями позволяет установить зависимость силовых и геометрических параметров на основе экспериментов.

Деформирование осуществлялось индентором с цилиндрическим основанием и конической вершиной.

Для обеспечения гарантированного скольжения деформируемого материала относительно образующей индентора был принят угол его полураствора 45^0 .

Для получения необходимой точности измерений требуется жестко связать величину перемещения индентора с показаниями отсчётного устройства. При чём упругая составляющая от деформации основных элементов измерительного прибора должна быть незначительна. Конструкция ограничивающей прилегающей поверхности должна иметь высокую жёсткостью, что обеспечит необходимую точность восстановленной поверхности.

Требуемая жесткость индентора 16 обеспечивается специальной оправкой 15, которая позволяет в требуемом интервале перемещения обеспечивать стабильные параметры трения относительно корпуса устройства, это повышает точность отсчёта силовых параметров (рис. 5.13). Устройство для деформирования имеет основание 2, и закреплённые шпильки 3. При проведении экспериментов на основание укладывалась деформируемая деталь 1 с прокладкой 4, имитирующей восстанавливаемый зазор (0,1 мм). Над прокладкой закреплялась ограничивающая кондукторная плита 5. В ней имеется направляющая втулка 21, которая закреплена с помощью шпилек 22 и гаек 23. Зазор между шпильками и крепёжными отверстиями позволяет центрировать оправку 15 относительно установочного отверстия в ограничивающей деформации кондукторной плите.

Зазор между шпильками и крепёжными отверстиями позволяет центрировать оправку 15 относительно установочного отверстия в ограничивающей деформации кондукторной плите.

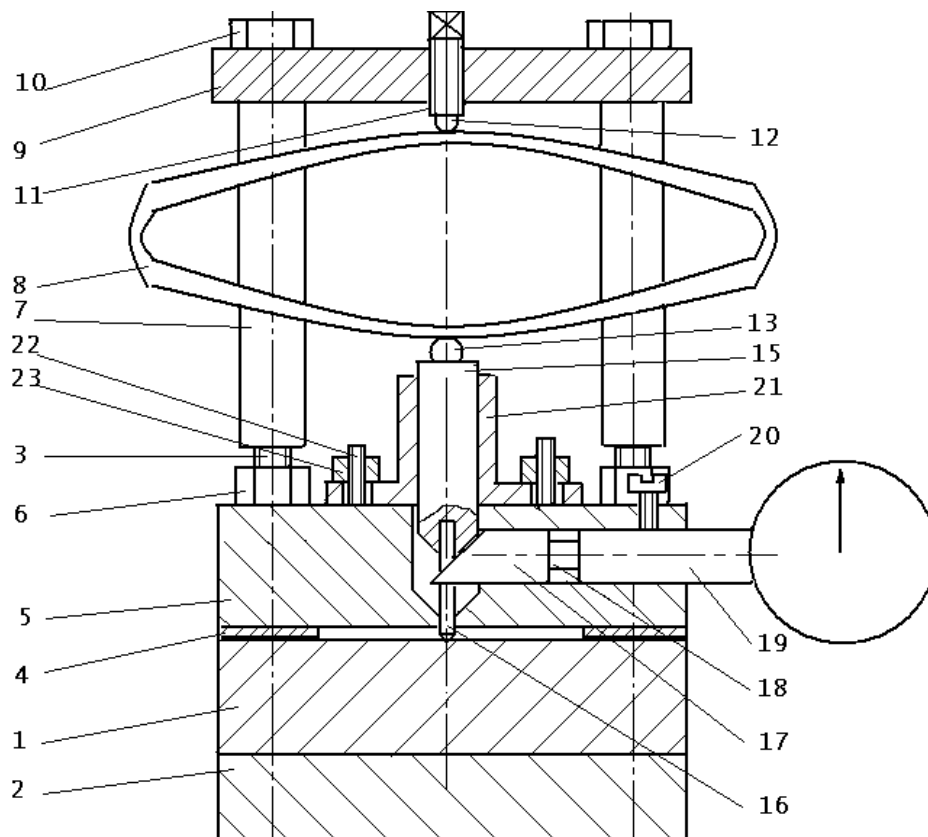


Рис. 5.13. Принципиальная схема устройства для моделирования процесса восстановления в локальной точке изношенной поверхности

Ограничивающая плита 5 закрепляется на деформируемой поверхностью исследуемой детали 1 гайками 6. Установка нагружающего устройства осуществляется с помощью шпилек 3 и навинчивающихся стоек 7, к которым с помощью болтов 10 крепится пластина 9. Далее на оправку 15 помещается нажимной шар 13 с динамометром 8. Компенсация веса динамометра обеспечивается специальной пружиной, одетой на направляющую втулку 21 (не показана на рис. 5.13).

Нагрузка задаётся нажимным болтом 11, через упорный шар 12. До начала измерения требуется, удерживая динамометр 8, поворачивать нажимной болт 11 так, чтобы центр шара 12 совпал с центрирующим углублением в корпусе динамометра. После этого необходимо добиться контакта индентора 16 с восстанавливаемой поверхностью 1, используя нажимной болт 11. Далее требуется провести настройку на ноль индикатора 19, контролирующего перемещение, и индикатора динамометра, измеряющего нагрузку (на рис.5.13 не показан).

Перемещение индентора 16 связано с индикатором 19 через фаску на оправке 15 и клиновой упор 17, установленный на индикаторе 18. Так как уклон клина и фаски одинаковые, то, перемещение наконечника индентора 16 соответствует показаниям индикатора 19.

Эмпирические исследования восстановления в локальной точке проводились на устройстве, показанном на рисунке 5.13. С помощью нажимного болта 11 устанавливалась требуемая нагрузка, и определялась соответствующая величина глубины внедрения. Для снижения влияния упругой деформации при исследовании, показания индикатора, контролирующего перемещение индентора, определялись после полного снятия нагрузки. Уменьшение погрешности измерений обеспечивалось за счёт повторения измерений, по пять раз для каждого материала.

Для выявления основных закономерностей процесса восстановления исследовались несколько различных по свойствам материалов: свинец, баббит Б83, алюминиевые сплавы АМЦ и АК-9, бронза БрОЦС-5-5-5, латунь ЛС

59, чугун СЧ-18, сталь 17ГС. Полученные результаты исследований отражены в табл. 1 приложения.

Устройство для эмпирического исследования процесса восстановления в локальной точке представлено на рис. 5.14.

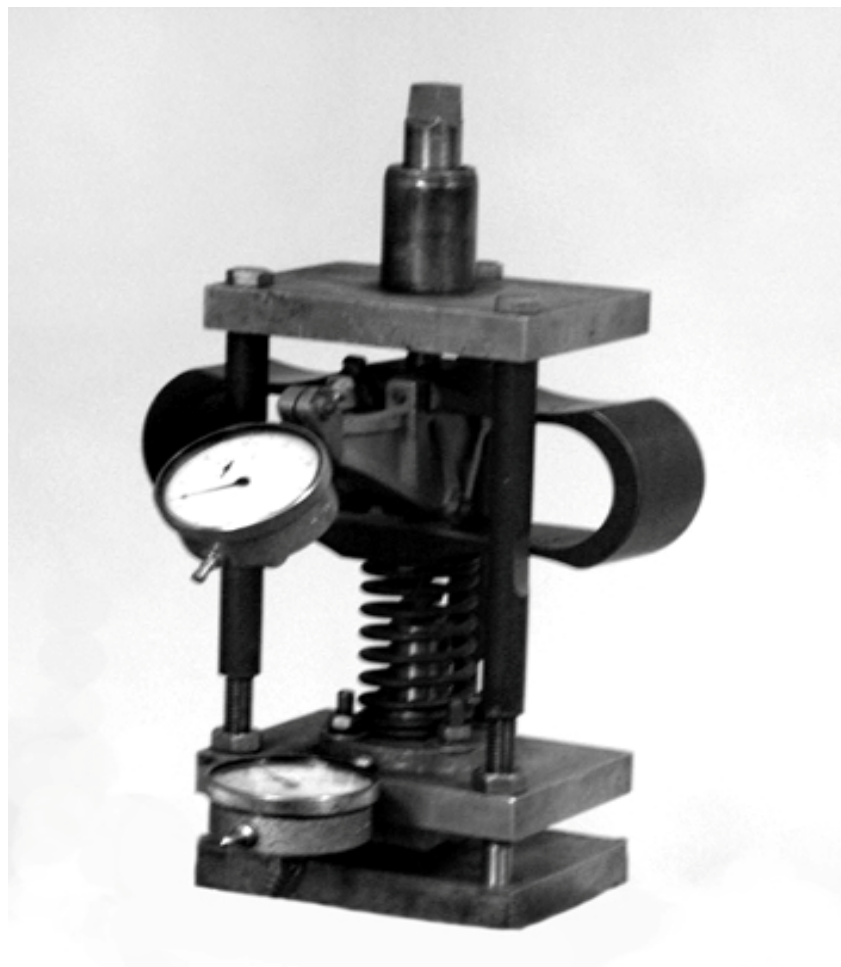


Рис. 5.14. Устройство для эмпирического исследования процесса восстановления в локальной точке

В процессе восстановления с использованием ограничивающего деформации кондуктора изменяются механические свойства изношенной поверхности, следовательно, нужно помимо силовых и геометрических параметров оценить изменение механических свойств деформируемого металла. Это может оказать важнейшее влияние на работоспособность восстановленного трибоузла. Анализ изменений механических свойств в деформируемом слое осуществлялся на основе исследования микротвёрдости с помощью микротвердомера ПМТ-3.

Изменение микротвёрдости восстанавливаемой поверхности в процессе деформирования определялось до, и после деформации. Исследования микротвёрдости показало, что она неоднородна, и существенно изменяется практически на всех исследованных участках поверхности. Изменения микротвёрдости исследовались на отдельных участках размером 1 – 2 мм с интервалом измерений 0.1мм. Значение микротвёрдости на участке определялось как среднее по циклу измерения. Полученные результаты измерений микротвёрдости показаны в табл. 5.7.

Таблица 5.7

Результаты исследования микротвёрдости материалов

микротвёрдость в Н/мм ² × 10 ⁸																	
нагрузка	значение	свинец		баббит Б83		АК-9		АМЦ		ОЦС-5-5		ЛС59		СЧ-18		17ГС	
		до	пос.	до	пос.	до	пос.	до	пос.	до	пос.	до	пос.	до	пос.	до	пос.
2Н	ср	0.42	0.43	1.7	1.8	6.3	6.5	3.6	3.7	8.7	9.8	8.8	11.8	8.2	10	9.2	12
	max	0.44	0.46	1.8	2	7.7	7.8	3.8	3.9	9.3	11.1	9.3	12.1	9.3	12	10	13
	min	0.4	0.4	1.6	1.6	4.5	5.8	3.5	3.5	8.2	8.5	8.2	11.6	7.3	8.7	8.3	10
1Н	ср	0.39	0.4	1.4	1.5	6.1	6.3	3.4	3.6	9.1	11.3	9.1	12.3	10	12.6	11	14.6
	max	0.4	0.42	1.5	1.7	8.5	8.7	3.7	3.7	9.6	13.5	9.5	13.8	13	16	12	16.6
	min	0.38	0.38	1.2	1.3	5.2	5.3	3.3	3.4	8.5	9.1	8.7	10.8	7.4	9.6	10	13.5
0.5Н	ср	0.3	0.31	1.4	1.5	5.8	6	3.5	3.6	9.5	11.7	9.3	12.6	11.3	13.1	12.5	13.9
	max	0.31	0.33	1.7	1.7	7.2	7.5	3.6	3.8	9.8	13.5	9.7	13.1	13.2	15.4	13.9	16.4
	min	0.27	0.29	1.2	1.3	4.5	5	3.4	3.4	9.2	11.1	8.9	12.1	9.4	10.8	11.1	11.1

Исследования рассматриваемых материалов показали, что имело место некоторое увеличение микротвёрдости: для ЛС-59, СЧ-18, 17ГС около 8%, для ОЦС 5-5-5 около 5%, практически не изменилась микротвёрдость у сплавов АМЦ, АК-9, баббита Б83 и свинца. Исследования показало, что деформирование восстанавливаемых участков поверхностей по прилегающему кондуктору не приводит к существенному повышению микротвёрдости.

Для сравнения эмпирического и теоретического исследований осуществлялся переход к относительным безразмерным параметрам, что позволило обеспечить сопоставление результатов.

Значение P_0 для эмпирического исследования определялось по результатам испытаний, так, например, для свинца P_0 составило 2190 Н при

глубине внедрения индентора на 0.5 мм, для баббита Б83 P_0 2880 Н, для сплава АМЦ P_0 3060 Н, для сплава АК-9 P_0 4050 Н, для бронзы ОЦС 5-5-5 P_0 4560 Н, для латуни ЛС 59 P_0 7200 Н, для чугуна СЧ-18 P_0 7500 Н, для стали 17ГС P_0 6930 Н.

Полученные зависимости относительного усилия от относительной глубины внедрения на основе эмпирических и теоретических исследований показаны на рис. 5.15.

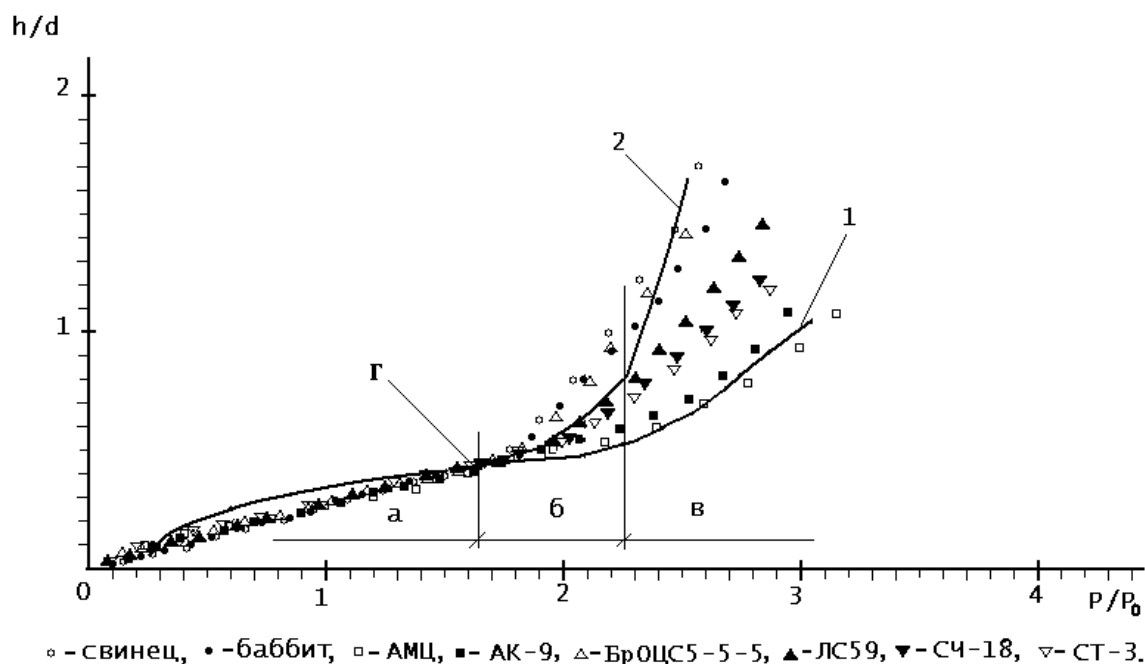


Рис. 5.15. Зависимость относительного внедрения $\delta=h/d$ от относительного усилия $\Delta=P/P_0$ по результатам теоретического и эмпирического исследований

Как на эмпирической, так и на теоретической зависимостях нет конкретной точки перехода от первого ко второму этапу деформирования, так как этот процесс протекает достаточно плавно.

На графиках (рис. 5.15) интервал **а** - первый этап деформирования, интервал **б** - второй этап деформирования, который реализуется при развитом пластическом течении в соответствии с вариантом, показанном на рис. 5.6. На интервале **в** сила внедрения индентора возрастает за счёт трения металла по цилиндрической поверхности индентора [191], **г** - условная точка, в которой происходит переход от первого ко второму этапу деформирования. Теоретическая кривая 1 построена для максимального коэффициента

пластического трения (μ равно 0.5), теоретическая кривая 2 (μ равно 0.14) [191]. Из полученных эмпирических зависимостей видно, что исследуемые материалы распределены в соответствии с коэффициентами пластического трения (самый большой коэффициент трения у алюминиевых сплавов, а самый й у свинца).

Анализ результатов проведённых исследований показал достаточно хорошую сходимость теоретических и эмпирических результатов, следовательно, полученные зависимости могут быть использованы для моделирования процесса восстановления.

Так как геометрические параметры деформируемой поверхности теоретически определить сложно, то решение этой задачи нужно получить на основе экспериментальных данных.

Поставленная задача решалась на основе исследований геометрических параметров области восстановления в локальной точке. Основные геометрический параметры восстановленной в отдельной точке поверхности, показаны на рис 5.16.

Индентор 1 в виде цилиндра с коническим основание с помощью силы P внедряется в восстанавливаемый материал 3 на некоторую глубину h (a – восстанавливаемый зазор между поверхностью 4 и ограничивающим кондуктором 2). Объём вытесняемого индентором материала A распределяется в области B и C .

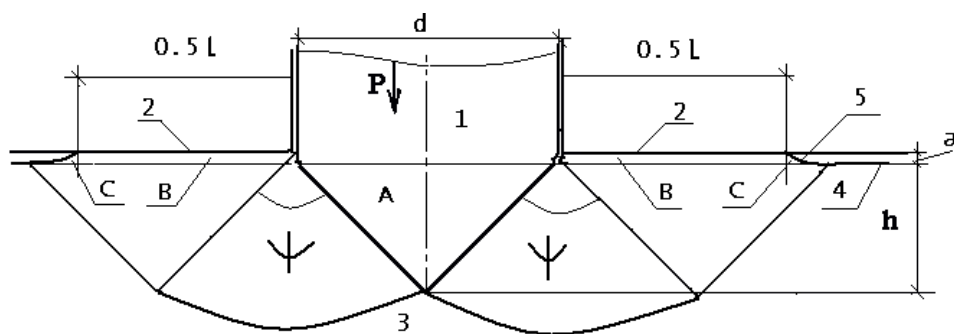


Рис 5.16. Схема восстановления поверхности в точке

Объём **A** зависит от размера индентора, помещённого на глубину **h**, он определяется из объёма конуса и высоты цилиндрической части (в том случае если индентор цилиндрической частью выйдет из ограничивающей поверхности). Объём **B** (находящийся под прилегающей поверхностью 2) определяется из объёма тела вращения, ограниченного внутренним цилиндром диаметра **d** и наружной поверхностью диаметра **d + L**, при высоте восстанавливаемого зазора **a**. Объём некоторого тела вращения **C** ограниченного внутренним цилиндром диаметра **d+L**, так же высотой восстанавливаемого зазора, **a** и сложной поверхностью 5. Эта поверхность имеет сложную форму, которая была определена экспериментально с помощью устройства, представленного на рис. 5.19. Данное устройство располагает основанием 1, с закреплённой на нём стойкой 2 с кронштейном 3, зафиксированным винтом 4 так, что измерительный наконечник 7 индикатора часового типа 5 располагался с небольшим зазором относительно поверхности детали 8. При вращении микровинта 10, деталь 8 перемещается вдоль оси микровинта 10. Для настройки индикатора необходимо ослабить винт 6, опустить корпус индикатора 5 до касания измерительным наконечником 7 сканируемой поверхности детали 8, и настроить шкалу индикатора 5 на ноль.

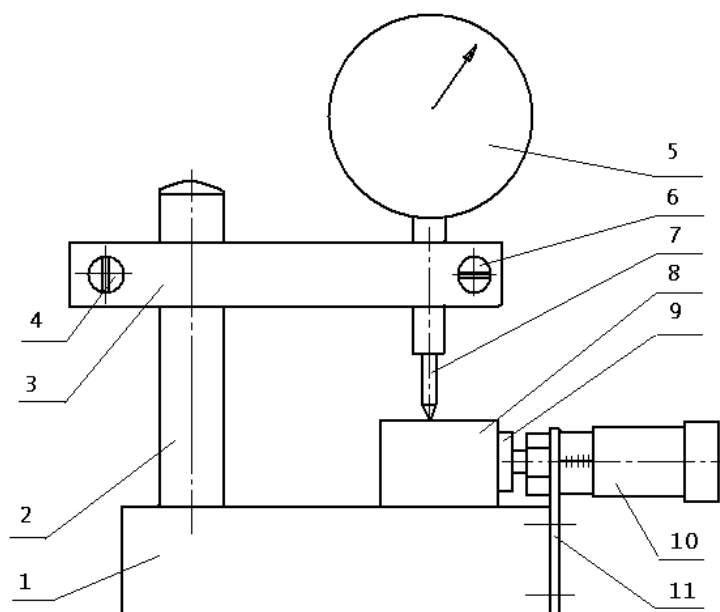


Рис. 5.19. Устройство для сканирования поверхности примыкающей к восстановленной области

При вращении микровинта 10, деталь 8, установленная на основании 1, передвигать упором 9 (измерения проводились с интервалом 0,5 миллиметра) и на каждом из шагов снимались показания индикатора 5. Измерения проводились до тех пор, пока измерительный наконечник индикатора не выходил на поверхность, не подвергнутую деформированию. Результаты проведённого исследования отражены на рисунке 5.20 и в таб. 5.8. Анализ проведённых исследований показала, что для принятых материалов форма переходных поверхностей близка, а некоторые отклонения обусловлены отклонениями формы изначальной поверхности. Так же, при выходе измерительного наконечника на недеформированную поверхность, возникают некоторые погрешности, связанные точностью определения этого положения.

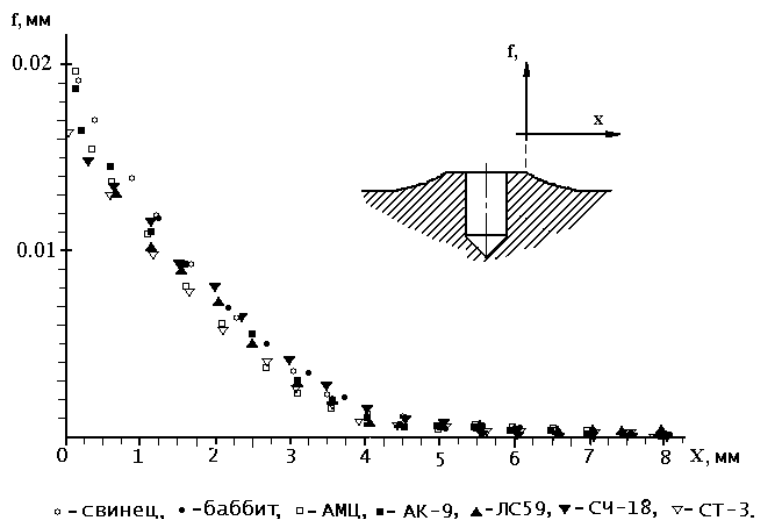


Рис. 5.20. Исследование свободной поверхности, примыкающей к недеформированному участку

Результаты исследований так же показали, что формы поверхностей примыкающих к области деформаций для исследованных материалов существенно не зависит от размера восстанавливаемого зазора. На основе анализа результатов получена кривая, и соответствующая ей степенная функция $f(x)$ формы свободной поверхности

$$f(x) = a \exp(-c x^2), \quad (5.21)$$

где a - восстановленный зазор, c - эмпирический коэффициент (в данном случае равняется 0.18), x - расстояние в миллиметрах от края восстанавливаемой поверхности.

Таблица 5.8

Усреднённые данные по результатам сканирования свободной поверхности, прилегающей к зоне восстановления, по пяти опорным точкам

перемещение в мм.	0	2	4	6	8
показания индикатора в мм.	0.18	0.08	0.01	0.001	0

Таким образом, основные геометрические параметры области восстановления в локальной были определены на основе эмпирических исследований.

Деформирование частично изношенной детали с помощью ограничивающего деформации кондуктора, способствует получению восстановленной поверхности номинального профиля не требующей дополнительной обработки, и формированию на деформируемых участках преимущественно напряжений сжатия. Что подтверждается проведёнными оптическими исследованиями. Образец из алюминиевого сплава АК-9, деформированный без кондуктора, на поверхности пластической области имеет видимые трещины. Аналогичный образец, деформированный с использованием ограничивающего кондуктора, таких трещин не имеет (рис.5.21 и 5.22).

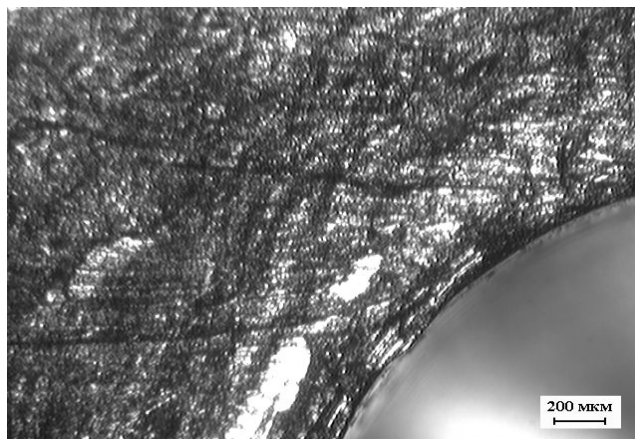


Рис. 5.21. Пластическая область деформированная без ограничивающего кондуктора

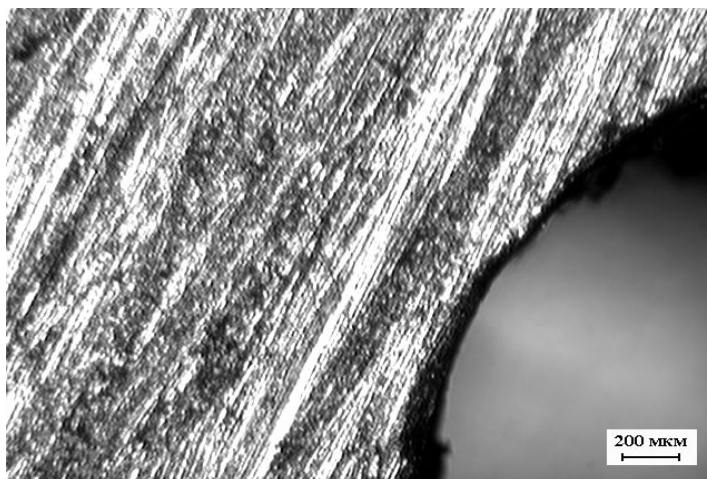


Рис. 5.22. Пластическая область деформированная с использованием ограничивающего кондуктора

На основе проведённого оптического исследования установлено, что ограничивающая деформации поверхность способствует формированию на поверхности восстановленной детали преимущественно напряжений сжатия, при которых трещины не возникают [27 - 32, 186].

На рис. 5.22 видны следы механической обработки, перенесённые с ограничивающей поверхности кондуктора. На основе анализа результатов профилометрирования кондукторной плиты и восстановленной детали установлена зависимость шаговых и высотных параметров шероховатости контактных поверхностей. При шероховатости $R_a=0.7\text{ мкм}$ и $R_{\max}=3.6\text{ мкм}$ кондукторной плиты шероховатость восстановленной поверхности была $R_a=0.44$ и $R_{\max}=2$, при одинаковом среднем шаге микронеровностей $S_m=0.2$.

Таким образом, было установлено, что при восстановлении деталей разработанным методом происходит копирование микрогеометрии с прилегающей кондукторной поверхности, но с меньшими высотными параметрами шероховатости. Значит, с помощью кондукторной поверхности можно управлять формированием требуемых параметров шероховатости восстанавливаемой поверхности детали.

Для обеспечения необходимой устойчивости восстановленной поверхности к механическим воздействиям требуется надежное закрепление антифрикционного полимера в отверстиях от индентора, полученных в про-

цессе деформирования. Антифрикционный полимер, производимый на основе эпоксидных смол, обладает хорошей адгезией к восстанавливаемому материалу, но из-за усадки в процессе полимеризации может снизиться прочность контакта [207]. Данный недостаток компенсируется формой отверстий, полученных в результате деформирования, в связи с тем, что на выходе цилиндрическое отверстие имеет некоторое уменьшение, вследствие деформации на соседнем участке восстанавливаемой поверхности. Данный эффект был установлен во время проведения соответствующего исследования. В ходе этого исследования был использован цилиндрический индентор диаметром 20 мм с коническим основанием, имеющим угол полураствора при его вершине 45^0 , размер которого был увеличен с целью обеспечения возможности использования типового измерительного инструмента, и повышения точности исследования. Применение индентора данного размера в условиях разработанного метода восстановления является допустимым, это допущение было проверено с помощью специального исследования, параметры пластических областей коррелируют.

Исследования проводились на свинце (проведённые предварительно исследования показали, что в условиях разработанного метода восстановления, исследованные материалы, ведут себя сходно), который заливается в коробчатую форму с крышкой с отверстием под индентор, выполняющей функцию прилегающего кондуктора. Между этой крышкой и поверхностью свинца выдерживался зазор 1 мм, в соответствии с масштабом применяемого индентора. В процессе исследования индентор внедрялся на глубину двух диаметров и удалялся. После этого проводили его повторное внедрение через отверстие, расположенное рядом с предыдущим. Далее с помощью индикаторного нутромера проводилось исследование размеров первого отверстия.

На рис. 5.23 представлено устройство для проведения исследований формы отверстий после внедрения индентора в следующей точке деформирования (1 – индентор, 2 – съёмная крышка, 3 – болт, 4 – корпус контейнера, 5 – нутромер, 6 – первичное отверстие, 7 – деформируемый материал).

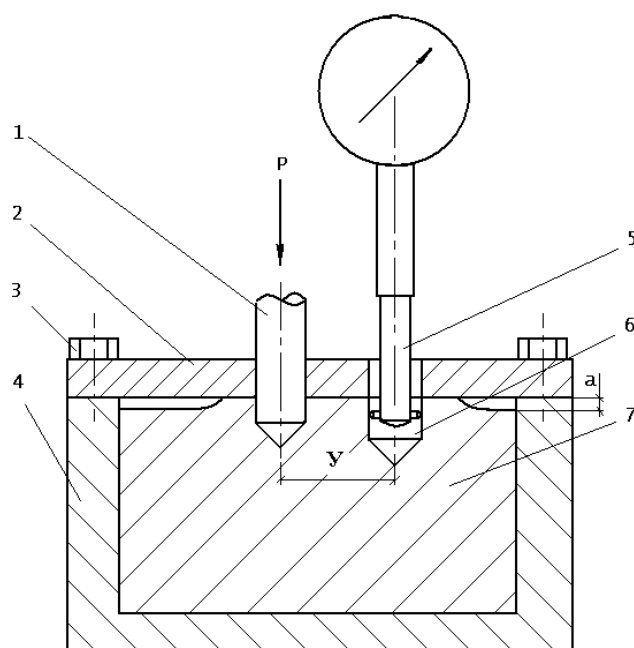


Рис. 5.23. Устройство для исследования формы отверстия на выходе после деформирования в соседней точке

Уменьшение размера отверстия определялось на различной глубине, в таб. 5.9 представлены результаты исследования.

Таблица 5.9

Величина уменьшения отверстия на выходе после деформирования в соседней точке

внедрение h в диам. индентора d		0,6	0,8	1	1 2	1 4	1 6	1 8	2
уменьшение выходного отверстия в диаметрах индентора d	$y=2d$	0.001	0.001	0.002	0.002	0.003	0.004	0.004	0.005
	$y=3d$				0.001	0.001	0.002	0.003	0.003
	$y=4d$							0.001	0.001

Анализ результатов исследования показал, что размер выходного отверстия, полученного при предыдущем деформировании, уменьшается, и зависит от глубины внедрения и расстояния между точками деформирования. При этом даже относительно небольшое уменьшение выходного размера отверстия, обеспечивает стабильную фиксацию антифрикционного полимера, что обеспечивает высокую устойчивость восстановленной поверхности к механическим воздействиям.

Для обеспечения высокого качества восстановления изношенных поверхностей необходимо определять глубины внедрения индентора и положения точек деформирования на основе анализа результатов топографирования с использованием информационных моделей. Анализируя данные полученные на основе нескольких вариантов моделирования процесса восстановления (меняя шаг и глубину внедрения) устанавливается оптимальное сочетание величины деформации и положения точек внедрения. Математические модели позволяют получить вариант восстановления для изношенной поверхности с различными величинами износа.

5.3 ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВОССТАНОВЛЕННОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Разработанный метод восстановления локально изношенных поверхностей по прилегающей кондукторной поверхности, имеющей размеры и форму номинальной детали, эффективно использовать для дорогостоящих металлоёмких деталей. К таким деталям относятся корпуса фрезерных барабанов фрезерующих устройств износ опорных поверхностей муфт которых, приводит к их выбраковке (см. рис. 4.24). После ремонта данных деталей требуется изучить триботехнические параметры восстановленных поверхностей. В этом случае натурные испытания могли обеспечить получение всех необходимых данных для сравнения работоспособности восстановленных деталей с новыми, однако, такие исследования продолжительны во времени, дороги, и как следствие не всегда целесообразны. В тоже время, использование статистических данных в исследованиях надёжности восстановленных деталей торфяных машин затруднительны, и могут оптимально сочетаться с лабораторными методами исследований на основе сравнения характеристик контрольных и восстановленных образцов в условиях интенсификации нагрузок [19, 23, 36, 74].

Проблему надёжности большинства трибоэлементов можно решить на основе выявления факторов, определяющих износ, выявления наиболее важных из них, а так же принятие соответствующих мер по их минимизации. Но такая задача чрезвычайно сложна, так как на практике достаточно сложно предвидеть и учесть все условия эксплуатации восстановленных деталей. Данную проблему нужно решать с использованием целенаправленного эксперимента, а также сравнительной оценки их результатов. Достоверность полученной информации в этом случае может обеспечиваться на основе тщательной подготовки экспериментов.

Интенсивность изнашивания большинства трибоэлементов не постоянна, в режиме приработки наблюдается нестационарный режим износа с высокой постепенно убывающей скоростью. В то же время режим приработки у деталей, исследуемых в диссертации, существенно отличается друг от друга вследствие большого количества причин. Так, например, детали с контактными поверхностями, полученными резанием имеют более длительный интервал приработки с большей интенсивностью износа, чем детали, подвергнутые деформированию. Это связано с тем, что величина шероховатости и её форма у обработанных деформацией образцов имеет значительно лучшие триботехнические параметры, чем у поверхностей, полученных методом снятия стружки.

На рисунке 5.24 *а* – контактная поверхность детали, полученная методом снятия стружки, *б* – поверхность детали выработавшей ресурс, *в* – поверхность полученная методом пластического деформирования по прилегающей поверхности.

На фотографиях видно, что образец, полученный методом удаления стружки, имеет значительно большее количество дефектов в виде микро царапин от режущего инструмента. По соотношению тёмных и светлых тонов видно, что рельеф восстановленной пластическим деформированием поверхности имеет бóльшую относительную опорную поверхность, чем у поверхностей, полученных методом снятия стружки и выработавшей ресурс.

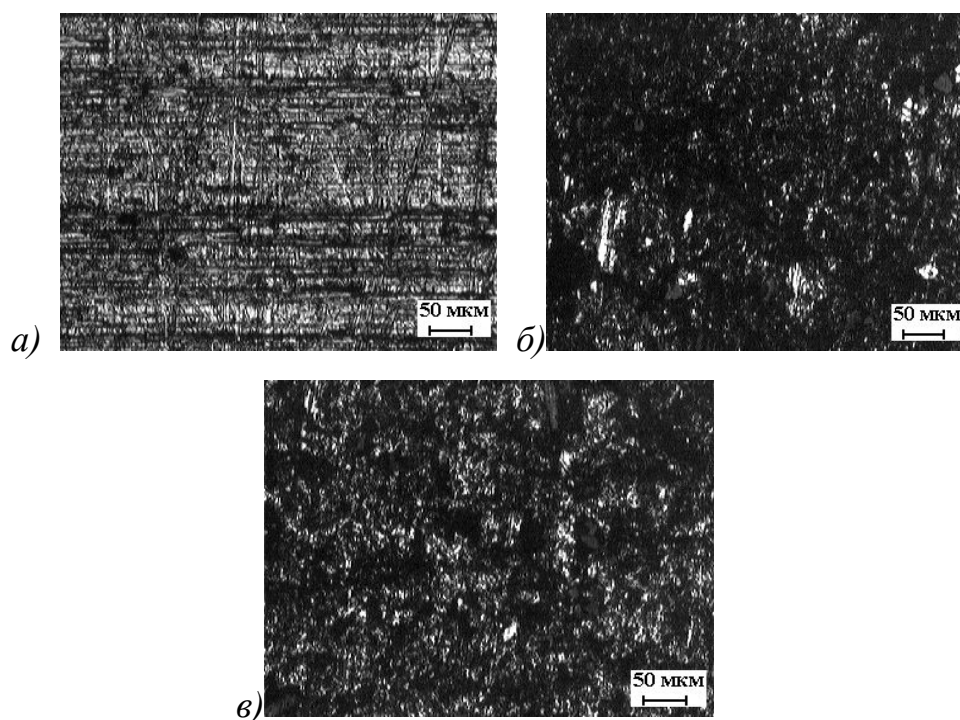


Рис.5.24. Фотографии контактных поверхностей полученных разными методами

Количественная оценка шероховатости сравниваемых поверхностей деталей была получена на основе анализа профилограмм (рис.5.25), полученных на профилографе-профилометре модели 201 при вертикальном увеличении 10000 и горизонтальном 80.

Наибольшую величину шероховатости имеет образец с контактной поверхностью полученной методом снятия стружки (профилограмма 1). Анализ профилограммы показал, что шероховатости обладают более острыми пиками, чем на профилограммах соответствующих другим условиям обработки, это объясняется технологическими условиями получения поверхностей.

Наименьшую высоту шероховатостей имеют восстановленная разработанным методом поверхность (профилограмма 2) и поверхность детали, выработавшая ресурс (профилограмма 3). Результаты исследования микрогеометрии поверхностей трех исследованных образцов представлены в таблице 5.10 (высотные параметры были получены по измерениям на соответствующей базовой длине на пяти участках исследуемых поверхностей, исследования проводились с помощью прибора модели S/N 1041 компании «Покет Сёрф»).

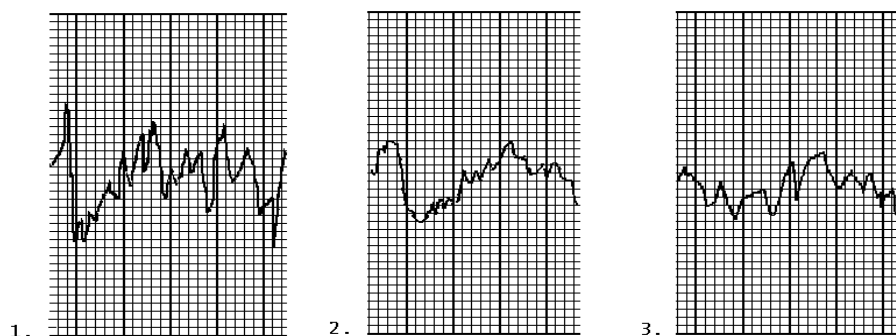


Рис.5.25. Профилограммы контактных поверхностей образцов

Таблица 5.10

Параметры шероховатостей исследованных образцов

номер точки	Типовая обработка			Изношенная поверхность			Восстановленная поверхность		
	$R_{\max}$	R_a	$t_{20\%}$	$R_{\max}$	R_a	$t_{20\%}$	$R_{\max}$	R_a	$t_{20\%}$
1	3.6	0.71	14	2.1	0.57	24	1.8	0.43	24
2	3.5	0.79	12	2.6	0.49	22	2.1	0.42	23
3	3.3	0.63	16	2.3	0.57	21	1.6	0.47	24
4	3.7	0.85	14	2.2	0.57	24	1.9	0.43	22
5	3.9	0.68	12	2.5	0.5	23	2.1	0.46	26
ср.	3.6	0.73	14	2.34	0.54	23	1.9	0.44	24

По параметру R_a восстановленная поверхность имеет высоту шероховатости на 70% меньше, чем у обработанного резанием и на 20% меньше, чем у поверхности детали, выработавшей ресурс. Максимальная высота микронеровностей в пределах базовой длины $R_{\max}$ у восстановленного образца меньше на 90% и 20% соответственно.

Наиболее важным параметром, оказывающим влияние на процесс приработки контактных поверхностей деталей, является относительная опорная длина t_p . На основании анализа полученных результатов исследования была получена зависимость относительной опорной длины от уровня сечения для различных образцов (рис.5.26) [197].

Образец, полученный резанием, имеет меньшую относительную опорную длину на уровне сечения до 40% по сравнению с другими образцами. У выра-

ботавшего ресурс и восстановленного образца параметры близкие для всех уровней сечений, а на уровнях сечения более 60% относительная опорная длина практически одинаковая для всех образцов.

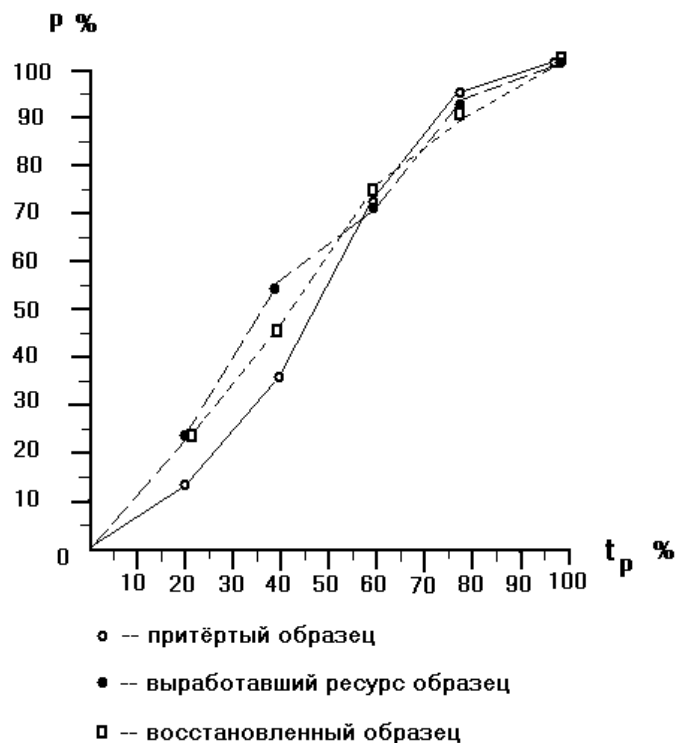


Рис. 5.26. Зависимость относительной опорной длины t_p от уровня сечения p полученная для образцов, полученных различными методами

Результаты исследования шероховатости контактных поверхности образцов, полученных различными методами, показали, что восстановленная поверхность имеет лучшие микрогеометрические параметры, чем другие исследованные поверхности.

На следующем этапе исследований была проведена проверка триботехнических свойств восстановленной детали (исследования проводились на установке, показанной на рисунке 3.25). Цилиндрическая часть муфты была подвергнута восстановлению в зоне локального износа после испытаний, описанных в разделе 3.2. Интенсивность износа определялась по потере массы сферической части муфты выполненной из термически улучшенной стали 45, твёрдостью HB = 255-269. До испытаний сферическая часть муфты весила 154,785 г, после испытаний (в течение 24 часов на установке, представленной

на рис. 3.25 при соответствующих условиях) 154,720 г. Интенсивность износа сферической части муфты в паре с восстановленной поверхностью получилась около 25 мкг/м, а в паре выполненной из типовых материалов (стали 45 и стали 17ГС) 36 мкг/м. Это свидетельствует о том, что триботехнические параметры восстановленной поверхности значительно улучшились (интенсивность массового износа уменьшился более чем 30%).

Проведённые оптические исследования показали, что поверхность, получаемая во время восстановления, при данных условиях эксперимента имеет значительно лучшие триботехнические показатели, чем поверхность, не подвергнутая такой обработке. При деформировании с ограничивающей поверхностью (деформирование в условиях всестороннего сжатия) закрываются микротрещины, царапины и другие дефекты изношенной поверхности, это хорошо видно на фотографиях границы перехода деформированной и недеформированной поверхностях (рис.5.27).

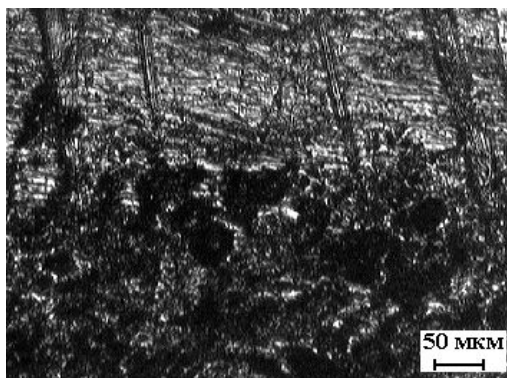


Рис.5.27. Участок перехода восстановленной и свободной поверхности

Значительное улучшение триботехнических свойств восстановленной поверхности может быть обусловлено двумя основными факторами: изменением механических свойств контактной поверхности в процессе восстановления и получением композиционной структуры при заполнении отверстий от индентора антифрикционным полимером.

В процессе восстановления происходит деформирование в условиях всестороннего сжатия, что способствует некоторому увеличению твердости

поверхностности. В зоне пластической деформации, примыкающей к ограничивающему деформации кондуктору, происходит залечивание дефектов, что оказывает положительное влияние на износостойкость контактной поверхности.

Антифрикционный полимер, вводимый в отверстия от индентора, формирует у поверхности композиционную структуру, а детали с такой структурой имеют значительно более высокие антифрикционные показатели и как следствие лучшую износостойкость, чем поверхности скольжения, полученные традиционными технологиями.

При трении возрастает температура, что приводит на композиционной контактной поверхности к возникновению рельефа за счет разницы температурного расширения основного материала и антифрикционного полимера, используемого для заполнения углублений от индентора. При возникновении рельефа антифрикционный полимер будет выполнять функцию твердой смазки и за счёт эффекта переноса, на контактной поверхности будет формироваться защитная плёнка из продуктов износа полимера. Наличие такой плёнки на рабочей поверхности детали существенно улучшает её противоизносные свойства.

Триботехнические композиционные материалы достаточно хорошо изучены, их использование увеличивается с каждым годом [13, 155], но широкое их использование сдерживается технологическими недостатками при производстве. Разработанный метод восстановления позволяет получить номинальную поверхность без использования сложного технологического оборудования, а так же улучшить триботехнические характеристики узла, что способствует снижению стоимости ремонта и повышает эксплуатационные характеристики агрегатов. Предлагаемый метод восстановления поверхности скольжения за счёт композиционной структуры обеспечивает такие условия работы, которые в случае применения типовых материалов можно получить только с помощью создания сложных систем смазки.

Трибоповерхность защищённая полимером обладает рядом положительных свойств:

- снижается нагрузка на основной материал,
- снижается коэффициент трение за счёт хороших антифрикционных свойств полимера,
- улучшается прирабатываемость поверхностей,
- уменьшается скорость изнашивания за счёт плёнки переноса,
- плёнки переноса способствует заделке небольших дефектов.

Все это объясняет значительное улучшение триботехнических свойств поверхностей, полученных пластическим деформированием с использованием прилегающей поверхности.

Анализ ряда работ исследователей [13, 109, 155, 162, 165], изучающих проблему улучшения трибоэлементов с использованием композиционных материалов показывает, что имеется два основных направления их реализации. Первое направление – формирование контактных поверхностей из композиционных материалов, форма которых наиболее полно соответствует номинальным геометрическим параметрам. Второе – создание поверхностей трения со сложным с регулярным профилем, параметры которого, выбираются исходя из конкретных условий эксплуатации детали. При повышении температуры в контакте с композиционным материалом геометрические параметры возникающего рельефа будут оказывать положительное влияние на параметры трения трибоэлемента, а при уменьшении температуры рабочей поверхности рельеф уменьшается, а форма восстановленной поверхности приближается к номинальной, сформированной с помощью прилегающей кондукторной поверхности, участвующей в деформировании.

При использовании традиционных технологий для получения наилучших антифрикционных свойств и достижения стабильной работы трибоузла требуется тщательно подбирать способы и режимы обработки, т.к. из-за различных механических свойств восстанавливаемого материала и антифрикционного полимера на контактной поверхности возможно формирование волнистости, а

в некоторых случаях даже микроразрушений и разрыхления. В разработанном методе восстановления изношенных деталей данная проблема решается с помощью ограничивающего деформации кондуктора, который обеспечивает деформируемой поверхности номинальные параметры и не допускает распространение антифрикционного материала за пределы сформированного участка.

Соответствующими технологическими приёмами можно добиться требуемого качества восстановленной поверхности по параметрам высоты шероховатости и относительной опорной длины, см. таб. 5.10. Во время работы трибоузла, за счёт повышения температуры на рабочей поверхности появляется регулярный рельеф с рядом геометрических параметров (высота рельефа, шаг и протяженность плёнки переноса), высота возникающего рельефа зависит от температуры, и с её ростом рельеф увеличивается.

При нагревании исследуемого трибоузла до температуры около 330К, на восстановленной разработанным методом поверхности, возникает некоторый рельеф с соответствующими геометрическими параметрами, который представлен на рис. 5.28.

Модель исследуемой поверхности описывается рядом геометрических характеристик: H - высота профиля рельефа, P - шаг вершин рельефа, d - диаметр отверстия наполненного антифрикционным полимером, R - радиус вершин выступов рельефа.

Для исследования эффекта возникновения рельефа на поверхности из-за повышения температуры трибоэлемента были проведены лабораторные испытания. Восстановленная поверхность нагревалась до температуры 100⁰С, после чего, проводились измерения высоты возникшего рельефа. Для измерения нагретый образец устанавливался на специальную плиту, и с помощью электронного датчика, опирающегося на выступивший из поверхности антифрикционный полимер, определялась его относительная высота.

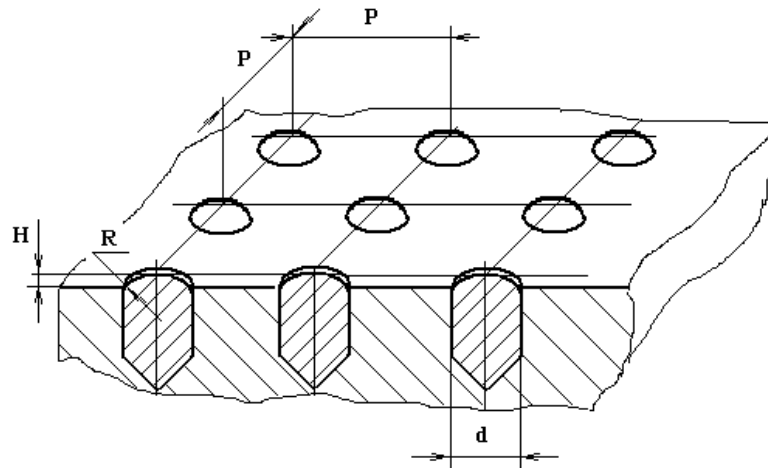


Рис.5.28. Модель рельефа восстановленной поверхности при повышении температуры
(1 – основной металл, 2 – антифрикционный полимер)

Результаты измерения сравнивались с показаниями, полученными на холодном образце, и по разнице показаний устанавливалась зависимость высоты рельефа от температуры (рис.5.29).

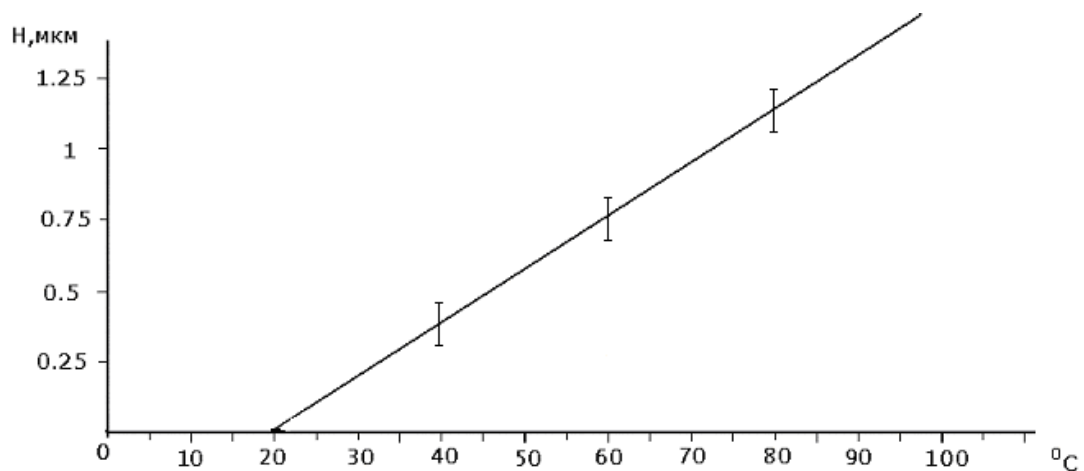


Рис.5.29. Изменение высота рельефа от температуры поверхности
восстановленного образца

В процессе испытаний на трение модели восстановленного трибоузла муфты фрезерующего устройства, выступивший на поверхность антифрикционный полимер изнашивался, и за счёт эффекта переноса на контактной поверхности муфты образовывалась плёнка переноса. Данная плёнка возникает за отверстием, заполненным антифрикционным полимером, и имеет доста-

точно чёткие границы вдоль вектора скорости относительного движения деталей муфты. Протяженность пятна переноса составляет от трёх до пяти диаметров отверстия от его края [24].

Для создания стабильной плёнки переноса на всём протяжении контактной поверхности муфты требуется расположить сетку точек деформирования, так относительно вектора скорости, чтобы изношенный антифрикционный полимер обеспечивал образование покрытия на расстоянии установленного моделированием шага внедрений индентора (рис.5.30).

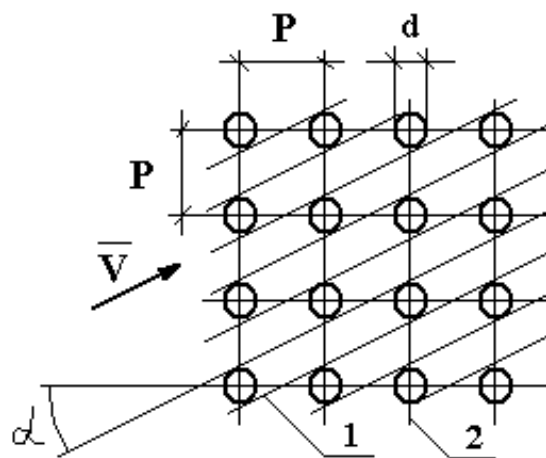


Рис. 5.30. Формирование плёнки переноса на контактной поверхности муфты
(α - угол между осью сетки отверстий 2 и вектором скорости V , P - шаг отверстий, 1 – положение границы плёнки переноса, d – диаметр отверстия)

На рис.5.30 представлена схема формирования плёнки переноса на восстановленной контактной поверхности муфты.

В результате проведённых исследований было установлено, что за счёт вспучивания антифрикционного полимера из-за нагрева контактной поверхности наблюдается устойчивый эффект самосмазывания. Это связано с тем, что из-за износа выступающих участков более мягкого антифрикционного полимера образуется тонкая плёнка переноса на поверхности основного материала (рис. 5.31).

Поверхность, имеющая композиционные свойства, является более устойчивой к износу. По мере истирания пленки переноса в контактное взаимодействие вступают открытые участки основного металла, работа трения

растёт, происходит разогрев трущихся поверхностей, в результате этого снова возникает рельеф на поверхности, и эффект само смазывания восстанавливается [116]. Процесс трения вновь стабилизируется.

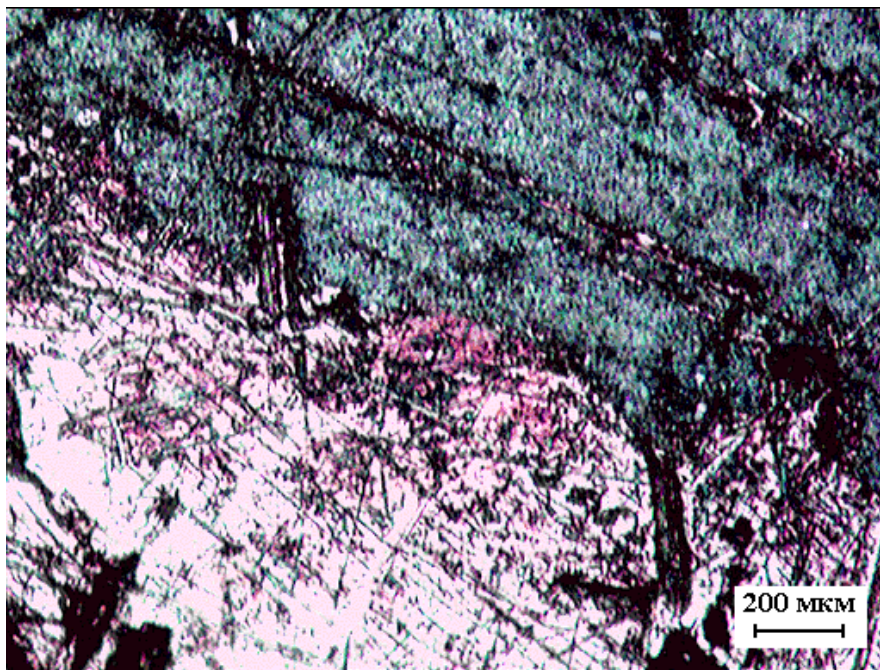


Рис.5.31. Граница пленки переноса, образовавшейся на восстановленной поверхности в процессе испытаний модели трибоузла на износ

Антифрикционный материал, выступающий на поверхности трения, снижает давление на основной материал за счёт переноса части нагрузки на себя. Предлагаемый антифрикционный полимер на эпоксидной основе выдерживает контактное давление до 90 МПа [155], что позволяет использовать его в условиях интенсивных нагрузок.

Предлагаемый способ восстановления можно использовать при ремонте контактной поверхности 4 муфты, расположенной в корпусе фрезы 2 (муфта для передачи крутящего момента на фрезу) (см. рис. 4.26).

Восстановленный предлагаемым способом корпус фрезы будет иметь улучшенные триботехнические характеристики, что обеспечит повышенный ресурс отремонтированному узлу, а при относительно невысокой стоимости ремонта может существенно уменьшить затраты на поддержание работоспособности торфяных технологических машин.

Способом восстановления, представленным на рис. 5.2 можно ремонтировать также посадочные поверхности под подшипники качения коробок скоростей и редукторов, выполненных из чугуна (рис. 5.32). В отверстие корпуса КПП 1 устанавливается оправка 2, соответствующая номинальному размеру отверстия. В оправке имеется выдвижной упор 4 служащий для предварительного деформирования восстанавливаемой поверхности и индентор 3, обеспечивающий перемещение деформируемого материала из углубления, полученного при внедрении, в зону изношенной поверхности. Привод индентора осуществляется от кулачкового вала 5, а перемещение оправки с помощью микровинта отсчётного устройства 6.

На рис. 5.32 представлена схема осуществления восстановления изношенной поверхности на стадии пластического деформирования и антифрикционного заполнения.

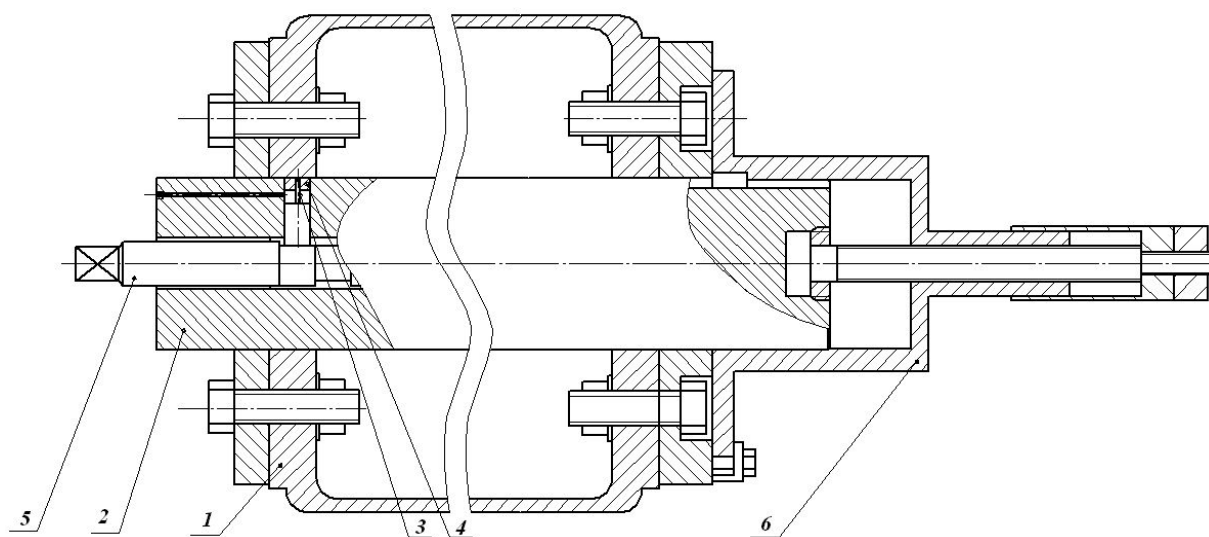


Рис. 5.32. Схема восстановления посадочных отверстий в корпусе

Стоимость восстановления корпуса коробки передач в несколько раз меньше новой детали, что обеспечивает снижение затрат на ремонт детали. Восстановленный предлагаемым способом корпус коробки передач соответствует всем требованиям новой детали и имеет такой же ресурс.

Таким образом, повышение надёжности узлов, их долговечности и использование современных технологий восстановления может существенно снизить

затраты на поддержание работоспособности ТМ, и повысить эффективность их использования.

5.4 РАЗРАБОТКА УСТРОЙСТВА ДЛЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ИЗНОШЕННОЙ ПОВЕРХНОСТИ МУФТЫ ТОРФЯНОЙ ФРЕЗЫ

Корпус фрезы торфяного фрезерующего устройства, чаще всего выходит из строя из-за износа контактной поверхности муфты для передачи крутящего момента при её эксплуатации (см. рис. 4.26). В сопряжении сферической части муфты, установленной на шлицы выходного вала, и цилиндрической поверхности корпуса фрезы используется посадка $\varnothing 100 \text{ H8/h8}$. Посадка характеризуется зазором в сопряжении деталей (минимальный зазор $S_{\min} = 0$, максимальный $S_{\max} = 0.108 \text{ мм}$). Так как корпус фрезы из-за технологических погрешностей имеет некоторое смещение центра масс относительно оси вращения, то при работе смещается за счёт зазора в определённую сторону, что приводит к локальному контакту. При этом для новой фрезы динамическая составляющая от дисбаланса корпуса может достигать 300 Н. При увеличении зазора в муфте до 0,3 мм из-за износа, дисбаланс кратно увеличивается, что приводит к преждевременному выходу из строя опорного подшипника. Причём балансировка фрезы не поможет решить эту проблему.

В недавнем прошлом изношенную поверхность фрезы растачивали и запрессовывались в отверстия ремонтную втулку, которая впоследствии ещё раз обрабатывалась. Так как корпус фрезы имеет значительные размеры, то процесс ремонта в этом случае достаточно трудоемок, требует сложного технологического оборудования. Кроме того, фреза, бывшая в эксплуатации, имеет на наружной поверхности дефекты от механического воздействия торфа и коррозии, что существенно снижает точность базирования детали при обработке, и как следствие ухудшает качество отремонтированной фрезы. Фреза, восстановленная таким способом, имеет ресурс значительно меньше, чем новая.

Предлагаемый способ восстановления локального износа по прилегающей поверхности, с последующим заполнением углублений от индентора антифрикционным полимером, позволяет получить рабочие поверхности скольжения с композиционной структурой, что обеспечивает лучшие триботехнические характеристики узла трения, даже чем у нового полученного традиционными методами.

Для обеспечения требуемых геометрических характеристик восстановленного узла необходимо рассмотреть его конструктивные особенности. Опоры кулачковой сферической муфты, представляют собой, цилиндрические отверстия диаметром от 80 до 100 мм, соосные наружной поверхности корпуса фрезы. При восстановлении опоры необходимо обеспечить их соосность, для этого в конструкции деформирующего приспособления должны присутствовать конструктивные элементы, обеспечивающие постоянное и точное базирование прилегающей поверхности относительно корпуса восстанавливаемой детали. Эти элементы должны выверяться относительно корпуса восстанавливаемой детали и надёжно закрепляться на ней, а сниматься только после завершения всех контрольных и восстановительных операций.

Перед установкой кондукторного вала *1* в отверстие восстанавливаемой детали *2* крепится втулка *3* с самоцентрирующим шариковым механизмом (рис. 5.33). Эта втулка центрируется по неизношенной части восстанавливаемой поверхности. Во внутренне отверстие центрирующей втулки *3* устанавливается кондукторный вал, представляющий собой прилегающую поверхность к восстанавливаемой опоре кулачковой муфты, он должен быть изготовлен таким образом, что бы цилиндрическая поверхность калибрующей шейки была соосна корпусу фрезы, и имела незначительные отклонения формы, лежащие в пределах упругой релаксации деформированной поверхности при восстановлении.

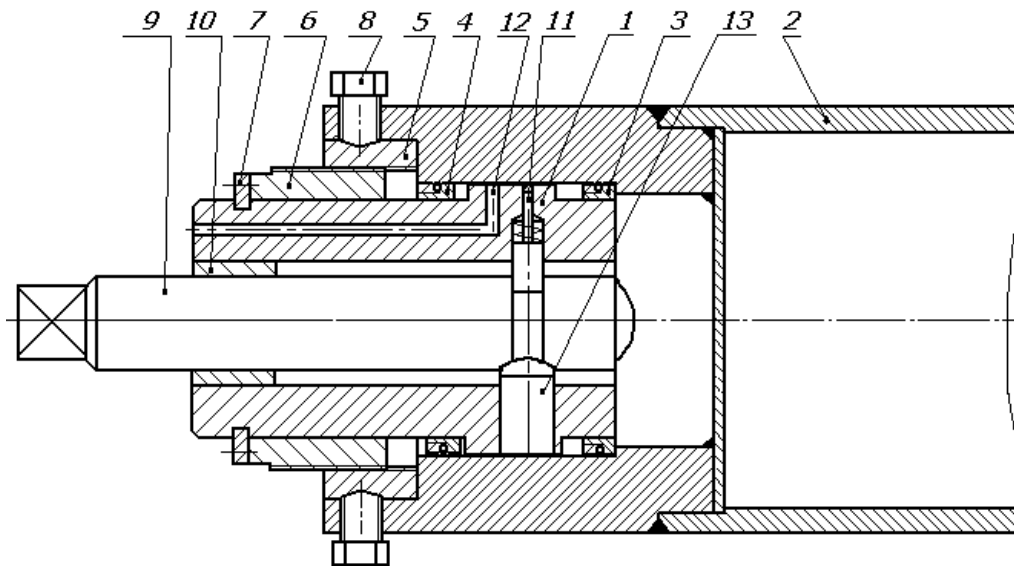


Рис.5.33 Схема восстановления опорной поверхности кулачковой муфты

Отвечающий таким требованиям кондукторный вал восстанавливающего приспособления, обеспечит необходимую точность ремонтируемой детали и позволит обеспечить перемещение калибрующего устройства в позиции локального деформирования, а также извлечение после выполнения всех операций. Затем на кондукторный вал устанавливается центрирующая втулка 4, и вводится в отверстие восстанавливаемой детали. За счёт шарикового центрирующего механизма втулка выверяется по неизношенной части восстанавливаемой поверхности и фиксируется в ней. Далее на кондукторный вал устанавливается резьбовая втулка 6 с гайкой 5, которая фиксируется в корпусе 2 болтами 8. Лимб 7 вводится в паз кондукторного вала и крепится винтами к торцу резьбовой втулки 6.

В кондукторном валу просверлено осевое отверстие. В отверстии имеется втулка 10, которая служит опорой эксцентрикового вала 9, предназначенного для обеспечения осевого перемещения индентора 11 во время сканирования и восстановления изношенной поверхности подшипника скольжения.

Кроме того, в валу имеются отверстие 12 для подачи антифрикционного полимера и отверстие для установки упора 13, предназначенного для опоры эксцентрикового вала в процессе деформирования. Возвращение индентора в исходное положение осуществляется за счёт пружины установленной на нём.

В процессе выверки кондукторного вала, выполняющего функцию прилегающей поверхности, он занимает соосное положение относительно контактной поверхности муфты. Однако при этом из-за отклонений размеров отверстия может возникать существенный зазор между прилегающей поверхностью кондукторного вала и опорной поверхностью корпуса муфты с обеих её сторон, это может привести к его деформации в процессе внедрения индентора. Компенсации от усилия деформирования, обеспечивается за счёт специального элемента – дополнительной выдвижной опоры 13. Эксцентриковый вал 9, отвечающий за перемещение индентора 11, опирается на выдвижную опору 13, а с другой стороны через кулачок, передаёт нагрузку на индентор 11, что обеспечивает нужное положение прилегающей поверхности, но не приводит к деформациям кондукторного вала из-за усилия деформирования.

Для точного определения положения кондукторного относительно восстанавливаемой поверхности детали используется отсчётное устройство, обладающее двумя элементами контроля перемещений, лимбом 7 с градусной сеткой, отвечающей за осевое положение кондукторного вала, и градусной сеткой, определяющей угол его поворота относительно корпуса восстанавливаемой детали.

Для поворота кондукторного вала используется рычаг и фиксатор (на рис.5.33 не показаны), с помощью которых происходит поворот в требуемое положение и фиксация.

Перемещение кондукторного вала в осевом направлении обеспечивает свободный доступ индентора к восстанавливаемой поверхности по всей её длине.

Подача антифрикционного полимера к сформированным углублениям, происходит с помощью каналов в кондукторном валу связанных с отверстием 12.

Глубина внедрения и величина восстанавливаемого зазора определяются по отклонению рукоятки устанавливаемой на эксцентриковый вал и

угломерной шкале, которая крепится к кондукторному валу хомутом после установки его в корпус фрезы (рукоятка, угломерная шкала и крепёжный хомут на рис.5.33 не показаны).

Перед выверкой кондукторного вала, его калибрующая поверхность обрабатывается противoadгезионной смазкой, состоящей из 20 % церезина и смеси бензина «галоша» и уайт-спирита в соотношении 2:1, это предотвращает адгезию антифрикционного материала с корпусом. После этого осуществляется сканирование изношенной поверхности. Для этой процедуры лимб 7 выверяется в нулевое положение и закрепляется винтами к резьбовой втулке, устанавливается и закрепляется хомутом угломерная шкала, и крепится рукоятка со стрелкой в положении, соответствующем нулевому делению. Величина соответствующего зазора устанавливается за счёт поворота стрелки на рукоятке относительно угломерной шкалы. По результатам сканирования на основе компьютерного моделирования определяется точное положение, а также величина износа в соответствии с топограммой восстанавливаемой поверхности. Число принятых точек деформирования и глубина внедрения зависят от степени износа восстанавливаемой поверхности. После получения на основе моделирования плана восстановления (положение точек деформирования и глубина внедрения в них) проводилось деформирование так, чтобы площадь восстановленной поверхности была больше площади отверстия от индентора в четыре – пять раз. При этом после деформирования проводилось заполнение отверстия от индентора, полученное на предыдущем этапе, посредством специального канала, через который под давлением подавался антифрикционный полимер. В качестве наполнителя использовалась пастообразная композиция УП-5-222.

После отверждения антифрикционного материала восстановленная деталь осматривалась и отправлялась на сборку.

При создании аналитической модели процесса восстановления, позволяющей установить функциональные связи между геометрическими и силовыми параметрами, требуется учитывать, как величину, так и положение об-

ласти износа на конкретной детали. Кроме того, при решении поставленной задачи необходима оптимизация процесса формоизменения исходя из условия минимального уровня деформаций, а также приобретения улучшенных свойств поверхностями трения. В большой мере этим условиям отвечает система уравнений, описывающих процесс деформирования восстановленной поверхности в рамках принятых ограничений. Уравнения (5.22) отражают основные теоретические зависимости, использованные для решения представленной задачи. В уравнениях (5.23) представлены логические основы математического алгоритма, используемого при восстановлении.

$$\begin{cases} \frac{q}{2k} = \frac{\int_{f_i} v_i df_i + 2\mu \int_{f_j} v_j df_j}{2f_0 v_0} \\ \sigma_T = \text{const} \\ |\sigma_1 - \sigma_2| = 2k \\ \tau = \mu k \end{cases}, \quad (5.22)$$

$$\begin{cases} V_{из} = \sum v_{ij} (M_{ij}) \\ i = f(p); j = f(p), m < p < n \\ V_{из} = \sum V_{ij} (h_{ij}), r < h < s \\ P = \sum P_{ij} (h_{ij}) \rightarrow \min \end{cases}, \quad (5.23)$$

где v_{ij} – скорости смещения соседних жестких блоков, f_i – площади поверхностей скольжения между соседними блоками, q – давление на поверхности f_0 , f_j – площади контактной поверхности инструмента где возникают силы трения, μ – коэффициент пластического трения, v_0 – скорость внедрения инструмента, σ_1 и σ_2 – главные нормальные напряжения, k – предел текучести при сдвиге, $V_{из}$ – объём изношенной части поверхности, v_{ij} – объём ячеек массива M_{ij} описывающего изношенную область, i и j – номера ячеек, p – шаг между соседними точками деформирования, V_{ij} – объём восстановления в локальной точке, P_{ij} – усилие обеспечивающее деформацию в точке локальной, P – суммарное усилие во всех точках, h – глубина внедрения индентора в локальной точке, m и n – наибольшее и наименьшее значение шага, r и s – наибольшее и наименьшее значение глубины внедрения.

В модели принято наименьшее значение шага m , равное диаметру индентора d , наибольшее значение шага n равное $5d$, которое определяется из условий формирования стабильной плёнки переноса на контактной поверхности.

Значение минимальной глубины внедрения r определено в зависимости от высоты конуса индентора – $0.5d$, при этом условии обеспечивается гарантированное вытеснение деформируемого материала из отверстия в кондукторной плите. Значение максимальной глубины внедрения $s = 3d$ установлено на основе экспериментальных данных в процессе деформирования в локальной точке.

ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ

1. В настоящее время необходимо внедрение таких методов восстановления, которые бы позволили в условиях относительно небольших торфяных предприятий производить восстановление сложных дорогостоящих деталей и узлов на качественно новом уровне, с использованием относительно небольших и несложных устройств. Разработанный в представленной диссертации способ восстановления износа трибоэлементов торфяных машин наиболее полно соответствует требованиям нынешнего ремонтного производства.

2. Для теоретического анализа пластического деформирования при восстановлении изношенной поверхности на основе энергетического метода была получена зависимость между глубиной внедрения индентора и силой внедрения, что позволило сделать предварительную оценку силовых параметров изучаемого процесса.

3. Анализ процесса деформирования с помощью системы инженерного анализа ANSYS подтвердил основные закономерности, полученные теоретическим методом.

4. Проведённые эмпирические исследования процесса деформирования в локальной точке подтвердили закономерности полученные теоретически.

5. Проведёнными исследованиями установлено, что детали, восстановленные предлагаемым способом, имеют ресурс на 30 – 40% больше, чем аналогичные, полученные традиционными методами.

6. Повышенный ресурс обеспечивается улучшением механических свойств контактной поверхности и приобретением в процессе восстановления композиционной структуры.

6 АНАЛИЗ ЭФФЕКТА ОТ РЕАЛИЗАЦИИ МЕТОДОЛОГИИ ЭФФЕКТИВНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ ТРИБОЭЛЕМЕНТОВ ТОРФЯНЫХ МАШИН

6.1 ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЭКСПЛУАТАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МАШИН

Современные технологии производства обеспечивают возможность достижения высоких показателей надежности технологических машин. Однако принятие конкретных решений о повышении качества изделий должно опираться на экономический анализ.

Повышение качества машин может осуществляться за счет совершенствования конструкции, использования современных материалов и высокотехнологичных методов сохранения и восстановления работоспособности. В то же время затраты на такие мероприятия в процессе эксплуатации могут не возместиться. Поэтому принимаемое технологическое или организационно-техническое решение должно обеспечивать наибольший экономический эффект от использования ТМ с учетом затрат на производство и эксплуатацию машины.

Изменение $\mathcal{E}(t)$ экономического эффекта от использования технологической машины можно представить в виде

$$\mathcal{E}(t) = C(t) - (C_u + C_o(t)) \quad (6.1)$$

где $C(t)$ — стоимость работ выполняемых торфяной машиной за время t ; C_u — затраты на производство ТМ (в том числе на проектные работы, производство, испытания, наладку и доставку к месту добычи); $C_o(t)$ — затраты на эксплуатацию торфяной машины с учетом восстановления работоспособности [63].

Проводя анализ изменения экономического эффекта $\mathcal{E}(t)$ при эксплуатации торфяной машины, можно выделить четыре характерных периода использования ТМ (рис. 6.1).

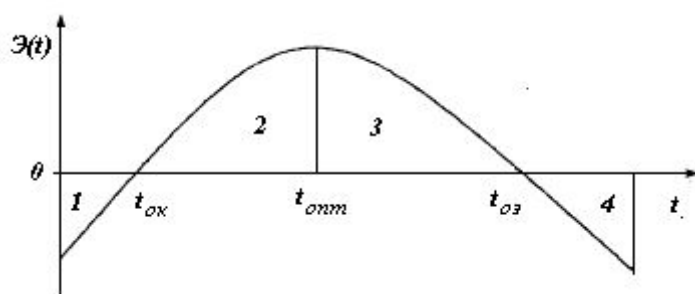


Рис. 6.1. Изменение экономического эффекта $\mathcal{E}(t)$ при эксплуатации торфяной машины от наработки t

В начале технического использования торфяной машины протекает период окупаемости $t_{ок}$, он связан с незначительными затратами на эксплуатацию, очень важно, что бы изделие как можно раньше начало приносить потребителю прибыль.

Следующий период эксплуатации наступает, когда интенсивность роста стоимости выполняемой работы $\Delta C(t)$ постепенно выравнивается с интенсивностью изменения стоимости эксплуатационных затрат на торфяную машину ($\Delta C_s(t)$), при этом на большей части этого периода разница между $\Delta C(t)$ и $\Delta C_s(t)$ значительно больше нуля, что обеспечивает получение высокой прибыли в процессе использования машины. Далее наступает момент $t_{опт}$, когда происходит выравнивание интенсивности увеличения стоимости выполняемых ТМ работ и затрат на поддержание и восстановлению работоспособности ($\Delta C(t) = \Delta C_s(t)$). На данном периоде обеспечивается наибольший экономический эффект от использования технологической машины, а на его длительность определяющее значение оказывает качество изготовления и режимы технической эксплуатации.

На третьем периоде эксплуатации после достижения $t_{опт}$, если не проводить модернизацию торфяной машины происходит снижение производительности за счёт роста количества отказов и растут затраты на восстановление

работоспособности ($\Delta C_9(t) > \Delta C(t)$), наступает определённый момент времени t_{o9} , когда стоимость выполненных работ становится равной стоимости работ по поддержанию работоспособности. Эксплуатация без модернизации торфяной машины может быть обоснована только невозможностью вывода её из технологической цепочки до конца сезона добычи.

При дальнейшем продолжении эксплуатации ТМ превышающей t_{o9} начинается четвертый период, во время которого экономический эффект от эксплуатации машины становится отрицательным, наблюдается убыточное производство.

Эксплуатация торфяной машины в четвертом периоде может быть оправдана только в случае комплексной механизации производственных процессов добычи, когда отсутствует возможность замены машины или для этого требуются значительные затраты, существенно увеличивающие стоимость добытого торфа.

Анализируя весь жизненный цикл ТМ, очень важно эффективно распределять средства на производство и эксплуатацию. В большинстве случаев выгоднее увеличивать затраты на изготовление (при этом как правило повышается надежность), но в то же время снижаются затраты на сохранение и восстановление работоспособности машины в период добычи, так как при этом можно существенно повысить коэффициент использования метеоблагоприятных дней и как следствие повысить объёмы добычи. Однако с ростом затрат на изготовление новых торфяных машин необходимо экономическое обоснование этого процесса.

Решение задачи по распределению ресурсов при создании и эксплуатации ТМ возможно при использовании компьютерных технологий и специализированных средств диагностики, обеспечивающих наиболее качественный сбор необходимой информации о техническом состоянии объекта и анализ изменения экономической эффективности от наработки торфяной машины. Это позволяет с достаточной точностью определять необходимые граничные условия

в процессе реализации компьютерных технологий и получать наивысший экономический эффект от использования ТМ.

Использование компьютерных технологий при эксплуатации ТМ с учетом динамики значений $C(t)$ и $C_3(t)$ позволяет оперативно по каждой торфяной машине определять целесообразность дальнейшего их использования при любых значениях наработки, и стимулировать у персонала ответственное отношение к сохранению ресурса техники.

6.2 ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ПРОЦЕССА ВОССТАНОВЛЕНИЯ КОРПУСА ТОРФЯНОЙ ФРЕЗЫ

Для сравнительной оценки, новой и восстановленной деталей необходимо стоимость восстановления:

$$C_B = C_{\Pi} + H, \text{ руб.} \quad (6.2)$$

где C_{Π} - полная себестоимость восстановления детали, руб.;

$H = 1.25 C_{\Pi}$ - прибыль, полученная ремонтным предприятием, руб.

Полная себестоимость восстановления изношенной детали будет:

$$C_{\Pi} = C_{\text{ПРН}} + C_{\text{РМ}} + C_{\text{ОП}} + C_{\text{ОХ}} + C_{\text{ВП}}, \text{ руб.} \quad (6.3)$$

где $C_{\text{ПРН}}$ - зарплата рабочих с соответствующими начислениями, руб.;

$C_{\text{РМ}}$ - стоимость расходных ремонтных материалов, руб.;

$C_{\text{ОХ}}$, $C_{\text{ОП}}$, $C_{\text{ВП}}$ - общехозяйственные, общепроизводственные и внепроизводственные накладные расходы, руб.

Зараплата рабочих складывается из нескольких элементов:

$$C_{\text{ПРН}} = C_{\text{ПР}} + C_{\text{СОЦ}} + C_{\text{ДОП}}, \text{ руб.} \quad (6.4)$$

где $C_{\text{ПР}}$ - основная заработная плата, руб.;

$C_{\text{СОЦ}}$ – начисления по соцстраху, руб;

$C_{\text{ДОП}}$ – дополнительная заработная плата, руб.

Основная зарплата рабочих определяется:

$$C_{\text{ПР}} = 0.01 \times T_{\text{шт.к}} \times C_{\text{ч}} \times K_{\text{ДОП}}, \text{ руб.} \quad (6.5)$$

где $T_{\text{шт.к}}$ – штучно-калькуляционное время, ч.;

$C_{\text{ч}} = 208$ руб/ч – основная ставка рабочих, начисляемая по средним разрядам;

$K_{\text{ДОП}}$ – коэффициент, отражающий доплаты к основной зарплате, принимается 1.025 - 1.03

$$C_{\text{ПР}} = 0.01 \times 2,158 \times 208 \times 1,028 = 461,44 \text{ руб.}$$

Дополнительная зарплата рабочих, занятых в производстве при размере партии восстанавливаемых деталей 100 штук:

$$C_{\text{ДОП}} = \frac{(5...12) \times C_{\text{ПР}}}{100} = \frac{(10 \times 461,44)}{100} = 46,14 \text{ руб.} \quad (6.6)$$

Начисления по социальному страхованию:

$$C_{\text{СОЦ}} = \frac{R_{\text{СОЦ}} \times (C_{\text{ПР}} + C_{\text{ДОП}})}{100} = \frac{38,5 \times (461,44 + 46,14)}{100} = 195,44 \text{ руб.} \quad (6.7)$$

где $R_{\text{СОЦ}}$ составляет 38.5% - ставка налога.

В таблице 6.1 представлено время на выполнение операций восстановления.

Таблица 6.1

Время осуществления переходов по восстановлению детали

Действие.	Время, ч.
Заглубление и извлечение индентора в изношенную поверхность и последующее перемещение в следующую позицию	0,003×150
Измерение изношенной поверхности	0,25
Установка, снятие и закрепление изношенной детали	0,2
Установка и выверка приспособления для восстановления в детали	0,7
Разборка приспособления для восстановления	0,3
Контроль восстановленных поверхностей	0,25
Итого $T_{шт.к.}$	2,158

Величина стоимости общепроизводственных, внепроизводственных и общехозяйственных накладных расходов можно определить калькулированием затрат или рассчитать укрупненно:

$$C_{ОП} = \frac{C_{ПР} \times R_{ОП}}{100}, \text{ руб.}, \quad (6.8)$$

$$C_{ОХ} = \frac{C_{ПР} \times R_{ОХ}}{100}, \text{ руб.}, \quad (6.9)$$

$$C_{ВП} = \frac{C_{ПР} \times R_{ВП}}{100}, \text{ руб.} \quad (6.10)$$

где $R_{ОП}$, $R_{ВП}$, $R_{ОХ}$ – процент общепроизводственных, внепроизводственных и общехозяйственных расходов (их величины – 60...75%, 0.18...0.8%, 12.5...13.8%).

$$C_{ОП} = \frac{C_{ПР} \times R_{ОП}}{100} = \frac{461,44 \times 68}{100} = 313,76 \text{ руб.}; \quad (6.11)$$

$$C_{ОХ} = \frac{C_{ПР} \times R_{ОХ}}{100} = \frac{461,44 \times 13}{100} = 60 \text{ руб.}; \quad (6.12)$$

$$C_{BП} = \frac{C_{ПР} \times R_{BП}}{100} = \frac{461,44 \times 0,5}{100} = 2,28 \text{ руб.}; \quad (6.13)$$

$$C_{ПРН} = C_{ПР} + C_{ДОП} + C_{СОЦ} = 461,44 + 46,14 + 195,44 = 703,04 \text{ руб.} \quad (6.14)$$

В этом случае полная себестоимость процесса восстановления детали:

$$C_{П} = 703,04 + 0 + 313,76 + 60 + 2,28 = 1079,08 \approx 1080 \text{ руб.}$$

Для оценки экономических показателей восстановления необходимо установить стоимость изготовления приспособления для восстановления, она была получена по величине средние цеховых затрат инструментального цеха ОАО «ТВЗ» и составила 32500 руб. за комплект. По предварительной оценке, одно приспособление может использоваться при восстановлении около 100 корпусов торфяных фрез, в этом случае затраты по амортизации на одно изделие C_A составят 325 руб., а полная себестоимость процесса восстановления, приходящаяся на одну деталь:

$$C_{П} = C_{П} + C_A = 1080 + 325 = 1405 \text{ руб.} \quad (6.15)$$

Анализ эффективности использования разработанного приспособления.

Уровень рентабельности соответствующей продукции:

$$P_{П} = \frac{(C_{ОЦ} - C_{П})}{C_{П}} \times 100, \% \quad (6.16)$$

где $C_{ОЦ} = 7500 \text{ руб.}$ – цена детали.

$$P_{П} = \frac{(C_{ОЦ} - C_{П})}{C_{П}} \times 100 = \frac{(15000 - 1405)}{1405} \times 100 = 967\%.$$

Ориентировочная прибыль ремонтного предприятия:

$$\Pi = (C_{ОЦ} - C_{П}) \times N . \text{ руб.} \quad (6.17)$$

где N – годовая программа ремонта деталей, шт. - 100.

$$\Pi = (C_{ОЦ} - C_{П}) \times N = (15000 - 1405) \times 100 = 1359500 \text{ руб.}$$

Следовательно, при восстановлении 100 фрезерных барабанов в год с помощью данного приспособления прибыль за год может составить 1359500 руб., что подтверждает высокую эффективность разработанного метода восстановления.

В настоящее время только использование самых современных технологий может обеспечить необходимое качество функционирования ТМ и обеспечить высокую эффективность использования машин, что позволит торфяной индустрии стать более значимой частью топливно-энергетического комплекса страны.

6.3 СРАВНЕНИЕ РАЗЛИЧНЫХ ВАРИАНТОВ ЭКСПЛУАТАЦИИ ТРИБОЭЛЕМЕНТОВ ТОРФЯНЫХ МАШИН С ПОМОЩЬЮ ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ

Результаты предлагаемых мероприятий могут по-разному влиять на суммарный эффект от эксплуатации ТМ, следовательно, требуется провести анализ основных источников эффекта на базе предложенных решений, что поможет обеспечить наиболее эффективное использование конкретной машины.

Реализация системы мероприятия по совершенствованию эксплуатации трибоэлементов ТМ может привести в действие как один, так и несколько источников повышения эффекта. Однако в некоторых случаях отдельные источники могут обеспечить как положительный эффект, так и отрицательный.

Оценивая результативность предлагаемой системы эффективной эксплуатации трибоэлементов торфяных машин, требуется выявить наиболее значимые источники, которые влияют на эффективность эксплуатации, и провести конкретные расчеты с использованием разработанных методик.

Методы воздействия на параметры эксплуатации конкретной машины зависят от большого количества факторов и каждое реализуемое мероприятие строго индивидуально, и определяется состоянием ТМ и внешним воздействием на неё (климатические и организационно-технические факторы).

Эффект при эксплуатации торфяной машины за сезон можно определить по формуле:

$$C(t) = q'_g \times (t_{\text{ном}} - t_{\text{ТОиР}} - t_{\text{мет}} - t_{\text{опр}}) - C_3(t), \quad (6.18)$$

так как на планируемый период неизвестно время возникновения $t_{\text{мет}}$ – метео-неблагоприятных условий, $t_{\text{опр}}$ – потерь по организационным причинам и $t_{\text{ТОиР}}$ – момент проведения ТО и ремонтов, то определить основные показатели можно на основе исследования на имитационной модели. Тогда выражение примет вид,

$$C(t) = q'_g \times t f^i(t, y^1(t), \dots, y^n(t), z^1(t), \dots, z^r(t)) - C_3(t), \quad (6.19)$$

где, q'_g – часовая производительность технологической машины в рублях (в пересчёте на стоимость добытого торфа за час), t – время работы машины, f^i – функция изменения состояния элементов машины в зависимости от возможности добычи торфа, C_3 – эксплуатационные затраты.

При условии $\lim f^i \rightarrow \text{opt}$ эффективность $C(t)$ использования торфяной машины за сезон добычи будет наивысшей.

Значение часовой производительности q'_g можно определить из стоимости добытого торфа за один час. В соответствии с принятой технологической схемой и производительностью торфяной машины выбираем технологический маршрут (см. таб. 2.2). Например, при четвёртой схемы технологического маршрута, при пневматической уборке торфа может использоваться два фрезера Ф-6,5, одна ворошилка ВС-9.6 и четыре пневмоуборочных машины МПТУ-30.

За один час в среднем обрабатывается площадь около шести гектар, известно количество добываемого торфа с гектара 19,6 тонн (см. стр. 185 [178]), можно определить суммарный объём – 117,6 тонн. При цене за тонну фрезерного торфа 960 рублей, стоимость добытого за час сырья будет 112 тыс. руб. При затратах около 35% (по данным ОАО «Васильевский мох») на подготовку

месторождения, ремонт площадей и транспортирование продукции, стоимость торфа приходящегося на час добычи будет приблизительно 84 тыс. руб.

Так как в принятом технологическом маршруте участвует семь машин, то на одну машину в час условно будет приходиться объём работ на 12 тыс. руб.

Представленное значение часовой производительности торфяной машины является условным, но при анализе эффективности использования ТМ применялись относительные показатели, поэтому некоторые упрощения в анализе нивелировались.

Для анализа эффективности эксплуатации ТМ использовалась относительная эффективность $\Delta\mathcal{E}$, которая определяется как отношение объёма выполненных работ (в денежном эквиваленте – рублях) торфяной машиной по результатам моделирования процесса эксплуатации Q_{mod} к объёму работ машины при полном совпадении операций по восстановлению работоспособности с метеонеблагоприятными днями Q_{100}

$$\Delta\mathcal{E} = Q_{mod} / Q_{100}. \quad (6.20)$$

Представленная величина показывает потенциальные возможности совершенствования технологического процесса добычи торфа с точки зрения наиболее полного использования метеоблагоприятных дней и позволяет провести сравнительную оценку различных вариантов эксплуатации торфяных машин.

Для реальных условий эксплуатации торфяных машин относительная эффективность должна составлять свыше 0,8, что соответствует данным полученным в ОАО «Васильевский мох».

Экономический эффект от сокращения времени на техническое обслуживание и ремонт за счёт модификации трибоэлементов определялся по формуле:

$$\mathcal{E}_{TOP} = (t'_{TOP} - t''_{TOP}) \times Z_{TOP}, \quad (6.21)$$

где $t'_{\text{ТОР}}$ и $t''_{\text{ТОР}}$ — затраты времени на техническое обслуживание и ремонт (ТО и Р) за определенный период времени до и после внедрения системы эффективной эксплуатации ТМ, ч; $Z_{\text{ТОР}}$ — средние часовые затраты на проведение ТО и Р конкретной машины, руб. По данным ОАО «Васильевский мох» средние затраты на восстановление работоспособности МТФ-43А составляют 2350 рублей на один чел. ч. (по данным 2012 г.).

Решить задачу оценки эффективности использования ТМ можно с использованием имитационной модели эксплуатации технологической машины.

После запуска системы анализа технического состояния торфяной машины необходимо перейти на вкладку «Редактирование структуры», выбрать рассматриваемое сопряжение (втулка и ось балансира, показано стрелочкой см. рис. 4.40).

В диалоговом окне появятся свойства этого сопряжения, с помощью «прокрутки» в указанном окне находятся соответствующие свойства и изменяются на новые. Так при использовании разработанного самосмазывающегося материала (модифицированного капролона-42) интервал обслуживания сопряжения увеличивается до 960 мото. ч., соответственно, в разделах свойств «Периодичность ТО-1, 60 мото.ч.» и «Периодичность ТО-2, 240 мото.ч.» необходимо убрать галочки. Аналогичные операции проводятся для других модифицированных сопряжений – трибоэлементов, после чего нажимается кнопка «Сохранить» (объем модифицированных трибоэлементов около 10%).

После изменения свойств, модифицированных трибоэлементов необходимо перейти на вкладку «Прогнозирование обслуживания» (рис. 6.2), где требуется выбрать соответствующие условия и провести моделирование.

В представленном диалоговом окне система выводит элементы, требующие обслуживания в соответствии с текущей наработкой машины. Для моделирования эксплуатации в установленный период необходимо в открывшейся вкладке указать погодные условия. Для этого требуется нажать кнопку «Погода» и на вкладке установить галочки в соответствующие ячейки в зависимости от прогноза погоды на десять дней. После нажатия кнопки «ОК» нужно в от-

крытую вкладку установить количество метеонеблагоприятных дней в текущем месяце и ещё раз нажать кнопку «ОК». Далее нужно выбрать условия анализа на вкладке «Параметры расчёта» и запустить анализ.

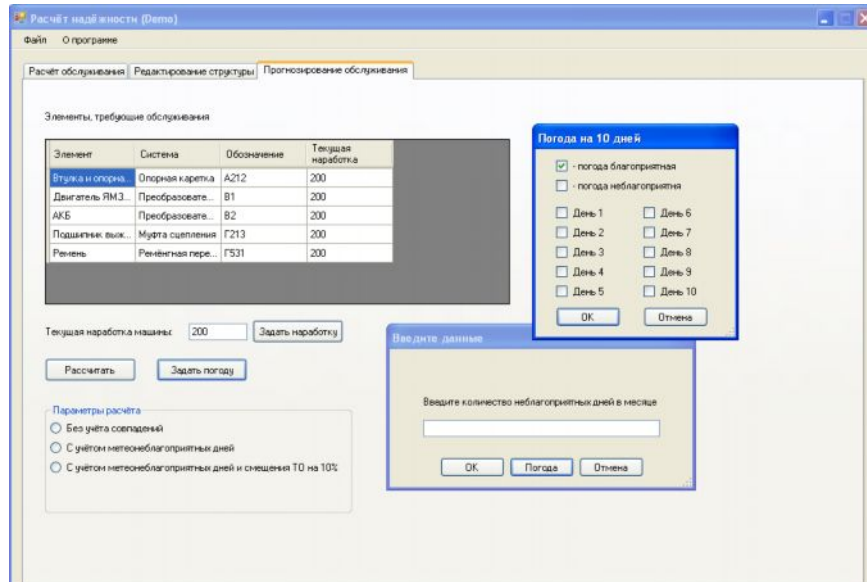


Рис.6.2. Диалоговое окно системы анализа технического состояния при выборе условий эксплуатации за выбранный период

После выполнения указанных операций в диалоговом окне отображаются результаты анализа в виде файла с расширение xls (рис. 6.3).

N107							
	B	C	D	E	F	G	H
69	B1	Преобразователи энергии	Двигатель	2			
70	B2	Преобразователи энергии	АКБ	0,25			
71	G213	Муфта сцепления	Подшипник выжимной и направляющая втулка	0,25			
72	G331	Ременная передача	Ремень	0,25			
73				3			
74							
75	Номер по порядку	Общая наработка ко времени ТО	Оставшаяся наработка до ТО			Предполагаемый день проведения ТО	30
76	5	376	176			Внеочередное обслуживание в связи с выходом из строя эле	
77	Код	Система	Элемент	Трудоемкость			
78	A233	Колесо поддерживающее	Подшипник поддерживающего колеса	0,5			
79				0,5			
80							
81	Номер по порядку	Общая наработка ко времени ТО	Оставшаяся наработка до ТО			Предполагаемый день проведения ТО	33
82	6	380	180			Внеочередное обслуживание в связи с выходом из строя эле	
83	Код	Система	Элемент	Трудоемкость			
84	G721	Цепная передача 1	Цепь и звездочка	0,5			
85				0,5			
86							
87	Номер по порядку	Общая наработка ко времени ТО	Оставшаяся наработка до ТО			Предполагаемый день проведения ТО	36
88	7	383	183			Обслуживание совмещено с плохими погодными условиями	
89	Код	Система	Элемент	Трудоемкость			
90	A212	Опорная каретка	Втулка и опорная ось	0,25			
91	B1	Преобразователи энергии	Двигатель	2			
92	B2	Преобразователи энергии	АКБ	0,25			
93	G213	Муфта сцепления	Подшипник выжимной и направляющая втулка	0,25			
94	G331	Ременная передача	Ремень	0,25			
95				3			

Рис.6.3. Результаты анализа обслуживания торфяной машины

В результатах анализа представлены обслуживаемые элементы, трудоёмкость их обслуживания и день проведения соответствующих операций ТО. Так же выводится общее число часов работы машины и времени нахождения в ремонте и обслуживании.

Выявляя наиболее значимые свойства сопряжений, на основе структурной модели и модифицируя трибоэлементы, можно управлять изменением технического состояния узлов и торфяной машины в целом, что позволяет улучшить эксплуатацию и повысить эффективность машин.

Применение системы диагностирования в сочетании с информационными технологиями, обеспечивает анализ изменения контролируемых параметров на всём интервале эксплуатации для каждой машины индивидуально, что позволяет учитывать особенности ТМ, достигая при этом высокой эффективности использования.

При решении задачи повышения эффективности использования ТМ наибольший эффект достигается от совершенствования организации технического обслуживания и ремонтов, улучшения триботехнических характеристик сопряжений влияющих на надёжность, использования современных методов восстановления работоспособности трибоэлементов. Достижимый в этом случае эффект является комплексным и рассматривается как результат воздействия многих организационных и технических мероприятий.

Для проверки результатов применения системы эксплуатации трибоэлементов торфяных машин по итогам сезона добычи нужно проводить анализ эффективности мероприятий, который позволит проверить адекватность имитационной модели, используемой для выбора организационно-технических решений и при необходимости внести изменения в её параметры или даже структуру.

Анализ эффективности использования торфяных машин с использованием системы эффективной эксплуатации трибоэлементов в течение сезона за счет лучшего использования метеоблагоприятных дней может проводиться при сопоставлении фактически отработанного времени с метеоблагоприят-

ным временем. Анализ должен проводиться в следующей последовательности:

1. Определяется фактически отработанное время торфяной машины за отчетный период. Фактически отработанное время определяется по счётчику моточасов.
2. Определяется объём выполненных работ на машину.
3. Устанавливается коэффициент норм выработки машиной.
4. Определяется фактическое время на выполнение программы работ машины и неиспользованный резерв.
5. По статистическим данным определяются целодневные потери времени — простои по организационным причинам и простои по метеонеблагоприятным причинам, в днях.
6. Рассчитывается объём торфа в денежном выражении, который может быть добыт при условии использования резервного времени.

На основе анализа статистических данных полученных при эксплуатации торфяных машин за последующие сезоны добычи могут вноситься по необходимости изменения в структуру модели (добавляться или удаляться трибоэлементы), меняться вероятности возникновения отказов.

На рис. 6.4 показан график изменения эффективности использования уборочной машины МТФ-43А при смещении обслуживания и ремонтов на метеонеблагоприятные дни с использованием разработанной системы эффективной эксплуатации трибоэлементов.

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 (рис. 6.4, 6.5).

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.

вано, а последствия отказа необходимо анализировать с помощью предлагаемой модели надёжности машины [73, 76].

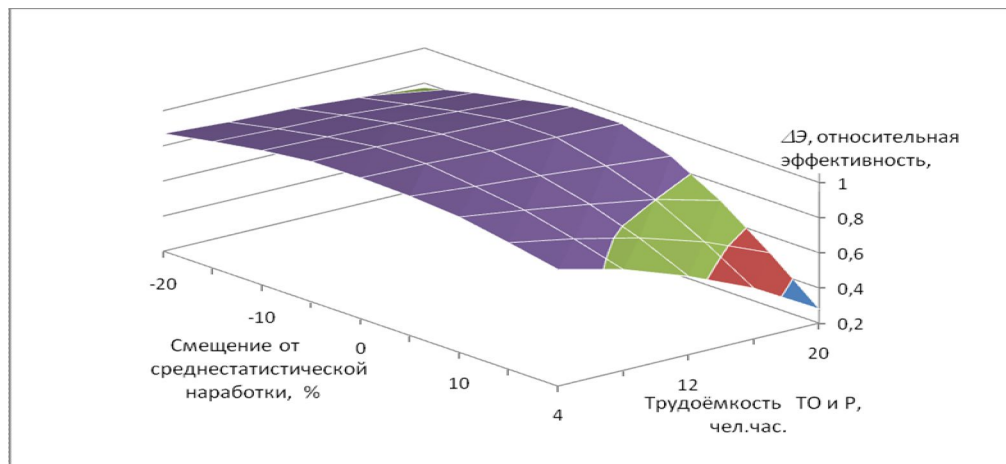


Рис. 6.4. Изменение относительной эффективности использования уборочной машины МТФ-43А при реализации методологии эффективной эксплуатации трибоэлементов

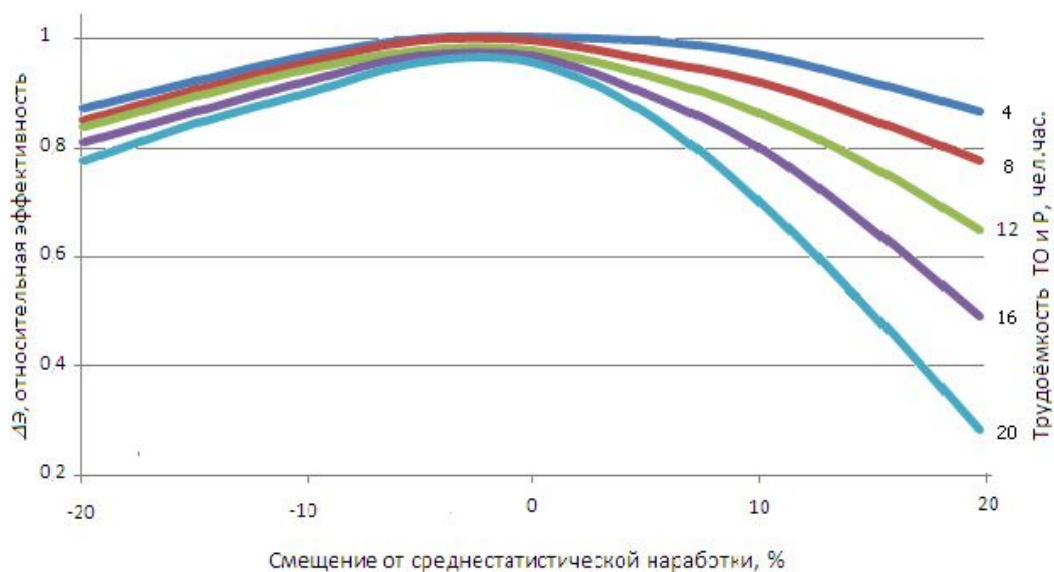


Рис. 6.5. Изменение относительной эффективности уборочной машины МТФ-43А при реализации методологии эффективной эксплуатации трибоэлементов

ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ

1. Техничко-экономическая оценка процесса восстановления корпуса торфяной фрезы показала высокую эффективность ремонта. Ориентировочная

прибыль предприятия при годовой программе ремонта 100 корпусов фрез может составить 1359500 руб.

2. Компьютерное исследование показало, что смещение ТО и ремонтов в сторону уменьшения ресурса несколько снижает эффективность эксплуатации машины, так как трибоэлементы не полностью вырабатывают ресурс и затраты на эксплуатацию возрастают пропорционально их неотработанной стоимости.

3. 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.

4. Для трибоэлементов с трудоёмкостью восстановления работоспособности 16 – 20 чел.ч. последствия отказа значительны. Следовательно, превышение среднестатистической наработки таких трибоэлементов должно быть обосновано, а последствия отказа необходимо анализировать с помощью предлагаемой модели надёжности машины.

5. 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.

ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

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 ресур-

са 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 увеличением 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 статье [20] представлены результаты исследования магнитопорошкового метода герметизации абразивных сред, лично автором предложена конструкция уплотнения и разработано устройство для испытаний. В публикациях [34 и 64] представлены результаты исследования магнитожидкостных подшипников для горнодобывающего оборудования, лично диссертантом предложена конструкция подшипника и разработана установка для проведения испытаний, проведён анализ результатов исследования. В работе [35] изложены результаты исследования коррозионных процессов на смазанных маслом поверхностях трения, автором диссертации разработана экспериментальная установка и методика исследований. В статье [59] изложены результаты исследования геометрических параметров восстановленных поверхностей трения, лично автором диссертации проведён анализ полученных результатов испытаний. В работе [66] рассматривается информационная составляющая системы восстановления работоспособности торфяных машин, диссертантом предложен новый подход к управлению работоспособностью ТМ с использованием информационных технологий. В публикации [67] изложены результаты исследования безотказности ТМ с использованием структурных моделей машин, лично автором диссертации разработана структурная модель ТМ, проведены компьютерные исследования и осуществлён анализ полученных результатов.

В статье [68] представлены результаты комплексного исследования моторных масел ТМ, диссертантом сформулированы задачи исследования и проведён анализ полученных результатов. В работах [69 и 70] изложены результаты исследования эксплуатации ТМ на основе информационных моделей, автором диссертации сформулированы задачи исследования и проведён анализ полученных результатов моделирования. В статье [71] представлены результаты исследования материалов для узлов трения ТМ, автором диссертации предложена методика подбора антифрикционных материалов и проведён анализ результатов триботехнических испытаний. В работе [66] представлен новый способ восстановления изношенных подшипников скольжения, лично диссертантом выполнены исследования изменения механических свойств восстановленной поверхности на различных материалах и проведён анализ полученных результатов. В публикации [70] изложены результаты имитационного исследования эксплуатации ТМ, автором диссертации разработаны принципы построения имитационных моделей торфяных машин, проведены компьютерные исследования и выявлены основные параметры, влияющие на эффективность использования ТМ. В работах [30 и 63] проведены исследования различных методов восстановления работоспособности торфяных машин, диссертантом проведён анализ существующих методов ремонта и предложен новый способ восстановления изношенных деталей пластическим деформированием. В работах [26 – 29, 31, 32, 56 – 58] представлены исследования изменения механических свойств изношенных поверхностей восстановленных пластическим деформированием по прилегающим поверхностям. Автором диссертации проведён анализ контактных давлений с использованием энергетического метода в процессе пластического деформирования, выполнены экспериментальные исследования деформирования и изменения механических свойств, восстановленных поверхностей, осуществлён анализ результатов исследования. В работе [33] представлены результаты исследования процессов регенерации в фрикционных системах. Автором диссертации разработано устройство, проведены исследования различных фрикционных материалов и проведён анализ

результатов испытаний. В публикации [34] представлены результаты исследования композиционных триботехнических материалов, которые могут использоваться для различных узлов трения горных машин. Диссертантом проведен анализ результатов исследования материалов с улучшенными триботехническими свойствами. В публикациях [60-62, 65, 73] представлены результаты анализа эксплуатации ТМ с помощью разработанной автоматизированной системы, диссертант сформулировал задачи исследования, осуществил компьютерный эксперимент и провёл анализ его результатов. В работе [74 и 75] представлены результаты исследования триботехнических материалов для узлов трения торфяных машин, автором диссертации сформулированы задачи и проведён анализ результатов исследования. В публикации [187] изложены результаты исследования технологии нанесения на поверхности трения антифрикционных композиционных материалов, диссертант провёл анализ результатов исследования. В работе [151] представлен новый способ восстановления изношенных поверхностей, автор диссертации разработал способ и устройство для восстановления. В работе [152] представлен новый фрикционный материал, диссертант предложил новый материал, обеспечивающий за счёт эффекта переноса защиту фрикционных поверхностей. В работе [174] представлена программа анализа технического состояния ТМ, автор диссертации сформулировал основные задачи, решаемые программой, и разработал алгоритм её реализации.

Патенты и авторские свидетельства:

1. 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.

2. 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.

3. 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.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Абрамов О.В. Прогнозирование состояния технических систем / Абрамов, О.В., Розенбаум, А.Н. ; Ин-т автоматики и процессов управления; отв. ред. В.П. Чипулис - М.: Наука, 1990. - 125 с.
2. Авдеев М.В. Технология ремонта машин и оборудования [Текст] / М.В. Авдеев, Е.Л. Воловик, И.С. Ульман. М.: Агропромиздат, 1986. 247 с.
3. Аксенов А.Ф. Трение и изнашивание в углеводородных жидкостях [Текст] / А.Ф. Аксенов. М.: Машиностроение, 1977. 147 с.
4. Алюшин Ю.А. Применение энергетического метода для расчета и анализа процессов пластического формоизменения металлов [Текст] / Ю.А. Алюшин, С.А. Еленев // Исследование процессов пластического деформирования металлов / М.: Наука, 1965. С. 106–133.
5. Андрейчиков А.В. Компьютерная поддержка изобретательства [Текст] / А.В. Андрейчиков, О.Н. Андрейчикова // М.: Машиностроение, 1998.-476 с.
6. Антонов В.Я. Технология и комплексная механизация торфяного производства: учебное пособие [Текст] / В.Я. Антонов, В.Д. Копенкин. М.: Недра, 1983. 287 с.
7. Атопов В.И. Моделирование контактных напряжений [Текст] / В.И. Атопов, Ю.П. Сердобинцев, О.К.Славин. Москва: Машиностроение, 1988.
8. Ахматов А.С. Молекулярная физика граничного трения [Текст] / А.С. Ахматов. М.: Физматгиз, 1963. 742 с.
9. Афанасьев А.Е. Сушка фрезерного торфа в формируемом двухслойном расстиле [Текст] / А.Е. Афанасьев, А.К. Бовтуто // Физические основы торфяного производства: межвуз. Тем. Сб. Калинин: КГУ, 1986. С. 42-47.
10. Баженов С.П. Основы эксплуатации и ремонта автомобилей и тракторов [Текст]: учебник для вузов по спец. "Автомоб.- и тракторостроение" направления "Трансп. машины и трансп.-технол. комплексы" / Баженов, С.П., Казьмин Б.Н., Носов С.В.; под ред. С.П. Баженова - М.: Академия, 2011.-329 с.

11. Барзилович Е.Ю. Вопросы математической теории надежности / [Е.Ю. Барзилович и др.]. - М. : Наука, 1983, - 179 с.
12. Барлоу Р., Математическая теория надежности / Р. Барлоу, Ф. Прошан. – М. : Советское радио, 1969. - 488 с.
13. Барт В.Е. Триботехнические свойства антифрикционных самосмазывающихся пластмасс [Текст] / В.Е. Барт [и др.] М.: ВНИУ ГСССД, 1982. 62 с.
14. Беляев Ю.К. Вероятностные методы выборочного контроля / Ю. К. Беляев. – Москва : Наука, 1975 . – 408 с. : ил.
15. Беляков В.А. Организация технологического процесса добычи фрезерного торфа: учебное пособие / В.А. Беляков, В.И. Смирнов. Тверь: ТГТУ, 2006. 100 с.
16. Березин И.С. Методы вычислений [Текст] / И.С. Березин, Н.П. Жидков. Том 1, 2.// М: Наука, 1966. 670 с.
17. Берж К. Теория графов и ее применение [Текст] // М.: ИЛ. 1962.- 320 с.
18. Близнац М.М. Особенности изнашивания эпоксидных полимеров [Текст] / М.М. Близнац, П.Н. Богданович, П.Д. Стухляк. Трение и износ. 1988. Т. 9. № 3. С. 549–53.
19. Борисов М.В. Ускоренные испытания машин на износостойкость как основа повышения качества [Текст] / М.В. Борисов, И.Ф.Павлов, В.И. Постников. М.: Издательство стандартов, 1976. 351 с.
20. Болотов А.Н. Магнитопорошковый метод герметизации абразивных сред [Текст] / А.Н. Болотов, С.Н. Григорьев, И.В. Горлов // Трение и износ. Всесоюзный научно-теоретический журнал. Том 10, №6. Минск. «Наука и техника», 1989. С. 1075-1078.
21. Болотов А.Н. Восстановление локально изношенных подшипников методом пластического деформирования по прилегающей поверхности [Текст] / А.Н. Болотов, Н.Б. Демкин, И.В. Горлов // Трение, износ, смазка.

Приложение к журналу «Сборка в машиностроении, приборостроении». 2005. № 2. С. 26–30.

22. Болотов А.Н. Восстановление изношенных поверхностей методом пластического деформирования [Текст] / А.Н. Болотов, И.В. Горлов // Механика и физика фрикционного контакта. Межвузовский сборник научных трудов. Выпуск 9. Тверь: ТГТУ, 2002. С. 39–43.

23. Болотов А.Н. Сравнительные триботехнические испытания материалов [Текст] / А.Н. Болотов, И.В. Горлов // Механика и физика фрикционного контакта. Межвузовский сборник научных трудов. Выпуск 10. Тверь. ТГТУ, 2003. С. 40–44.

24. Болотов А.Н. Формирование полимерной пленки на восстановленной поверхности трения [Текст] / А.Н. Болотов, И.В. Горлов // Механика и физика фрикционного контакта и граничных слоев. Межвузовский сборник научных трудов. Тверь: ТГТУ, 2004. С. 58–62.

25. Болотов А.Н. Восстановление локально изношенных подшипников методом пластического деформирования по прилегающей поверхности [Текст] / А.Н. Болотов, Н.Б. Демкин, И.В. Горлов // Трение, износ, смазка. Приложение к журналу «Сборка в машиностроении, приборостроении». 2005. № 2. С. 26–30.

26. 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. ТГТУ, 2006. С. 224–229.

27. 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. ТГТУ, 2007. С. 46–51.

28. 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. ТГТУ, 2008. С. 39-42.

29. 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) Сервис транспортных и технологических машин и оборудования (по отраслям). Тверь. ТГТУ, 2008. С. 31-37.

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

31. 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. ТГТУ, 2009. С.25-29.

32. 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. ТГТУ, 2010. С. 153-158.

33. 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. ТГТУ, 2011. С. 47-50.

34. 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.

35. 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.

36. Браун Э.Д. Моделирование трения и изнашивания в машинах [Текст] / Э.Д. Браун, Ю.А. Евдокимов, А.В. Чичинадзе. М.: Машиностроение, 1982. 190 с.

37. Бродский Г.С., Информационные накопители как средство контроля и диагностики состояния техники [Текст] / Г.С. Бродский, Л.Н. Фаерштейн, А.В. Шумаков, В.М. Штейнцвайг. ИГД им. А. А. Скочинского, 2004.

38. Бусленко В.Н. Автоматизация имитационного моделирования сложных систем [Текст] // М.: Наука, 1977.-240 с.

39. Буше Н.А. Трение, износ и усталость в машинах. Транспортная техника [Текст] / Н.А. Буше. М.: Транспорт, 1987. 223 с.

40. Вагин В.Н. Дедукция и обобщение в системах принятия решений [Текст] // М.: Наука, 1988.-384 с.

41. Варенцов В.С. Технология производства фрезерного торфа [Текст] / В.С. Варенцов, А.В. Лазарев. М.: Недра, 1970. 288 с.

42. Васильев А.Н. Влияние изменчивости погодных условий на длительность цикла [Текст] / А.Н. Васильев, В.И. Смирнов // Сб. науч. тр. Твер. гос. техн. ун-та. Тверь: ТГТУ, 1999. С. 63 - 65.

43. Васильев А.Н. Организация технологического процесса со ступенчатым регулированием глубины фрезерования / А.Н. Васильев, В.И. Смирнов // Горный информационно-аналитический бюллетень. М: МГГУ, 2004 № 1. с. 239 - 242.

44. Васильев, А.Н. Перспективные технологии производства фрезерного торфа : учебное пособие / А.Н. Васильев Тверь: ТГТУ, 2007. 184 с.

45. Воловик Е.Л. Справочник по восстановлению деталей [Текст] / Е.Л. Воловик. М.: Колос, 1981. 351 с.
46. Восстановление деталей футерованием композиционными полимерными материалами на основе эпоксидных смол [Текст]. Минск: БелНИИ-ИНТИ, 1988. 50 с.
47. Гамаюнов С.В. Адаптивная технология добычи торфа на основе многофункционального погрузчика / Гамаюнов С.В., Беляков В.А., Гамаюнова А.Н. // Интеграция науки и образования - производству, экономике: сб. тр. межрегиональной науч.-техн. конф., посвященной 90-летию основания ТвГТУ (11 декабря 2012 г.). - Т.1 - С.139 - 147. - Тверь: 2012.
48. Гетманова АД. Логика // М.: "Добросвет", Книжный дом "Университет", 1998.-480 с.
49. Гетопанов В.Н. Горные и транспортные машины и комплексы / В.Н. Гетопанов, Н.С. Гудилин, Л.И. Чугреев. – М. : Недра, 1991. - 303 с.
50. Гетопанов В.Н. Проектирование и надежность средств комплексной механизации / В.Н. Гетопанов, В.М. Рачек. - М. : Недра, 1986. – 208 с.
51. Герцбах И.Б. Модели профилактик (теоретические основы планирования профилактических работ)/ И.Б. Герцбах. - М. : Советское радио, 1969. – 216 с.
52. Гнеденко Б.В. Математические методы в теории надежности / Б.В. Гнеденко, Ю.К. Беляев, А.Д. Соловьев. – М.: Наука, 1965. – 524 с.
53. Горлов И.В. Применение восстановленных деталей и новые технологии восстановления / И.В. Горлов // Актуальные проблемы развития машиностроительного комплекса Тверской области: материалы научно-практической конференции. Тверь: ТГТУ, 2001. С. 79–81.
54. Горлов И.В. Применение энергетического метода для расчета и анализа процессов пластического деформирования при восстановлении локально изношенных поверхностей подшипников скольжения // Перспективы развития Волжского региона [Текст] / И.В. Горлов. Материалы Всероссий-

ской заочной конференции. Четвертый выпуск. Тверь: ТГТУ, 2003. С. 104–105.

55. Горлов И.В. Моделирование процесса восстановления локально изношенных подшипников скольжения пластическим деформированием [Текст] / И.В. Горлов // Перспективы развития Волжского региона. Материалы всероссийской научной заочной конференции. Седьмой выпуск. Тверь: ТГТУ, 2005. С.50-52.

56. 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.

57. 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. 199

58. Горлов И.В. Восстановления 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 г, С.46. 163

59. 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.

60. 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. ТГТУ, 2012. С. 76-79.

61. 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 г. С. 43-44.
62. Горлов И.В. Инновационная система управления работоспособностью машин для добычи и переработки торфа [Текст] // Международная научно-практическая конференция «Перспективы развития науки и образования», часть 5. Тамбов 2012 г. С. 35-36.
63. 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.
64. Горлов И.В. Магнитожидкостные подшипники горнодобывающего оборудования [Текст] / И.В. Горлов, А.Н. Болотов, Б.Ф. Зюзин // Наука и техника. Минск, 2012. №6. С. 17 – 23.
65. 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. ТГТУ, 2013. С. 89-95.
66. 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.
67. Горлов И.В. Управление безотказностью технологической машины на основе анализа структурной [Текст] / И.В. Горлов, Е.В. Полетаева // Горный информационно-аналитический бюллетень. М.: МГГУ, 2013. № 9. – с. 223-226.
68. Горлов И.В. Комплексные исследования изменения состояния моторных масел торфяных машин в процессе эксплуатации [Текст] / И.В. Гор-

лов, А.Н. Болотов, Е.А. Щербаков // Трение и смазка в машинах и механизмах. 2013. №9. С. 12-15.

69. 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.

70. 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.

71. 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.

72. 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.

73. 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. ТГТУ, 2014. с. 255-261.

74. Горлов И.В. Испытания материалов для тяжелонагруженных 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. ТГТУ, 2014. с. 81-85.

75. Горлов И.В. Устройство для испытания материалов для тяжелонагруженных 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. ТГТУ, 2014. с. 73-81.

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

77. Давыдов В.Г. Программирование и основы алгоритмизации [Текст]: учеб. пособие для вузов по спец. "Упр. и информатика в техн. системах" - М.: Высшая школа, 2005. - 448 с.

78. Дальский А.М. Технологические основы формирования регулярного рельефа при обработке триботехнических композиционных материалов [Текст] / А.М. Дальский, В.В. Ходус // Технологическое обеспечение качества машиностроительных изделий. Тезисы докладов научно-технической конференции. М., 1990. С. 26–27.

79. Дейт К.Дж. Введение в системы баз данных // К.; М., СПб.: Изд. Дом "Вильямс", 1999. - 848 с.

80. Домбровский Н. Г. Строительные машины [Текст] / Н.Г. Домбровский, Ю.Л. Картвелишвили, М.И. Гальперин. // Учебник для вузов. В 2 частях. Ч. 1-я. М., «Машиностроение», 1976. 391 с. с ил.

81. Джонсон К. Механика контактного взаимодействия [Текст] / К. Джонсон: перевод с английского. М.: Мир, 1989. 500 с.

82. Дмитриев В.И. STEP- и CALS- технологии [Текст] / В.И. Дмитриев, И.П. Норенков // Информационные технологии, №5, 1998. с.38-43.

83. Дружинин Г.В. Надежность автоматизированных производственных систем / Г.В. Дружинин. - М. : Энергоиздат, 1986. - 480 с.

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

85. Зорин В.А. Надежность машин: учеб. [Текст] / В.А. Зорин, В.С. Бочаров // Орел: Изд-во ОрлГТУ, 2003. 549 с.

86. Зорин, В.А. Основы работоспособности технических систем: учеб.

для вузов [Текст] / В.А. Зорин // М.: ООО «Магистр-Пресс», 2005. 536 с.

87. Зубчанинов В.Г. Математическая теория пластичности [Текст] / В.Г. Зубчанинов. Тверь: ТГТУ, 2002. 300 с.

88. Зыков А.А. Основы теории графов [Текст]//М.: Наука, 1987.-384с.

89. Ивлев Ю.В. Логика [Текст] // М.: Изд. Корпорация "Логос", 1997.- 272с.

90. Избирательный перенос при трении и его экономическая эффективность [Текст] / под ред. Д.Н. Гаркунова и А.А. Полякова. М.: ВИНТИ, 1972. 252 с.

91. Иванов В.Ф. Техническая эксплуатация и ремонт торфяных машин [Текст]: учеб. пособие. / В.Ф. Иванов, А.Н. Лукьянчиков, Н.Ф. Филатови др. – М.: Недра, 1988. 318 с.

92. Ивахненко А.Г. Моделирование сложных систем по экспериментальным данным / Ивахненко, А.Г., Юрачковский, Ю.П. - М.: Радио и связь, 1986. - 119 с.

93. Ивлев Д.В. Механика пластических сред [Текст] / Д.Д. Ивлев; Н.Б. Бартошевич-Жегаль. Т. 1: Теория идеальной пластичности; под. ред. Н.Б. Бартошевич-Жегель. М.: Физмат, 2001. 445 с.: ил.

94. Избирательный перенос при трении [Текст] / под ред. Д.Н. Гаркунова и Ю.С. Симакова. М.: Наука, 1975. 88 с.

95. Калачин С.В. Прогнозирование эксплуатационных параметров МТА с учетом его технического состояния // Тракторы и сельскохозяйственные машины. - N 7.- С.30 - 31. - 2008.

96. Канарчук Ф.Д. Восстановление автомобильных деталей. Технология и оборудование [Текст] / Ф.Д. Канарчук, А.Д. Чигринец, О.Л. Голяк, П.М. Шощкий. М.: Транспорт, 1995. 303 с.

97. Кантович Л.И. Машины и оборудование для горностроительных работ: Учебное пособие. Под ред. Проф. Л.И. Кантовича и проф. Г.Ш. Хазановича. [Текст] / Л.И. Кантович, Г.Ш. Хазанович, В.В. Волков, Э.Ю. Воронова, А.В. Отроков, В.Г. Черных. – М.: Издательство «Горная книга». 2013. –

445 с.: ил.

98. Карагодин Н.Н. Ремонт автомобилей и двигателей: учеб. для сред. проф. образования [Текст] / В.И. Карагодин; Н.Н. Митрохин. 2-е изд., стереотип. М.: Академия, 2002. 496 с.: ил.

99. Карасик И.И. Прирабатываемость материалов для подшипников скольжения [Текст] / И.И. Карасик. М.: Наука, 1978. 136 с.

100. Карпов Ю. Имитационное моделирование систем. Введение в моделирование с AnyLogic 5 [Текст] // СПб.: БХВ-Петербург, 2006. - 390 с.

101. Каштанов А.В. Теория надежности сложных систем: учебное пособие для вузов / В. А. Каштанов, А. И. Медведев . – 2-е изд., перераб. – М.: Физматлит, 2010. – 608 с.

102. Квагинидзе В.С. Ремонтная технологичность металлоконструкций карьерных механических лопат на угольных разрезах севера [Текст] / В.С. Квагинидзе. 2-е издание стереотипное. - М.: "Мир горной книги", Издательство Московского государственного горного университета, издательство «Горная книга», 2007. - 224 с.

103. Ковальски Р. Логика в решении проблем [Текст] // М.: Наука, 1990.-280 с.

104. Коган Б.И., Мяленко В.И., Черныш А.П. Конструкторско-технологическое обеспечение надёжности сельскохозяйственных машин [Текст] / Б.И. Коган, В.И. Мяленко, А.П. Черныш. Кемерово: КузГТУ, 2004.

105. Кокс Д.Р. Теория восстановления / Д.Р. Кокс, В.Л. Смит. - М. : Советское радио, 1967. - 299 с.

106. Комбалов В.С. К вопросу нормирования протяженности фактического контакта и шага микроканавок поверхностей с частично регулярным микрорельефом (ЧРМР) [Текст] / В.С. Комбалов [и др.] // Трение и износ. 1992. Т 13. № 1. С. 110–115.

107. Коншин В.М. Методы и средства диагностирования в системе сервиса строительных и дорожных машин: учеб. пособие / В.М. Коншин. М.: Изд-во МАДИ (ГТУ), 2004. 118 с.

108. Коробейников С.Н. Нелинейное деформирование твердых тел [Текст] / С.Н. Коробейников. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2000. 261 с.
109. Крока Р. Композиционные материалы [Текст]; перевод с английского / под ред. Л. Браутмана, Р. Крока. Т. 3. М.: Машиностроение, 1978.
110. Коробейник А.В. Ремонт автомобилей. Теорет. курс: учеб. пособие [Текст] / А.В. Коробейник // Ростов н/Д.: Феникс, 2003. 283 с.: ил.
111. Корн Г. Справочник по математике для научных работников и инженеров [Текст] / Г. Корн, Т. Корн. М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1984. 831 с.
112. Крагельский И.В. Трение и износ [Текст] / И.В. Крагельский. Изд. 2-е. М.: Машиностроение, 1968. 480 с.
113. Крюков С.В. Структурное моделирование механических систем [Текст] / Урал. гос. экон. ун-т - Екатеринбург: Уральский гос. экон. ун-т, 2009. - 254 с.
114. Кугель Р.В. Испытания и надежность машин и их элементов. / Р.В. Кугель. - М. : Машиностроения, 1982. - 181 с.
115. Кузьменко А.Г. Расчетно-экспериментальный метод решения контактных задач [Текст] / А.Г. Кузьменко [и др]. Трение и износ. 1992. Т 13. № 2. С. 257–264.
116. Лавринович М.Ф. Повышение износостойкости деталей автомобилей [Текст] / М.Ф. Лавринович, М.Ф. Шустерняк // Минск: Беларусь, 1985. 142 с.
117. Лагереv, АВ. Диагностика и дефектация подъемно-транспортного оборудования и крановых путей : учеб. пособие / А.В. Лагереv // Брянск: Изд-во Брянского ГТУ, 2005.156 с.
118. Lockett F.J. Indentation of a rigid-plastic material by a conical indenter [Текст] / F.J. Locket . Mech. and Phys. of Solids, 1963. 345 p.
119. Лорьер Ж.Л. Системы искусственного интеллекта [Текст] // М.: Мир, 1991.-568 с.

120. Максименко А.Н. Диагностика строительных, дорожных и подъёмно-транспортных машин [Текст]: учеб. пособие / Максименко А.Н., Антипенко Г.Л., Лягушев Г.С.; «БХВ-Петербург», Санкт-Петербург, 2008.- 302 с.

121. Малков, Л.М. Технологическая схема и комплекс оборудования для добычи фрезерного торфа с отдельной уборкой из наращиваемых (укрупненных) валков [Текст] / Л.М. Малков, Н.В. Кузнецов, В.П. Шейде. Л.: ВНИИТП, 1987. 81 с.

122. Малков, Л.М. Технологические регламенты на технологический процесс добычи фрезерного торфа с отдельной уборкой его из наращиваемых валков [Текст] / Л.М. Малков, Л.С. Исаева, В.П. Шейде. Л.: ВНИИТП, 1988. 38 с.

123. Малков Л.М. Технология добычи торфа [Текст] // Основные результаты научно-исследовательских работ ВНИИТП в области добычи и переработки торфа: Сб. науч. тр. / ВНИИТП. - Вып.69.-С.7-45. - СПб.,1992.

124. Марка Д., Мак Гоуэн К. Методология структурного анализа и проектирования: Пер. с англ. [Текст] / Д. Марка, К Мак Гоуэн // М.: 1993.-240 с.

125. Маслов Н.Н. Эффективность и качество ремонта автомобилей [Текст] / Н.Н. Маслов. М.: Транспорт, 1981. 304 с.

126. Машины и стенды для испытаний деталей [Текст] / под. ред. Д.Н. Решетова. М.: Машиностроение, 1979. 343 с.

127. Махно Д.Е., Надёжность карьерных экскаваторов и станков шарошечного бурения в условиях Севера. [Текст] / Д.Е. Махно, А.И. Шадрин. – М.: Недра, 1976. – 176 с.

128. Mellor P.B. Plasticity for Mechanical Engineers [Текст] / P.B. Mellor, W. Johnson. London, 1962.

129. Методика расчёта количества циклов добычи фрезерного торфа и эффективной испаряемости. Л.: Изд-во ВНИИ торфяной промышленности, 1981. 44 с.

130. Методы профилактики и ремонта промышленного оборудования [Текст]: учеб. для сред. проф. образования / Ю.Н. Воронкин; Н.В. Поздняков. М.: Академия, 2002. 240 с.: ил.

131. Михайлов А.В. Состояние технического перевооружения машинно-тракторного парка торфодобывающих компаний [Текст] / А.В. Михайлов, С.Л. Иванов, Ю.Ю. Бондарев // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2014. № 3 (202). С. 229-235.

132. Михлин В.М. и др. Методические указания по прогнозированию технического состояния машин. – М., ОНТИ ГОСНИИТИ, 1972, 61 с.

133. Муляр Ю.Н. Антифрикционные смазывающие материалы в машиностроении [Текст]. Машиностроительное производство. Серия «Прогрессивные технологические процессы в машиностроении». Выпуск 3. / Ю.Н. Муляр М.: ВНИИТЭМР, 1991. 64 с.

134. Непейвода Н.Н. Прикладная логика [Текст] // Новосибирск Издательство Новосибирского Университета, 2000.-521с.

135. Норенков И.П. Информационная поддержка наукоемких изделий (CALS - технологий) [Текст] / И.П. Норенков, П.К. Кузьмик // М.: Изд. МГТУ им Баумана 2002.-247с.

136. Нормативные технологические показатели добычи фрезерного торфа с раздельной уборкой из наращиваемых валков. Дополнение к ВНТП 19-86. Проект 18-104-87. Л.: ВНИИТП, 1988.22 с.

137. Нормативно-информационные материалы торфяной отрасли. СПб.: ОАО Холдинговая компания «Нева-торф», 2001. Сб. 2. С. 1-7.

138. О моделировании трения и износа [Текст] / под. ред. А.В. Чичинадзе. М.: НИИМАШ, 1970, 318 с.

139. Операции соединения и механической обработки композиционных материалов [Текст] / S.I. Dastie. Handbook of Composites-SI. 1982. P. 602–632./ ВЦП. №1. 58270. Пер. 86/17806.

140. Островский М.С. Контроль за состоянием горных машин с использованием методов вибродиагностики / М.С. Островский, П.Ф. Бойко // Горный

информационно-аналитический бюллетень. – 2007. - № 10. - С. 112 - 115.

141. Островский М.С. Технология вибромониторинга технического состояния горных машин на этапе эксплуатации / М.С. Островский, Я.М. Радкевич, П.Ф. Бойко // Горное оборудование и электромеханика. – 2008. - № 10. - С. 2 - 8.

142. Павлов В.В. Структурное моделирование производственных систем [Текст] / В.В. Павлов // М.: Мосстанкин, 1987.- 80 с.

143. Павлов В.В. Полихроматические множества в теории систем. Структура PS-множеств [Текст] / В.В. Павлов // Информационные технологии, №7, 1997.-С.11-16.

144. Павлов ВВ. Полихроматические множества в теории систем. Изменение состава PS-множеств [Текст] / В.В. Павлов // Информационные технологии, №1, 1998.-С.4-8.

145. Павлов В.В. Полихроматические множества в теории систем. Операции над PS-множествами [Текст] / В.В. Павлов // Информационные технологии, №3, 1998.-С.8-13.

146. Павлов В.В. Полихроматические графы в теории систем [Текст] / В.В. Павлов // Информационные технологии, №6, 1998.- с.2-9.

147. Павлов В.В. Полихроматические множества в теории систем Проблемы CALS - технологий: Сб. научных трудов под ред. В.Г. Митрофанова [Текст] / В.В. Павлов // М.: "ЯНУС-К" , 1998.-с. 35-46.

148. Павлов В.В. CALS – технологии в машиностроении (математические модели) [Текст] / В.В. Павлов М.: Издательский центр МГТУ «СТАНКИН», 2002. 328 с.

149. Павловская Т.А. С #. Программирование на языке высокого уровня [Текст]: учеб. для вузов для вузов по напр. подготовки дипломир. специалистов "Информатика и вычислительная техника" - СПб. [и др.]: Питер, 2009. - 432 с.

150. Пат. РФ, МКП 23 Р 6/00, 6/02. Способ восстановления локально изношенной поверхности детали / А.Н. Болотов, И.В. Горлов – RU №228247 С1; Заявл. 20.12.2002; Оpubл. 10.05.2004; Бюл. № 13. – 8с.

151. 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.

152. 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.

153. Петухов А.Н. О механизме фреттинга и фреттинг-усталости в малоподвижных соединениях деталей машин [Текст] / Конверсия в машиностроении-Conversion in machine building of Russia. 2002, №4, с.42-47.

154. Пичунин Е.А. Надежность технических систем [Текст] / Е. А. Пучин, Е. А. Лисунов, А. В. Чепурин и др. - М.: Колос, 2010. - 318 с.: ил.

155. Полимеры в узлах трения машин и приборов [Текст] / Под ред. А.В. Чичинадзе. М.: Машиностроение, 1980. 208 с.

156. Подэрни Р.Ю. Механическое оборудование карьеров: Учебник для вузов. – 6-е изд., перераб. и доп. – М.: Издательство Московского государственного горного университета, 2007. – 680 с.: ил.

157. Прангишвили И.В. Поиск подходов к решению проблем [Текст] / И.В. Прангишвили, Н.А. Абрамова, В.Ф. Спиридонов и др. // М.: СИНТЕГ, 1999.-284 с.

158. Прокопенко Н.И. Экспериментальные исследования двигателей внутреннего сгорания [Текст] / Н.И. Прокопенко // Омск : Изд-во ОТИИ, 2006. 469 с.

159. Проников А.С. Параметрическая надежность машин [Текст] / А.С. Проников // М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. - 560 с.

160. Полевой С.Н. Упрочнение машиностроительных материалов. Справочник [Текст] / С.Н. Полевой. В.Д. Евдокимов. М.: Машиностроение. 1994. 471 с.
161. Польцер Г. Основы трения и изнашивания [Текст] / Г. Польцер, Ф. Майснер; перевод с немецкого. М.: Машиностроение, 1984. 263 с.
162. Применение композиционных материалов в машиностроении [Текст]: тезисы докладов научно-технической конференции. Минск, БелНИИ-ИНТИ, 1988. 196 с.
163. Прохоров В.С. Трибологические методы испытания масел и присадок [Текст] / В.С. Прохоров. М.: Машиностроение, 1983. 183 с.
164. Рекомендации по определению количества и сроков проведения операций полевой сушки при производстве торфа фрезерным способом. Л.: ВНИИТП, 1983. 84 с.
165. Рахутин М.Г. Перспективы применения полимерных композитных материалов в угольной промышленности // Материалы международного семинара "Проблемы и перспективы развития горной техники". - М., МГГУ 1995. - С. 71-72.
166. Рахутин М.Г. Модель оптимизации наработок до замен элементов гидропривода, влияющих на производительность // Обзорение прикладной и промышленной математики. – 2004. - Выпуск 2. – Т. 11. - С. 390-391.
167. Рахутин М.Г. Влияние скорости изменения параметров на величину предельного состояния элементов гидропривода технологических машин // Обзорение прикладной и промышленной математики. – 2004. - Выпуск 4. – Т. 11. - С. 909-910.
168. Рахутин М.Г. Концепция формирования моделей оптимизации предельных состояний элементов гидросистем забойного оборудования // Горное оборудование и электромеханика. – 2007. - № 1. - С. 16-18.
169. Рахутин М.Г. Оценка эффективности эксплуатации гидропривода горных машин // Горное оборудование и электромеханика. – 2009. - № 1. - С. 19-22.

170. Рыжов Э.В. Технологическое обеспечение эксплуатационных свойств деталей машин [Текст] / Э.В. Рыжов, А.Г. Суслов, В.П. Федоров. М.: Машиностроение, 1979. Семенов А.П. Металлофторопластовые подшипники [Текст] / А.П. Семенов, М.Э. Савицкий. М.: Машиностроение, 1976. 190 с.

171. Самсонов Л.Н. Торфяные машины и оборудование [Текст]: учеб. пособие. Ч. 1 / Самсонов, Л.Н., Сеницин, В.Ф.; Тверской гос. техн. ун-т - Тверь: ТГТУ, 2006. - 138 с.

172. Самсонов Л.Н. Торфяные машины и комплексы. Экскавация торфа из залежи [Текст] / Л.Н. Самсонов, В.Ф. Сеницын. - Тверь: ТГТУ. - 1999. - 188 с.

173. Светлов В.А. Практическая логика [Текст] // СПб.: ИД "МиМ", 1997.-576 с.

174. 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.

175. Селиванов А. И. Теоретические основы ремонта и надежности сельскохозяйственной техники [Текст] / А.И. Селиванов, Ю.Н. Артемьев. – М.: Колос, 1978. – 248 с.

176. Сиренко Г.А. Износостойкость композиционных материалов на основе термостойких полимеров в условиях предельных нагрузок и ограниченной смазки [Текст] / Г.А. Сиренко, В.П. Свицерский. Трение и износ. 1988, Т. 9. № 5. С. 841–861.

177. Смирнов В.И. Управление процессом разработки торфяных месторождений: учебное пособие для вузов [Текст] / В.И. Смирнов. М: Недра, 1985. 224 с.

178. Смирнов В.И. Практическое руководство по организации добычи фрезерного торфа: учебное пособие [Текст] / В.И. Смирнов, А.Н. Васильев, А.Е. Афанасьев, А.Н. Болтушкин; под ред. В.И. Смирнова. 1-е изд. Тверь: ТГТУ, 2007. 392 с.

179. Солод Г.И. Технология машиностроения и ремонт горных машин: учебник для вузов [Текст] / Г.И. Солод, В.И. Морозов, В.И. Русихин. – М.: Недра, 1988. – 421 с.
180. Солопов С.Г. Торфяные машины и комплексы [Текст] / С.Г. Солопов, Л.О. Горцакалян, Л.Н. Самсонов, В.И. Цветков. 2-е изд., перераб. и доп. Учебное пособие для вузов. М.: Недра, 1981. 416 с.
181. Справочник по композиционным материалам [Текст]. В 2-х томах / под. ред. Дж. Любина. М.: Машиностроение, 1988. Т. 1. 448 с.
182. Справочник по композиционным материалам [Текст]. В 2-х томах / под. ред. Дж. Любина. М.: Машиностроение, 1988. Т. 2. 582 с.
183. Справочник по триботехнике [Текст]. Смазочные материалы, техника смазки, опоры скольжения и качения. Т. 1, 2 / под. ред. М. Хебды, А.В. Чичинадзе. М.: Машиностроение, Варшава. ВКЛ. 1990. 820 с.
184. Shield R.T. On plastic flow of metals under conditions of axial symmetry [Текст] / R.T.Shield. Proc. Roy. Soc., 1955. 267 p.
185. Струк В.А. Композиционные материалы для узлов трения. Опыт разработки и применения [Текст] / В.А.Струк. Минск: БелНИИНТИ, 1986. 46 с.
186. Суслов А.Г. Технологическое обеспечение параметров состояния поверхностного слоя деталей [Текст] / А.Г. Суслов. М.: Машиностроение, 1987.
187. 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. ТГТУ, 2012. С. 120-122.
188. Сысоев Н.И. Математическое моделирование функционирования очистного комбайна с адаптивным гидромеханическим приводом [Текст] /

Н.И. Сысоев, А.С. Кожевников // Горный информационно-аналитический бюллетень. М.: МГГУ, 2003. №8. С. 220-221.

189. Теоретические основы процессов поверхностного пластического деформирования [Текст] / под. ред. В.И. Беляева. Минск. Наука и техника, 1988. 360 с.

190. Тимофеев А.Е. Технология комплексной добычи и переработки торфа и подстиляющего минерального сырья // ГИАБ. - №11. - С.382 - 385. - 2008.

191. Томленов А.Д. Теория пластического деформирования металлов [Текст] / А.Д. Томленов. М.: Металлургия, 1972. 408 с.

192. Томленов А.Д. Механика процессов обработки металлов давлением [Текст] / А.Д. Томленов. М.: Машгиз, 1963.

193. Трение изнашивание и смазка [Текст]. Справочник. Т. 1, 2 / под. ред. И.В. Крагельского, В.В. Алисина. М.: Машиностроение, 1978. 812 с.

194. Трахтенгерц Э.А. Компьютерная поддержка принятия решений [Текст] // М.:СИНТЕГ, 1998.-376 с.

195. Ульман Д.Д. Введение в системы баз данных [Текст] / Д.Д. Ульман, Д.Уидом // М-"Лори", 2000.-374 с.

196. Ушаков Л.С. Математическая модель гидropневматической силовой импульсной системы на основе метода объектно-ориентированного моделирования [Текст] / Л.С. Ушаков, А.В. Щекочихин // Мир транспорта и технологических машин. 2012. № 1 (36). С. 64-70.

197. Федорченко Н.М. Влияние механической обработки на работоспособность композиционных антифрикционных материалов [Текст]: Тез. докл. 3 Всесоюзного семинара по конструкционным спеченным материалам и изделиям / Н.М. Федорченко. Киев: ОНТИ ИПМ АН УССР, 1975.

198. Фляйшер Г. К вопросу о количественном определении трения и износа [Текст] / Г.К. Фляйшер // Теоретические и прикладные задачи трения, износа и смазки машин. М.: Наука, 1982. С. 285–296.

199. Хазанович Г.Ш. Математическое моделирование процессов формирования производительности и нагрузок погрузочного органа с нагребателями [Текст] / Г.Ш. Хазанович, А.В. Отроков // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2014. № 8. С. 300-308.
200. Харрингтон Д. Проектирование объектно-ориентированных баз данных [Текст] // М.: ДМК Пресс, 2001. - 272 с.
201. Ходус В.В. Изготовление и эксплуатационные свойства деталей из триботехнических композиционных материалов [Текст] / В.В. Ходус, А.С. Васильев // Машиностроительное производство. Серия «Прогрессивные технологические процессы в машиностроении». Выпуск 1. М.: ВНИИТЭМР, 1991. 47 с.
202. Хорев П.Б. Объектно-ориентированное программирование [Текст]: учеб. пособие для вузов по напр. "Информатика и вычислительная техника" - М.: Академия, 2011. - 447 с.
203. Хрущев М.М. Абразивное изнашивание [Текст] / М.М. Хрущев, М.А. Бабичев. М.: Наука, 1970. 252 с.
204. Шилько С.В. Расчетно-экспериментальный метод определения контактных давлений [Текст]: Динамика и прочность транспортных машин: сб. научных трудов / С.В. Шилько. Брянск: БИТМ, 1994. С. 116–121.
205. Шилько С.В. Расчетно-экспериментальные методы исследования контактных напряжений [Текст] / С.В. Шилько // Труды Белорусского конгресса по теор. и прикл. механике. Минск, 1995. С. 248–249.
206. Шнайер Б. Прикладная криптография: Протоколы, алгоритмы, исходные тексты на языке Си [Текст] // М.: Триумф, 2002. — 816 с.
207. Чичинадзе А.В. Полимеры в узлах трения машин и приборов: справочник / А.В. Чичинадзе [и др.] М.: Машиностроение, 1988. 328 с.
208. Экспериментальные и расчетно-экспериментальные методы определения контактных напряжений [Текст] / С.В. Шилько. Трение и износ. 1996. Т 17. №3. С. 402-407.

209. Экспериментальная механика [Текст]: в 2-х кн. Пер. с англ./ под. ред. А. Кобаяси. Москва. Мир 1990.
210. Яблонский С.В. Введение в дискретную информатику [Текст] // М.: Высш.шк.; 2001.-384 с.

[illegible]

Продолжение таблицы 1

ЛС 59. Динамометр на 1000кг.

[illegible]

СЧ-18. Динамометр на 1000кг.

[illegible]

СТ-3. Динамометр на 1000кг.

[illegible]

Таблица 2

Зависимость относительного внедрения $\delta=h/d$ от относительного усилия $\Delta = P/P_0$.

Свинец.

[illegible]

P/P ₀	0.1	0.21	0.31	0.42	0.52	0.63	0.73	0.83	0.94	1.04	1.15	1.25	1.35	1.46	1.56
h/d	0.01	0.04	0.07	0.1	0.14	0.17	0.19	0.22	0.24	0.27	0.29	0.31	0.33	0.36	0.41
P/P ₀	1.67	1.77	1.88	1.98	2.08	2.19	2.29	2.4	2.5	2.6	2.7				
h/d	0.44	0.54	0.61	0.69	0.79	0.91	1.03	1.17	1.34	1.49	1.69				

[illegible][illegible][illegible][illegible]

Продолжение таблицы 2
СЧ-18.

P/P_0	0.08	0.16	0.24	0.32	0.4	0.48	0.56	0.64	0.72	0.8	0.88	0.96	1.04	1.12	1.2
h/d	0.02	0.05	0.07	0.09	0.11	0.13	0.15	0.17	0.19	0.21	0.23	0.24	0.26	0.28	0.29
P/P_0	1.28	1.36	1.44	1.52	1.6	1.68	1.76	1.84	1.92	2	2.08	2.16	2.24	2.32	2.4
h/d	0.31	0.32	0.34	0.36	0.39	0.42	0.46	0.5	0.54	0.58	0.64	0.7	0.75	0.81	0.88
P/P_0	2.48	2.56	2.64	2.72	2.8										
h/d	0.94	0.99	1.04	1.1	1.15										

СТ-3.

P/P_0	0.09	0.17	0.26	0.35	0.43	0.52	0.61	0.7	0.78	0.87	0.95	1.04	1.13	1.21	1.3
h/d	0.02	0.05	0.08	0.1	0.13	0.15	0.17	0.19	0.21	0.23	0.24	0.26	0.28	0.29	0.31
P/P_0	1.39	1.47	1.56	1.65	1.73	1.82	1.9	1.99	2.08	2.16	2.25	2.34	2.42	2.51	2.6
h/d	0.32	0.34	0.35	0.37	0.4	0.43	0.46	0.48	0.53	0.59	0.63	0.69	0.75	0.8	0.85
P/P_0	2.68	2.77	2.85	2.94	3.03										
h/d	0.91	0.97	1.1	1.14	1.22										

Таблица 3

Результаты сканирования свободной поверхности для некоторых материалов (измерения проводились, начиная от недеформированной поверхности).

Свинец.

перемещение в мм.	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5
показания инди- катора в мкм.	1	2	3.5	4	5	6	12	20	26	34
перемещение в мм.	5.5	6	6.5	7	7.5	8	8.5	9	9.5	10
показания инди- катора в мкм.	44	70	129	186	210					

Баббит Б83.

перемещение в мм.	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5
показания инди- катора в мкм.	1	2	2.5	3.5	5.5	7	12	21	43	59
перемещение в мм.	5.5	6	6.5	7	7.5	8	8.5	9	9.5	10
показания инди- катора в мкм.	77	105	130	140						

АМЦ.

перемещение в мм.	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5
показания инди- катора в мкм.	1	2	3.5	4	5.5	7	7.5	9	12	17
перемещение в мм.	5.5	6	6.5	7	7.5	8	8.5	9	9.5	10
показания инди- катора в мкм.	28	38	50	79	117	172	220			

АК-9.

перемещение в мм.	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5
показания инди- катора в мкм.	1	2	3	4.5	5.5	7	9	12	17	22
перемещение в мм.	5.5	6	6.5	7	7.5	8	8.5	9	9.5	10
показания инди- катора в мкм.	37	58	78	97	120	145	174	210	264	

ЛС 59.

перемещение в мм.	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5
показания инди- катора в мкм.	1	2	2.5	3	6	9	10	12	14	22
перемещение в мм.	5.5	6	6.5	7	7.5	8	8.5	9	9.5	10
показания инди- катора в мкм.	34	51	68	84	102	125				

СЧ-18.

перемещение в мм.	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5
показания инди- катора в мкм.	0.5	1	1	2	4	6	12	18	29	44
перемещение в мм.	5.5	6	6.5	7	7.5	8	8.5	9	9.5	10
показания инди- катора в мкм.	56	70	85	108	120	130	154			

СТ-3.

перемещение в мм.	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5
показания инди- катора в мкм.	0.5	0.5	1	1.5	2	3	6	9	12	17
перемещение в мм.	5.5	6	6.5	7	7.5	8	8.5	9	9.5	10
показания инди- катора в мкм.	27	35	47	65	91	124	153			

Таблица 4.

Зависимость относительной опорной длины t_p от уровня сечения p .

p уровень сечения в % от Rmax	t_p образцов с различными рабочими поверхностями		
	притёртый	выработавший ресурс	восстановленный
20 %	14 %	24 %	24 %
40 %	36 %	52 %	47 %
60 %	71 %	70 %	73 %
80 %	91 %	90 %	89 %

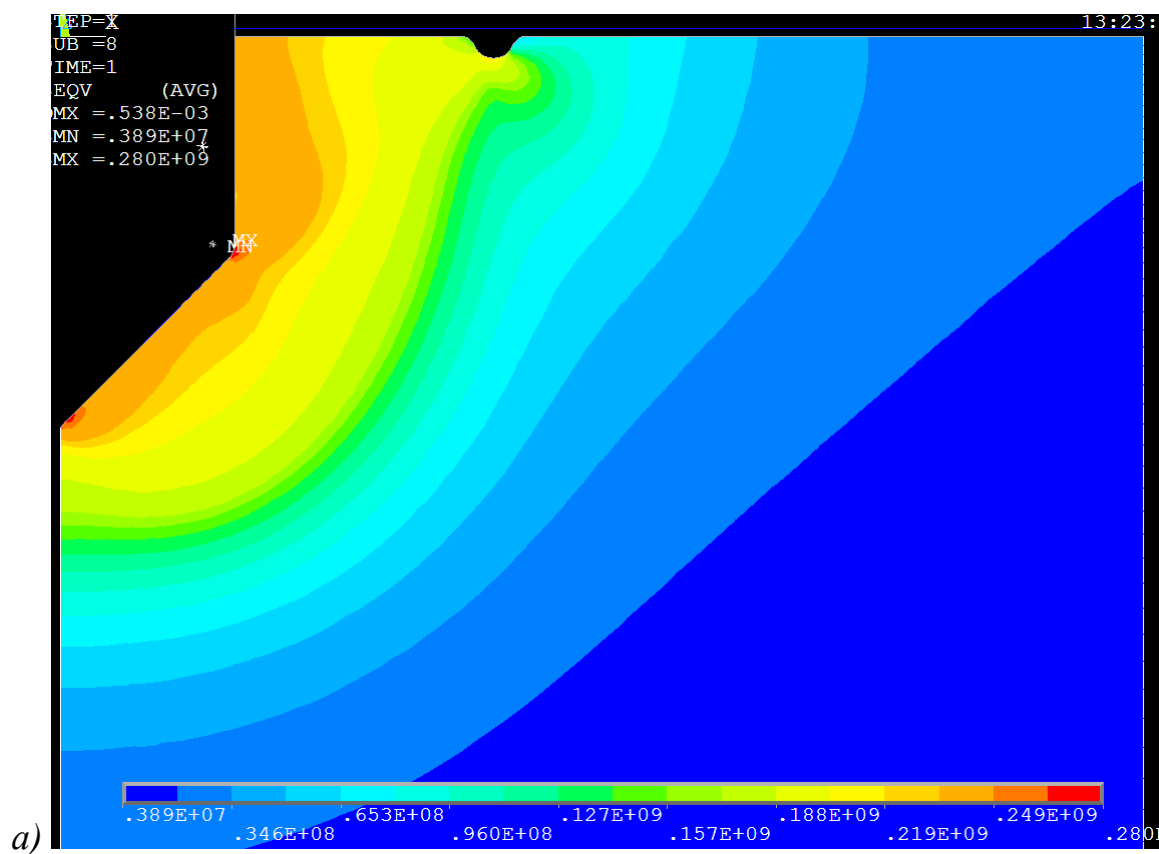


Рис. 1. Распределения эквивалентных напряжений по Мизесу

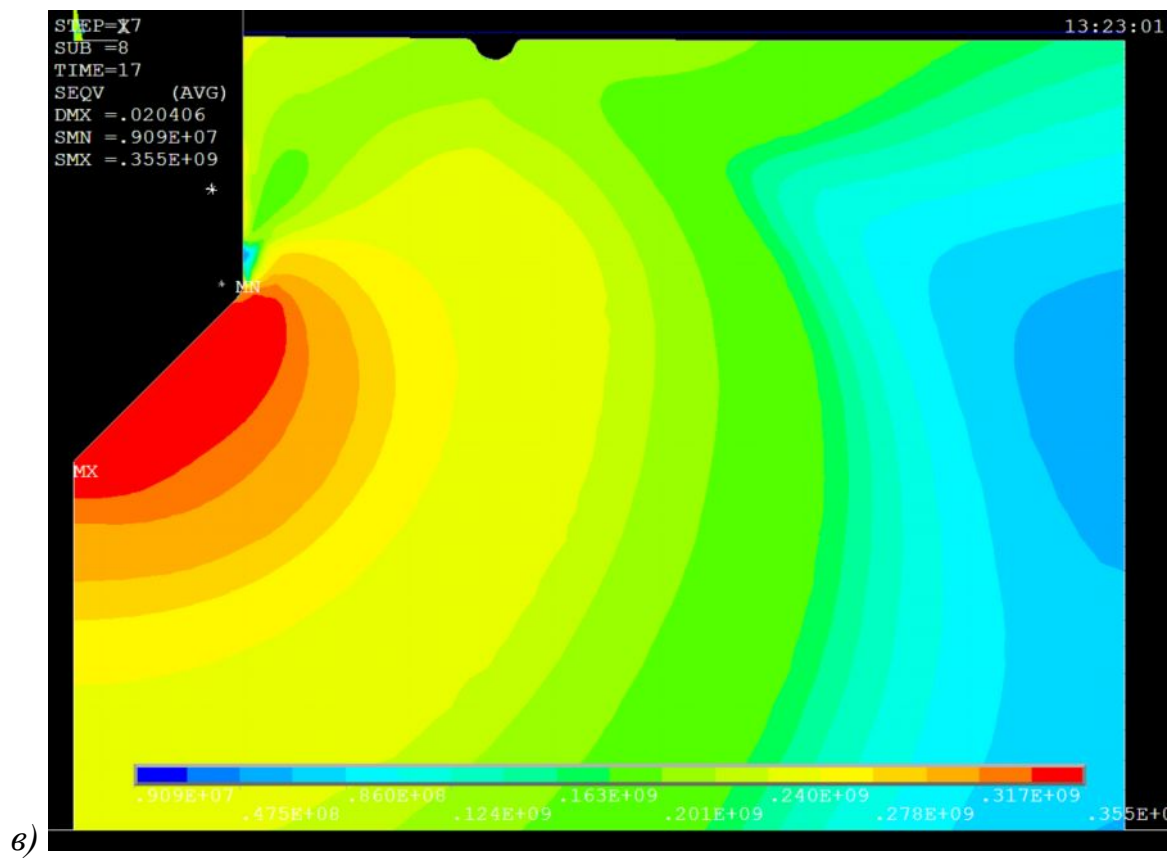
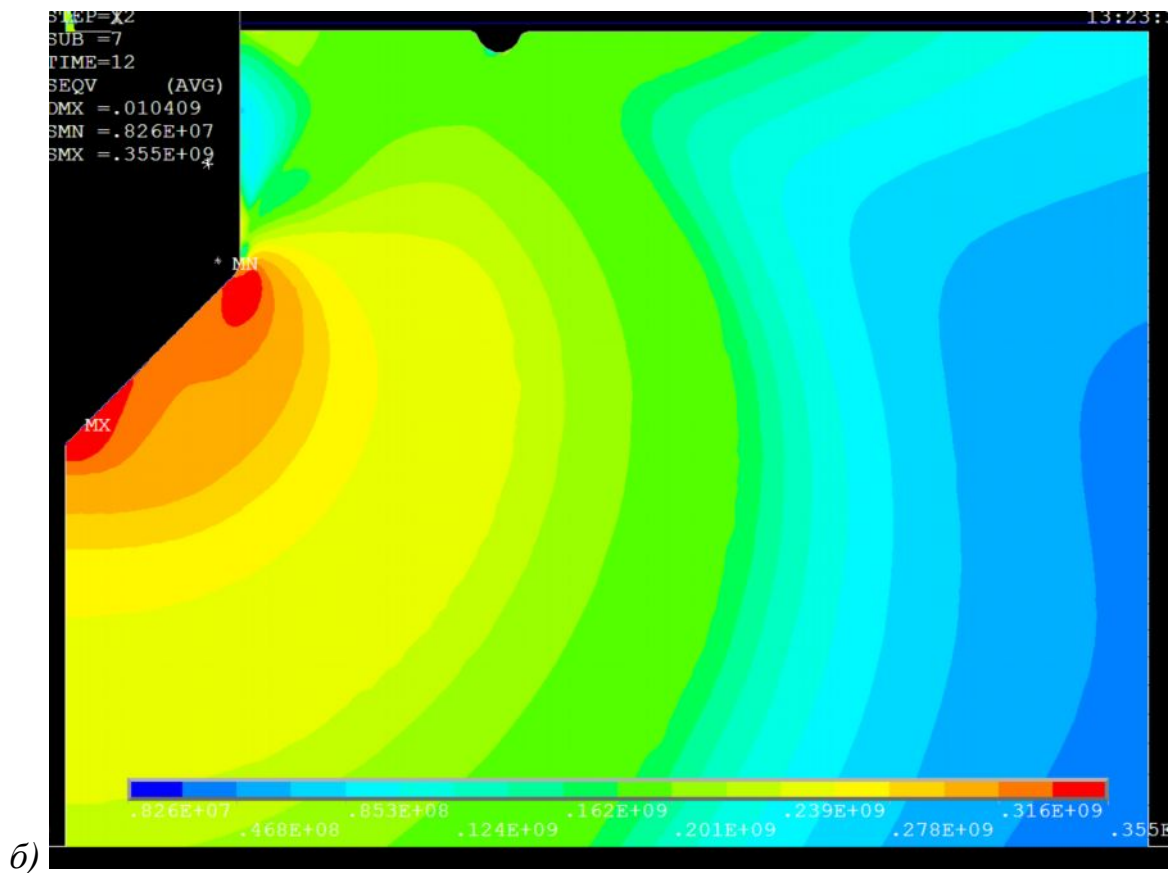


Рис. 1. Распределения эквивалентных напряжений по Мизесу.

Продолжение

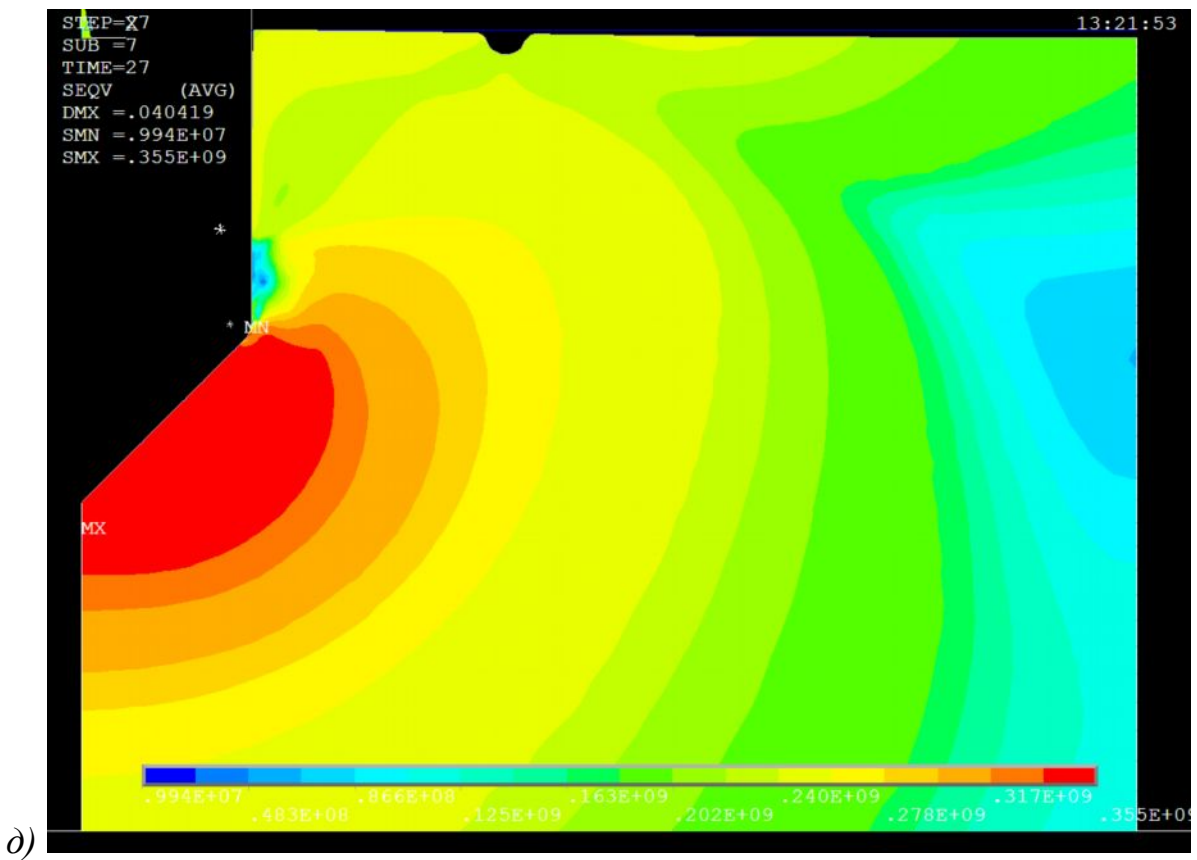
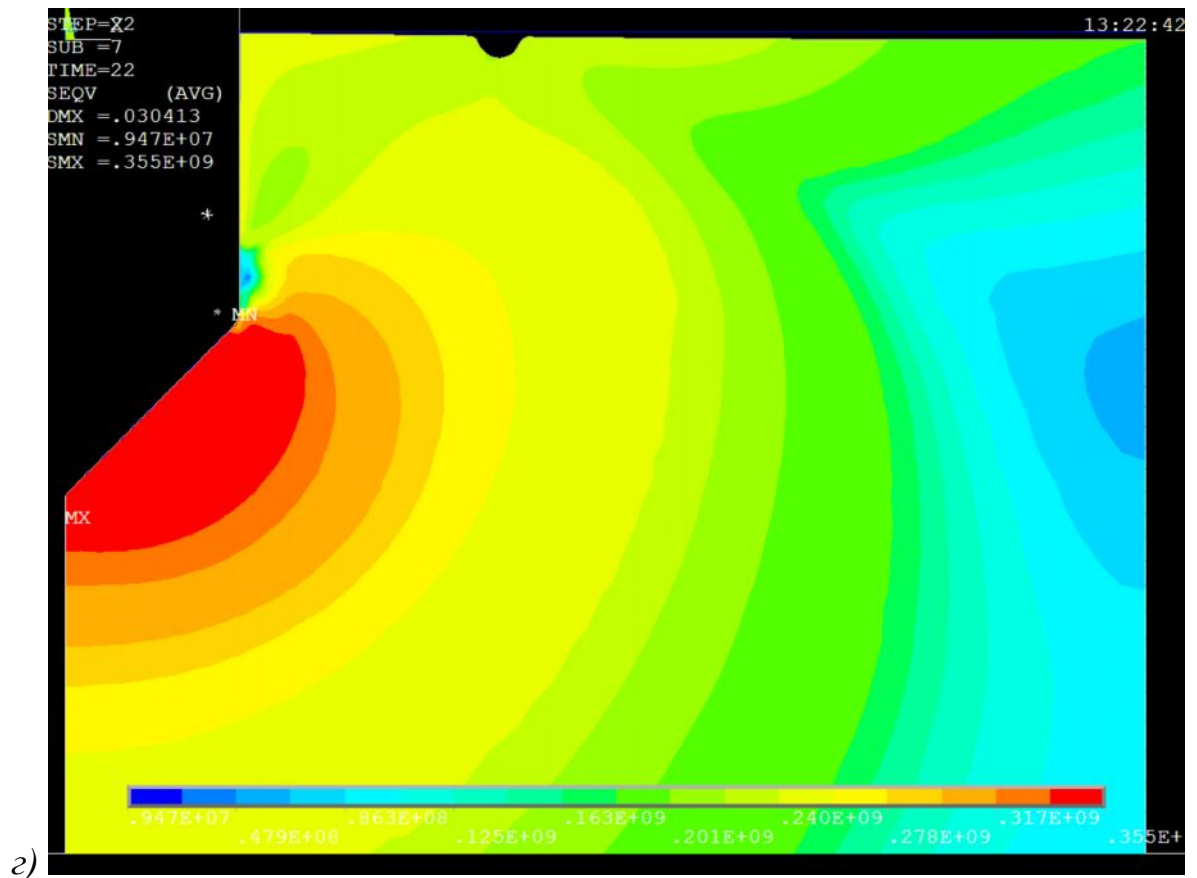


Рис. 1. Распределения эквивалентных напряжений по Мизесу.

Продолжение

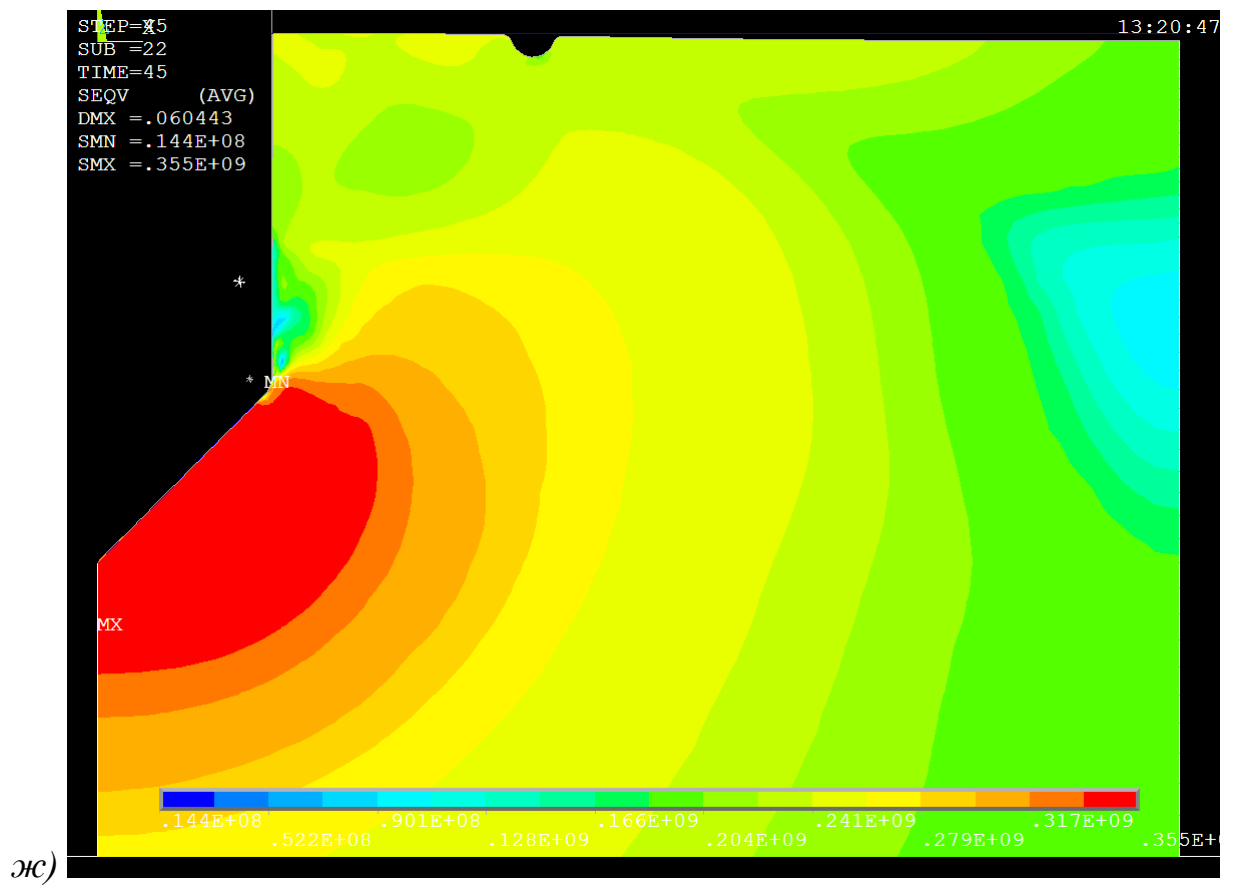
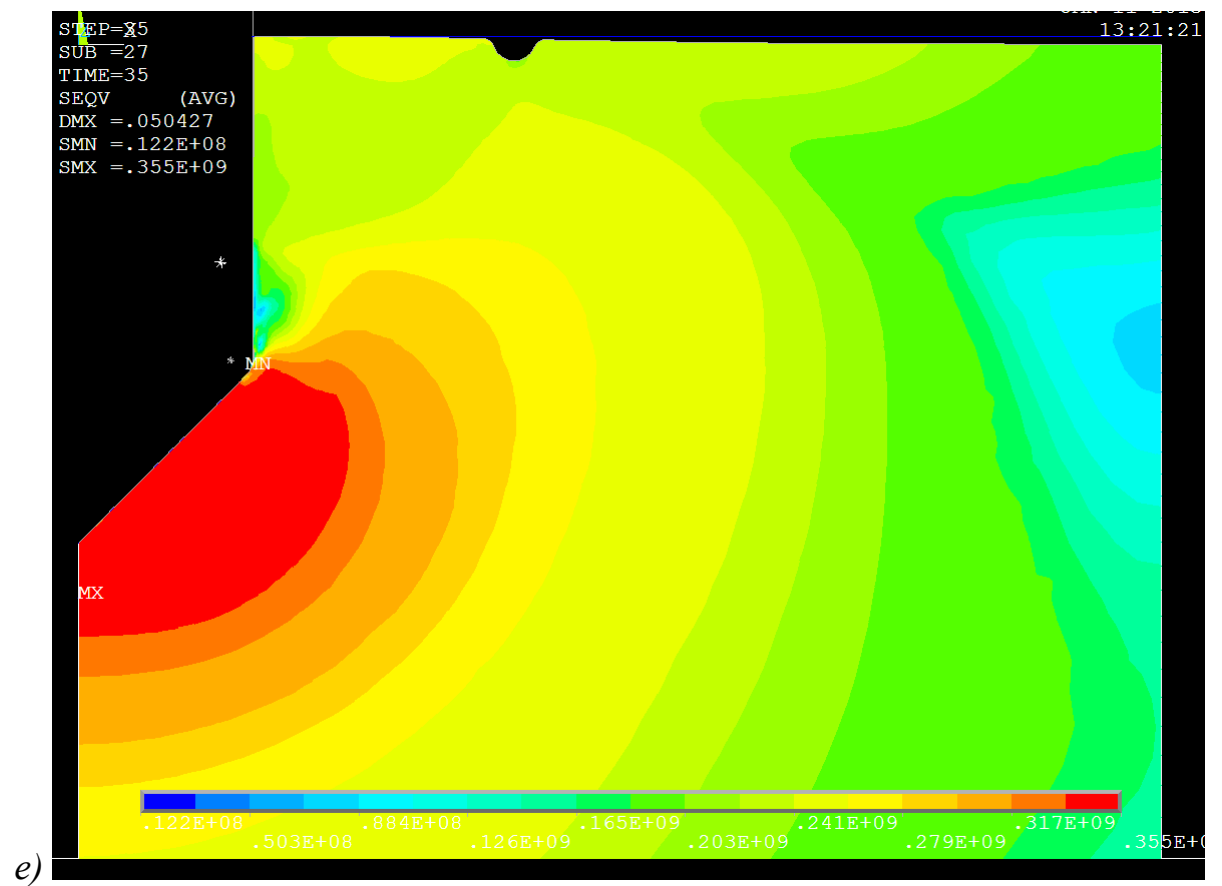


Рис. 1. Распределения эквивалентных напряжений по Мизесу.

Продолжение

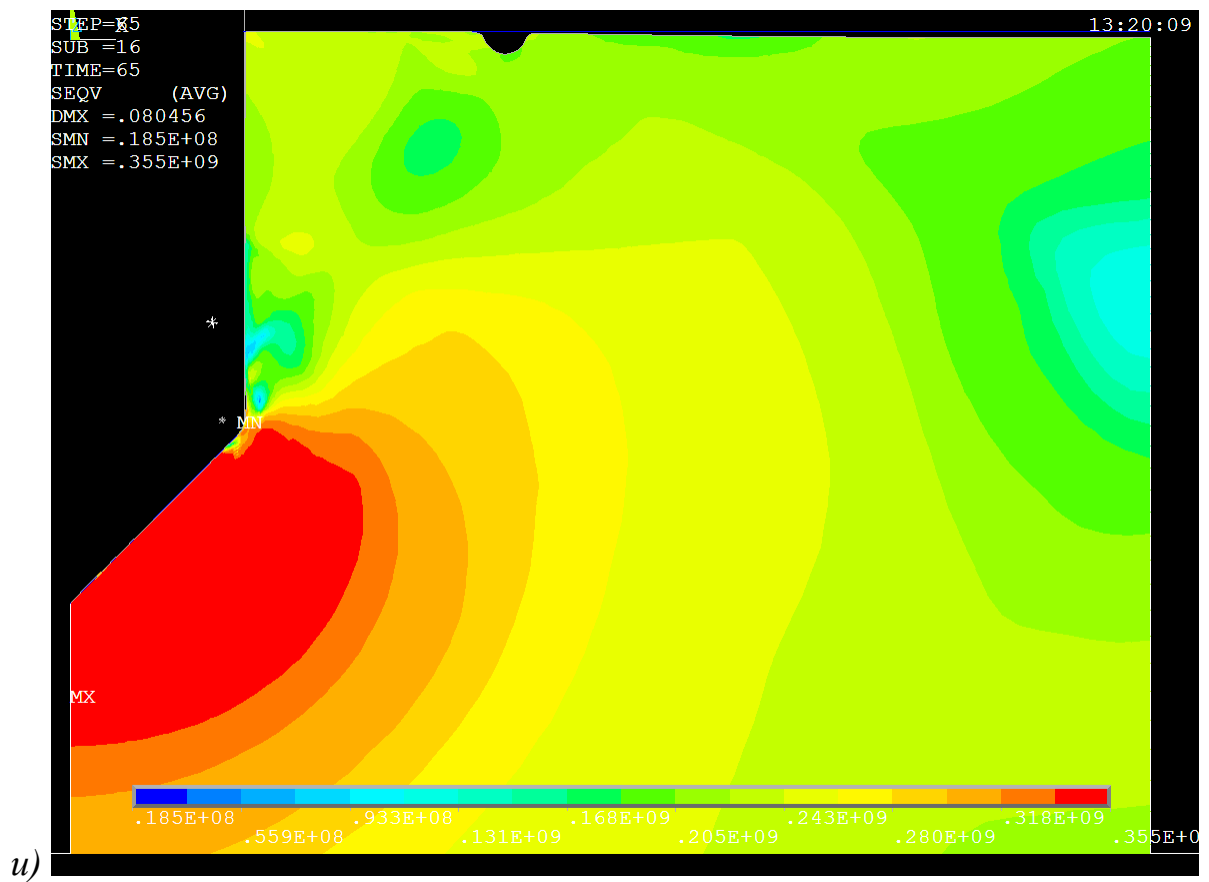
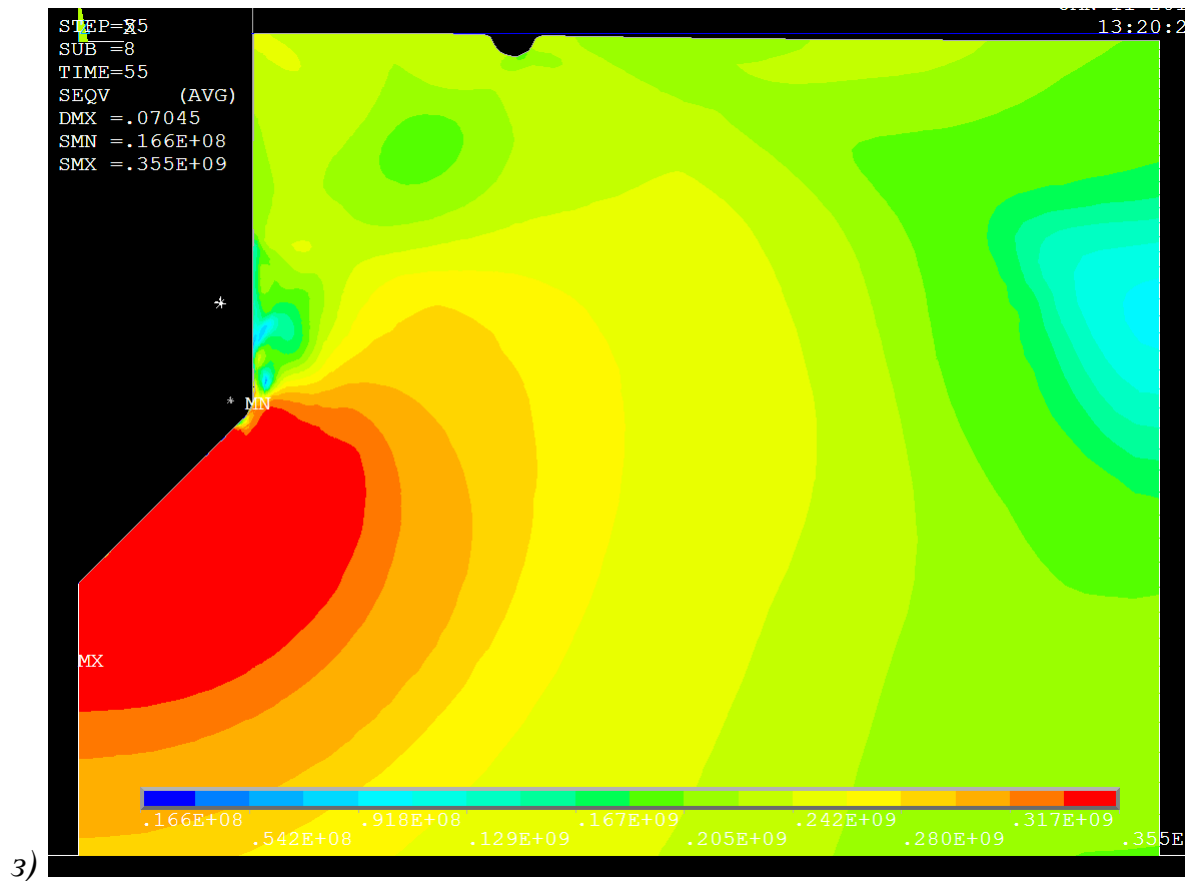


Рис. 1. Распределения эквивалентных напряжений по Мизесу.

Продолжение



Рис. 1. Распределения эквивалентных напряжений по Мизесу.

Окончание

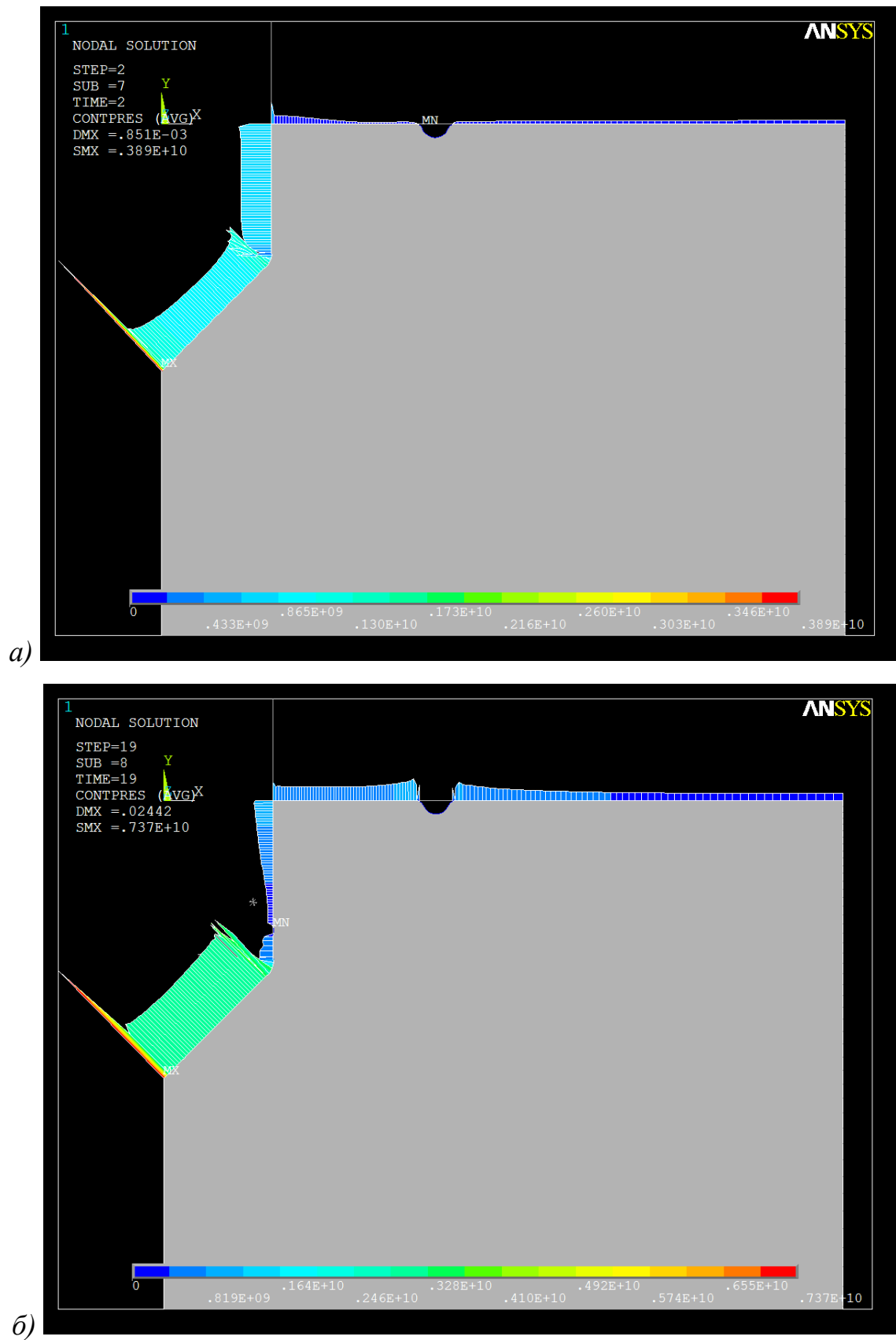


Рис. 2. Распределения нормальных давлений

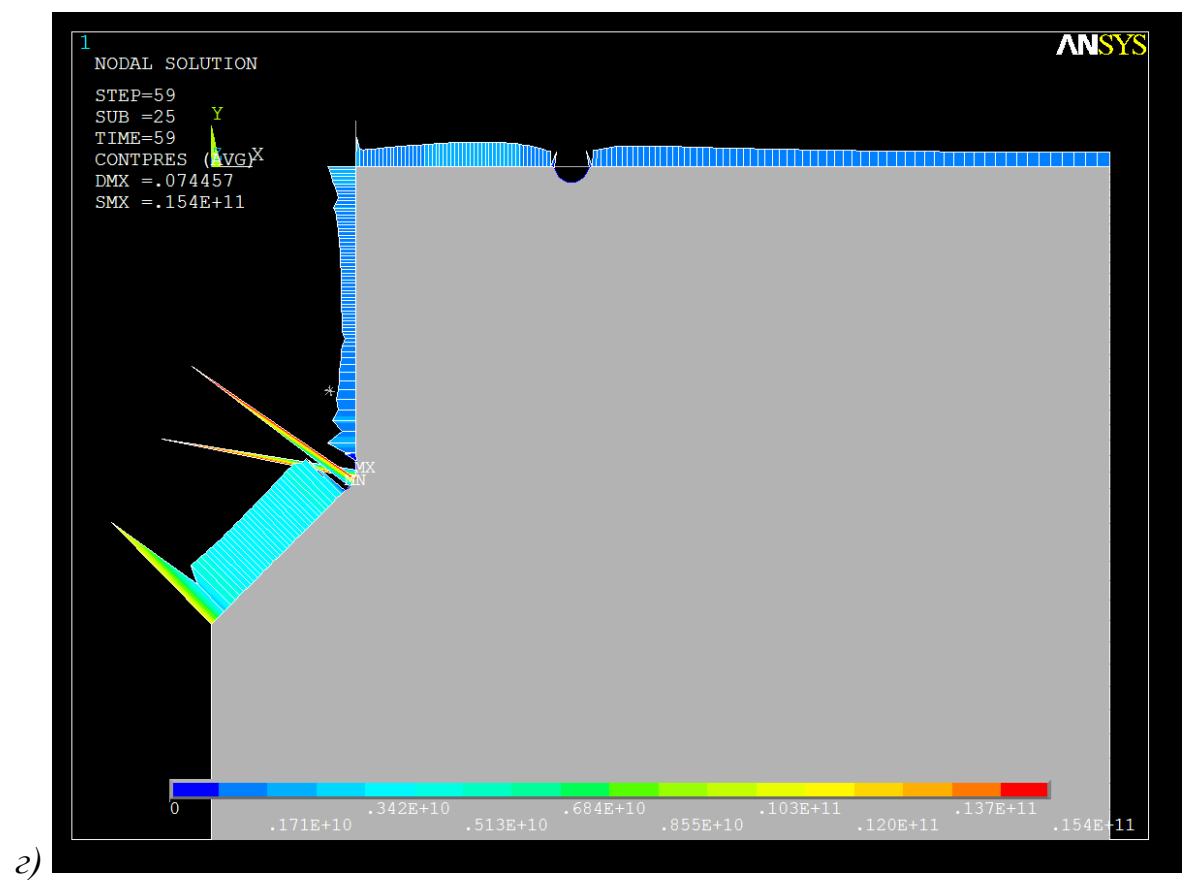
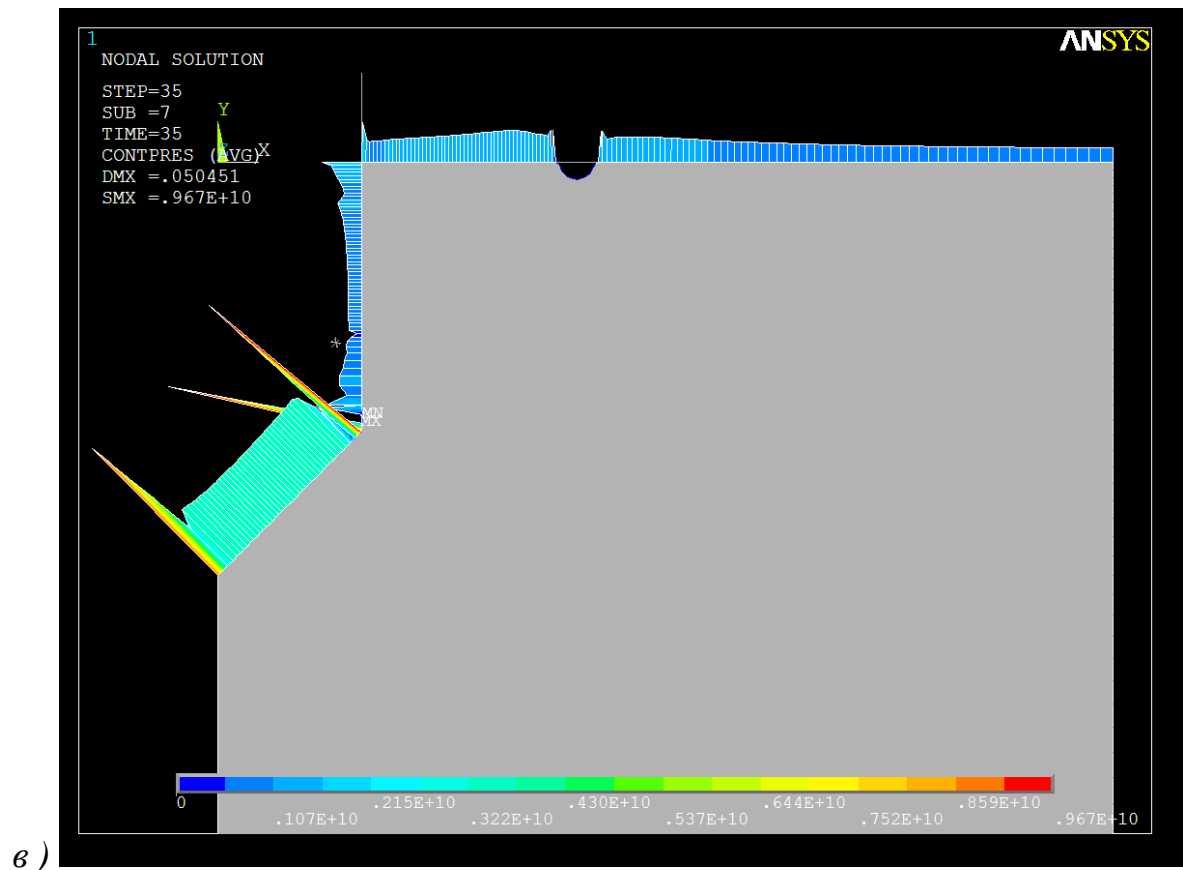


Рис. 2. Распределения нормальных давлений.

Продолжение

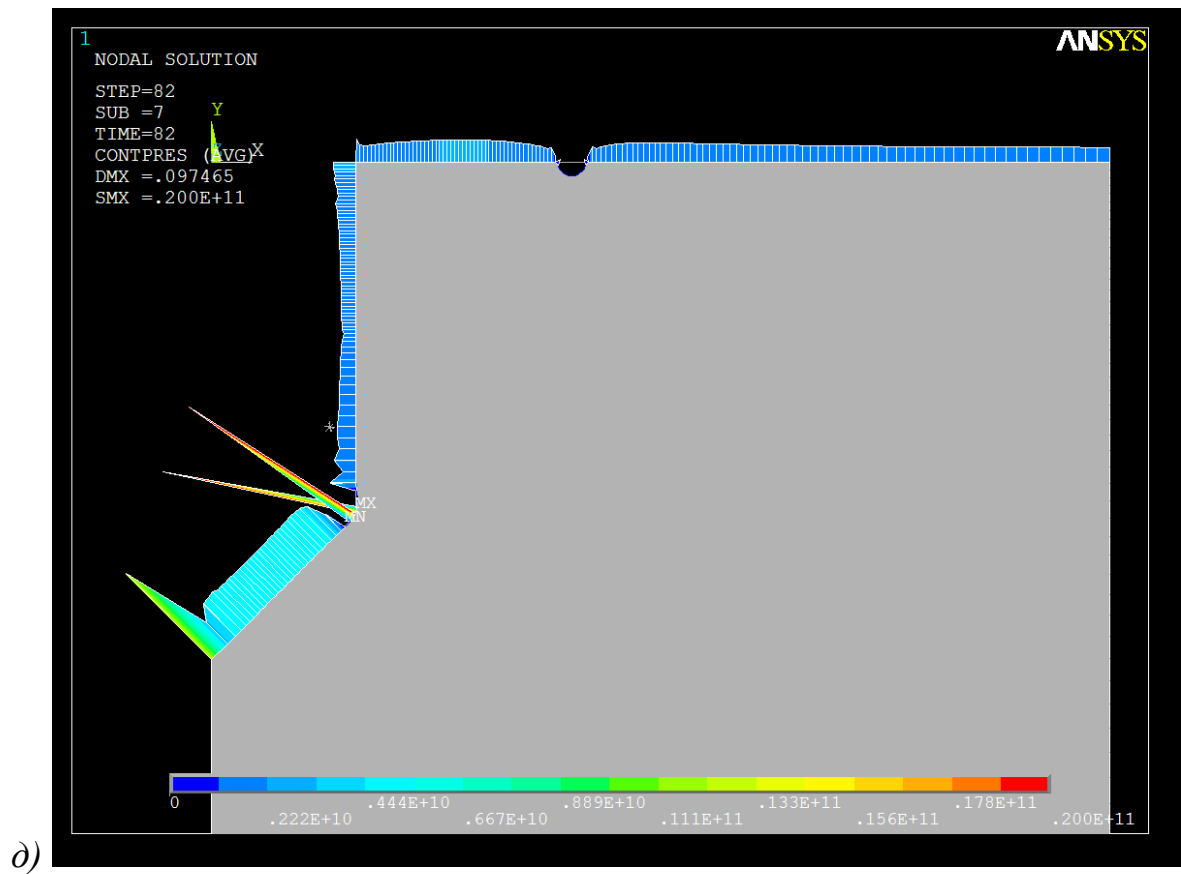


Рис. 2. Распределения нормальных давлений.

Окончание

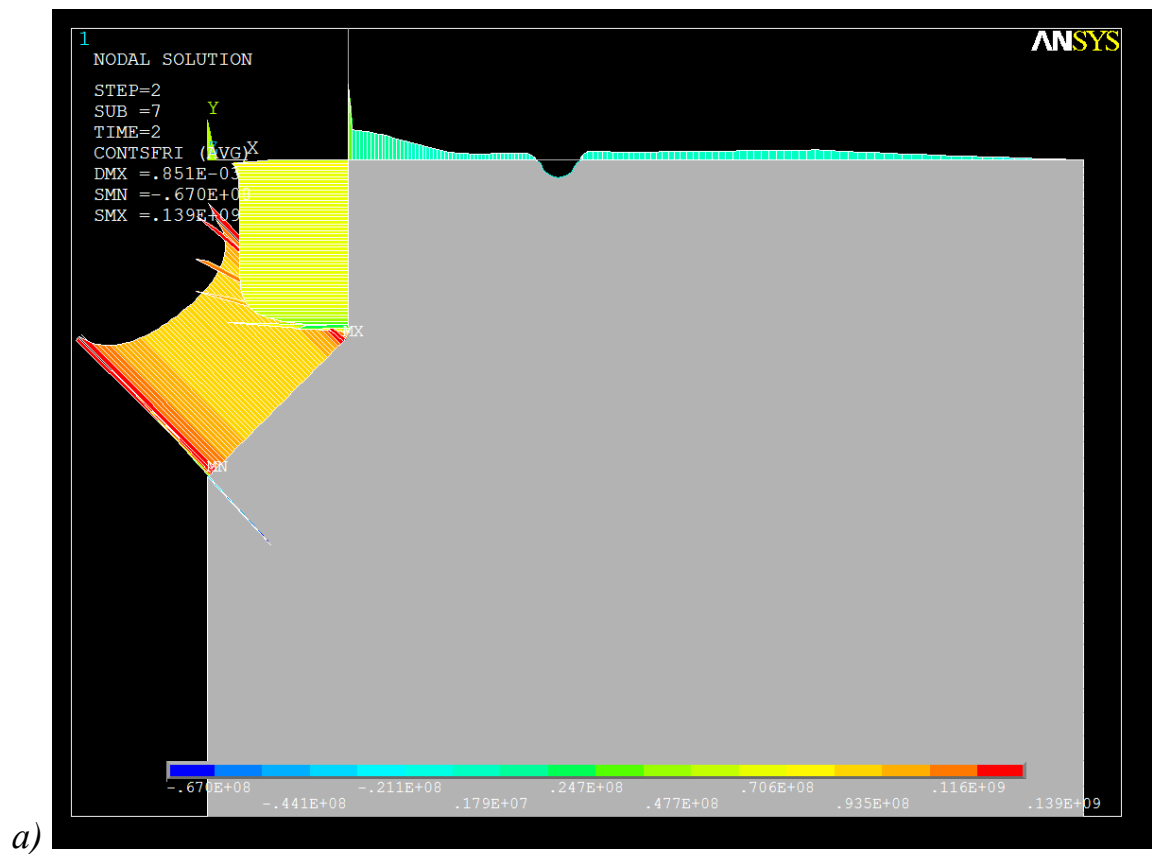


Рис. 3. Распределения касательных контактных напряжений

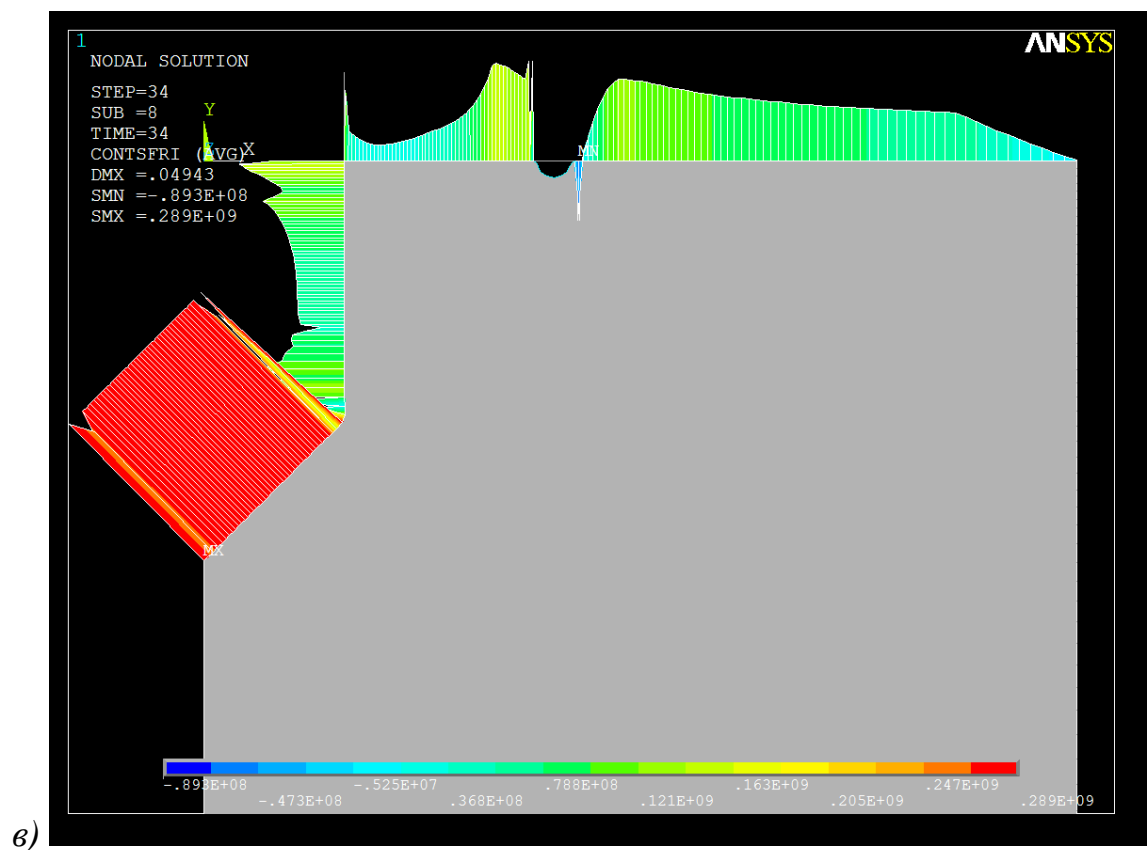
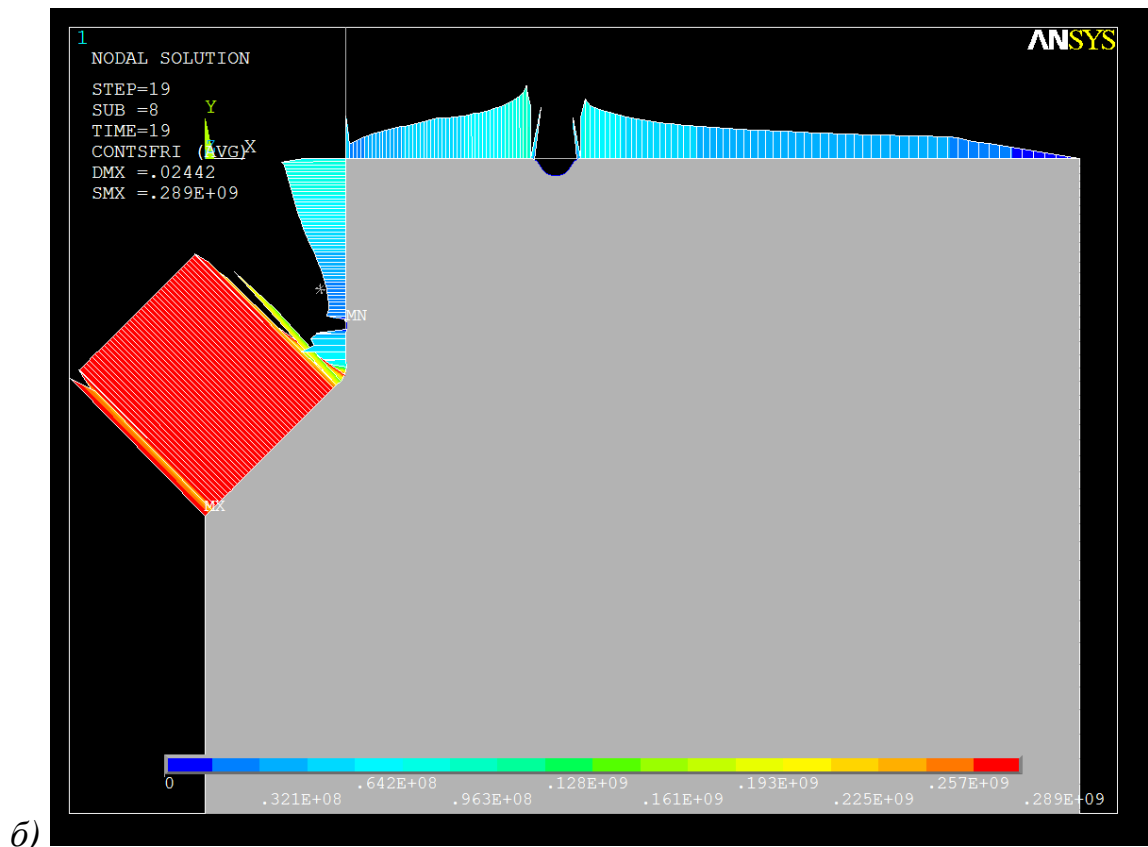


Рис. 3. Распределения касательных контактных напряжений.

Продолжение

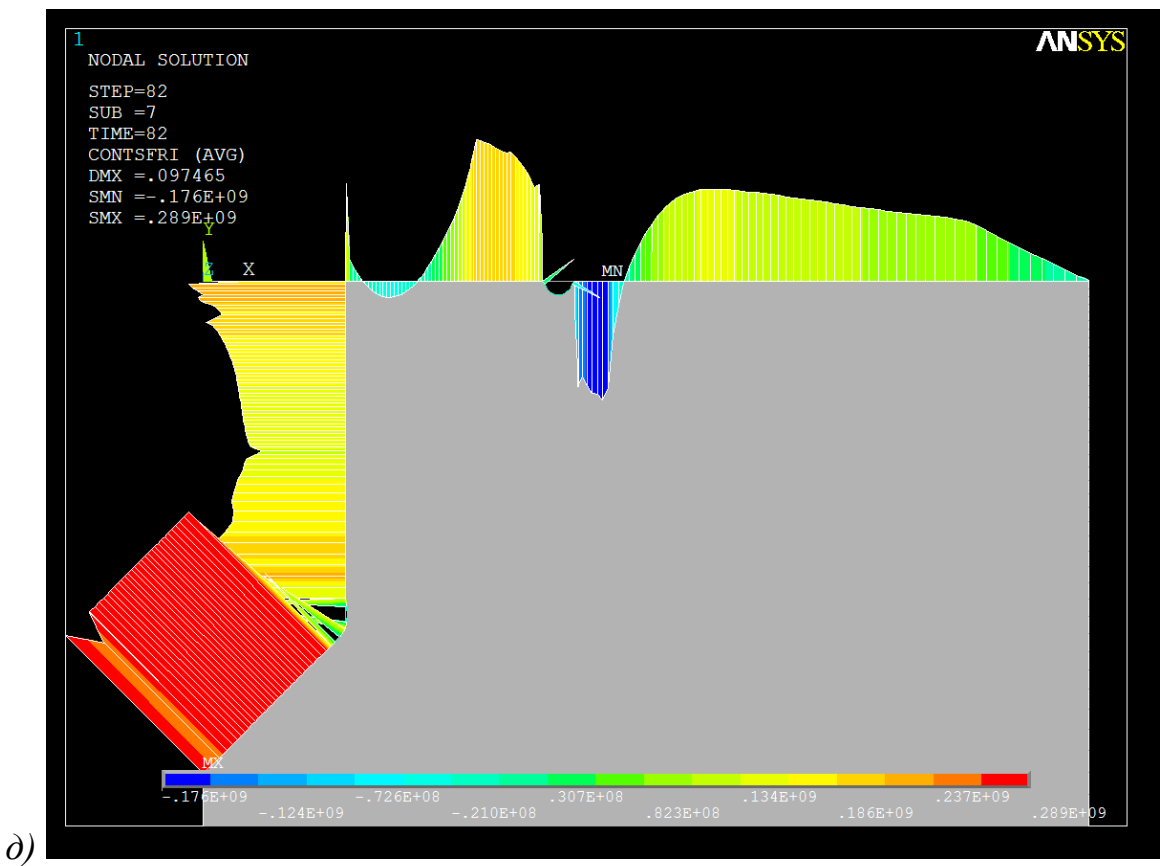
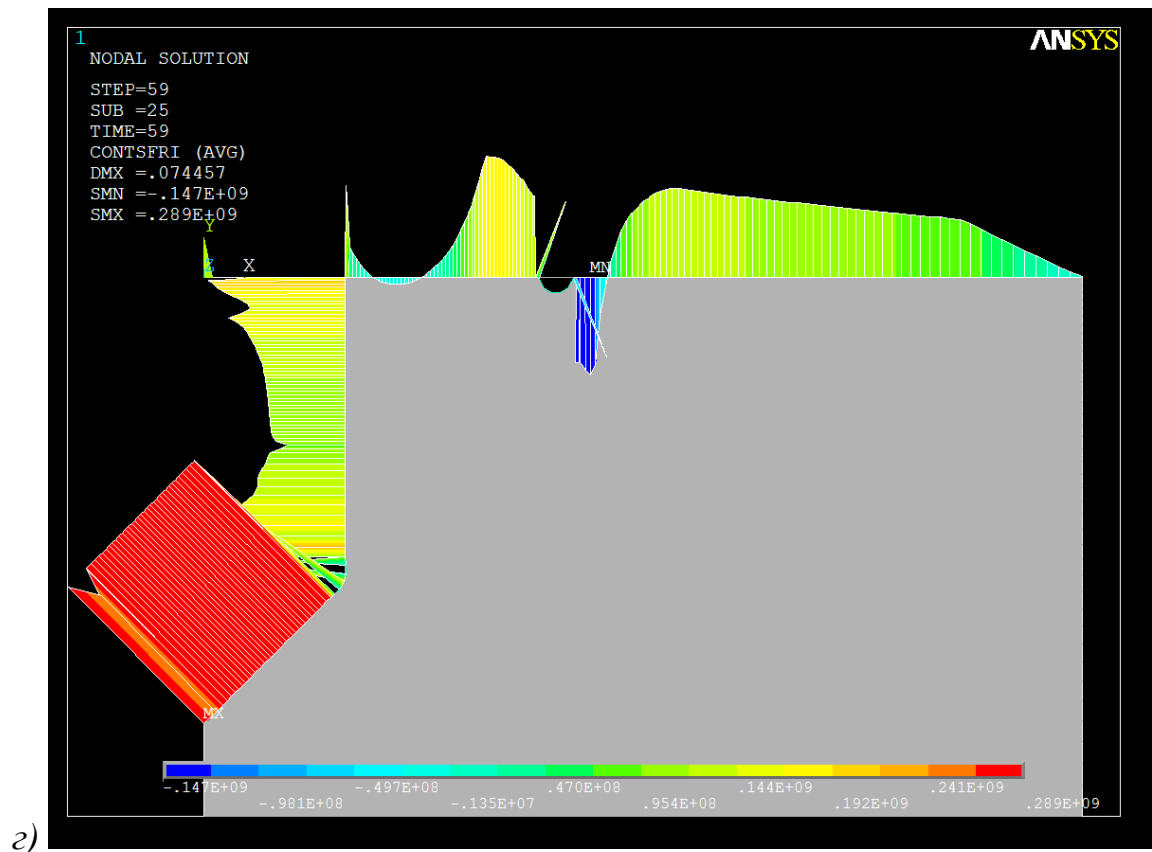


Рис. 3. Распределения касательных контактных напряжений.

Продолжение

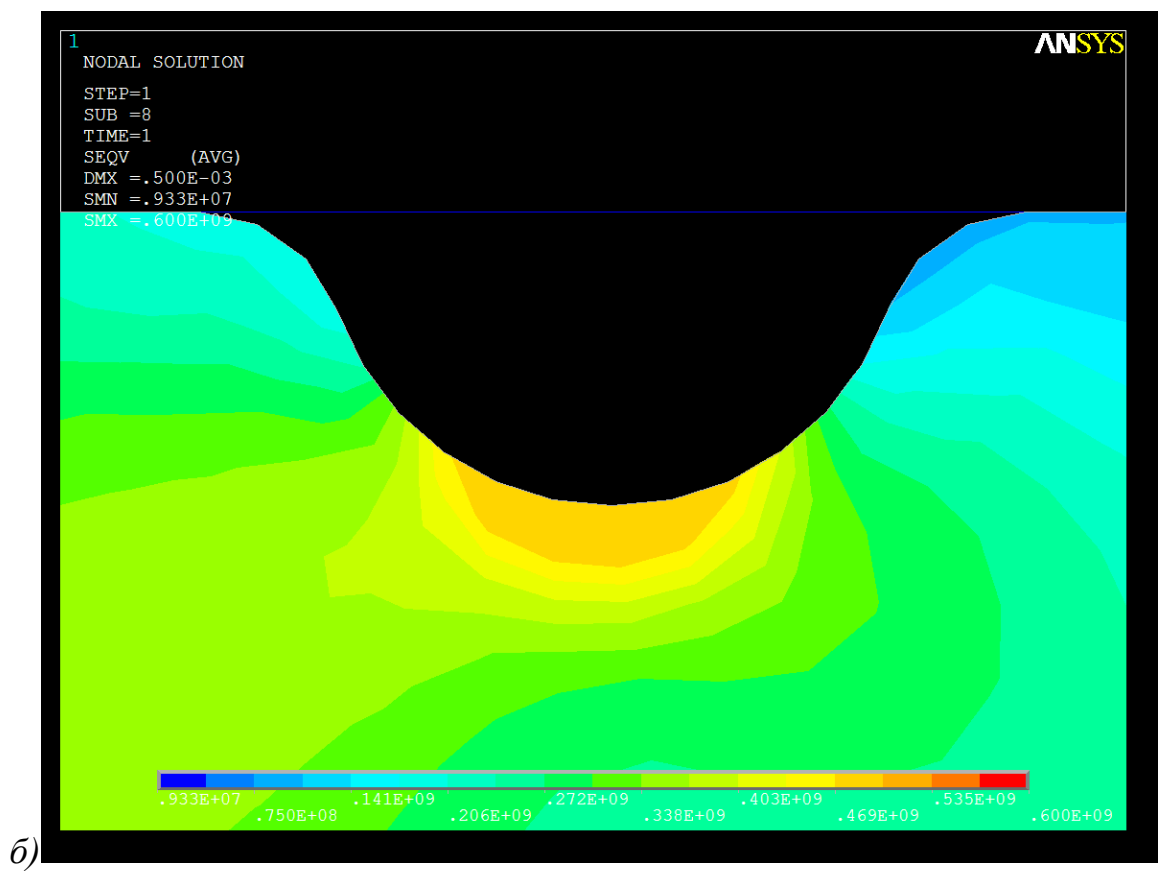
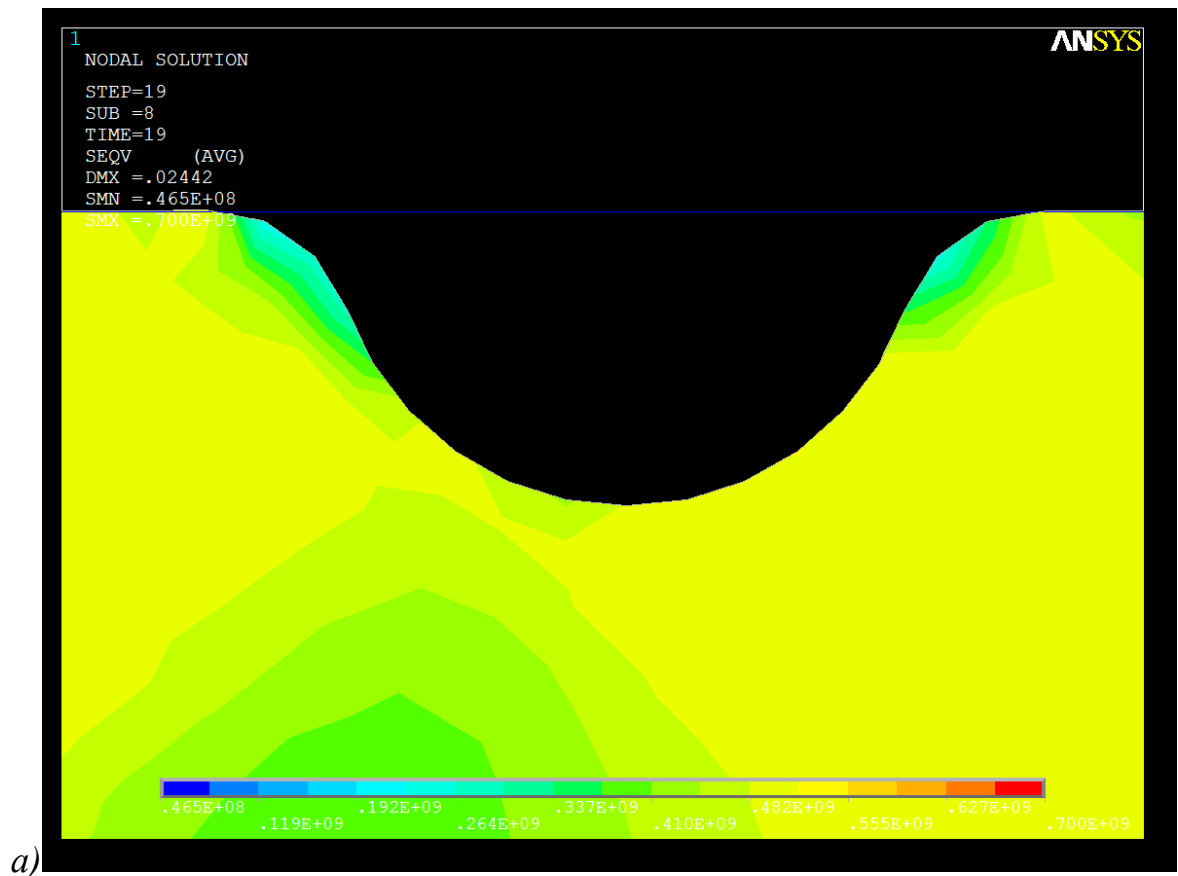


Рис. 4. Распределения контактных напряжений в зоне дефекта

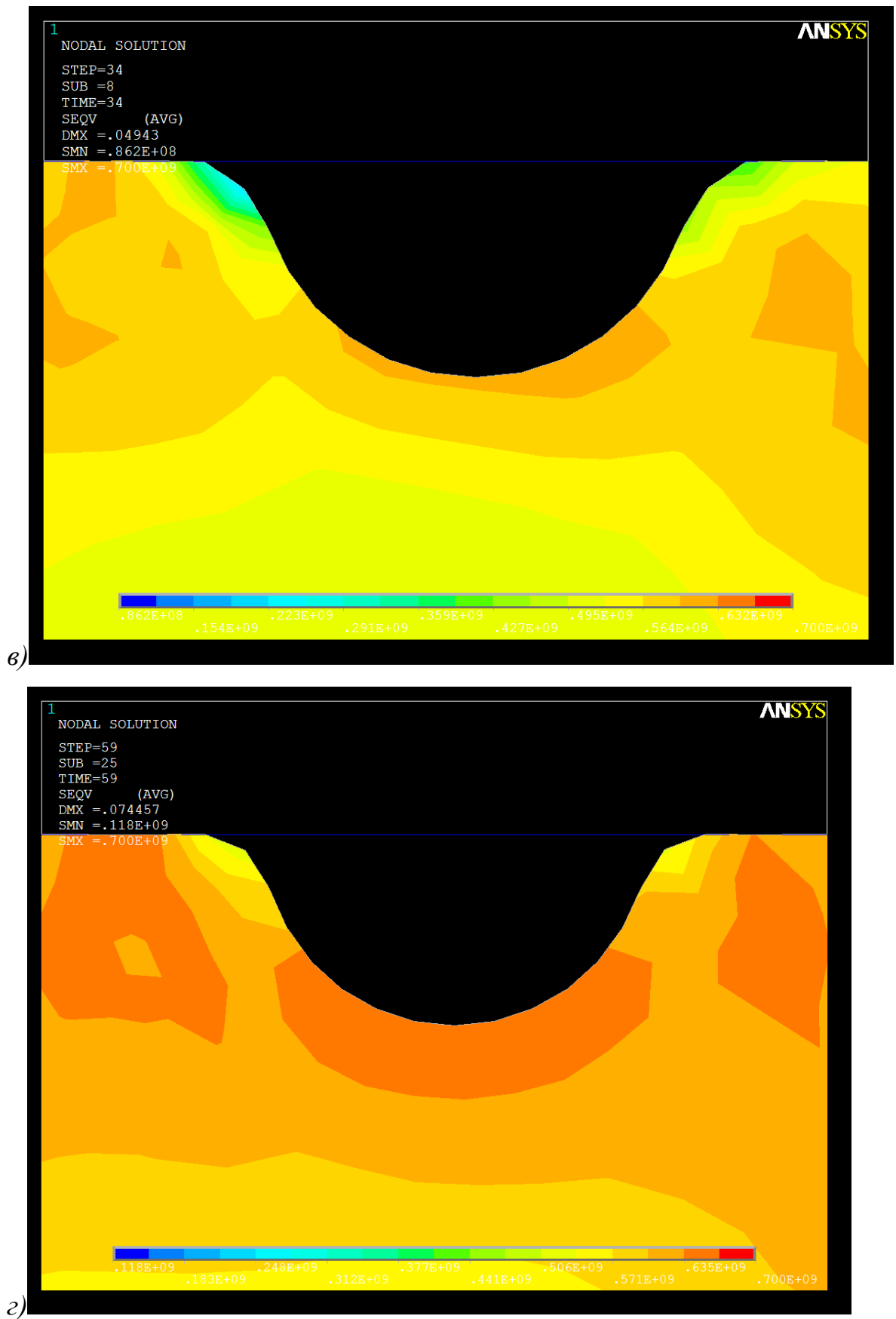


Рис. 4. Распределения контактных напряжений в зоне дефекта.

Продолжение

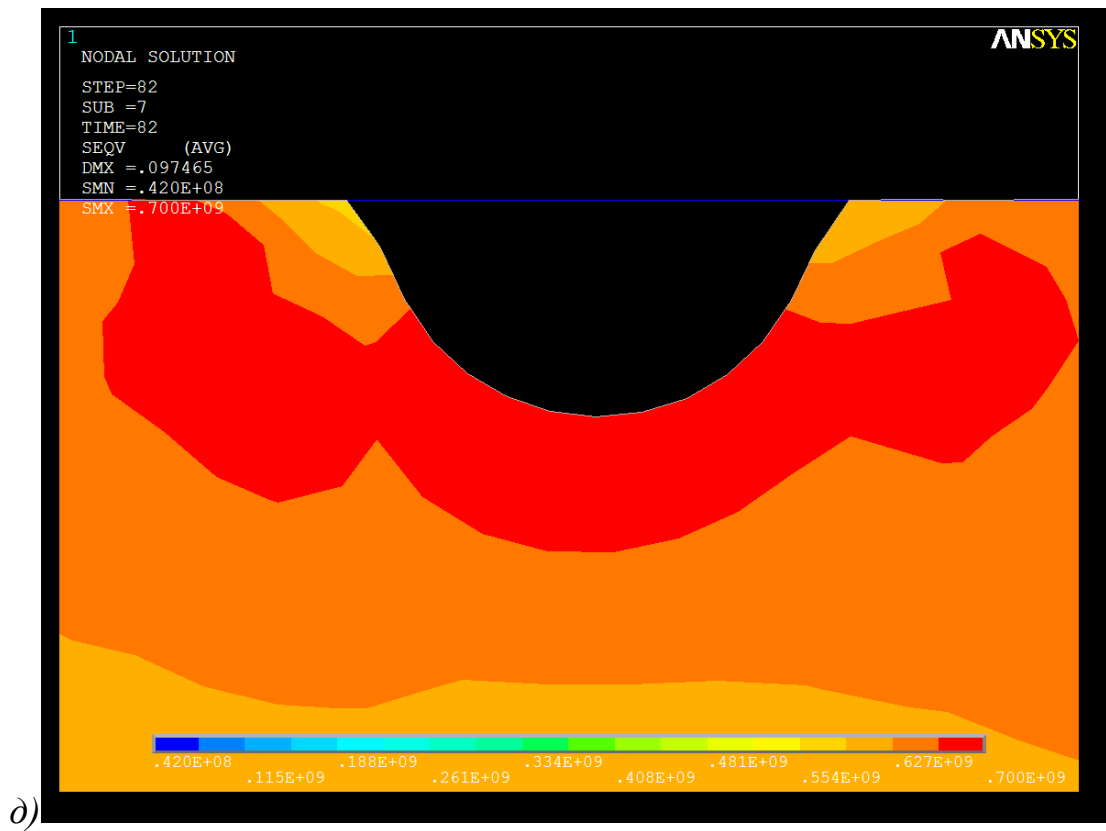


Рис. 4. Распределения контактных напряжений в зоне дефекта.

Окончание

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2228247

СПОСОБ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ЛОКАЛЬНО
ИЗНОШЕННОЙ ПОВЕРХНОСТИ ДЕТАЛИ

Патентообладатель(ли): *Тверской государственный технический университет*

Автор(ы): *Болотов Александр Николаевич,
Горлов Игорь Васильевич*

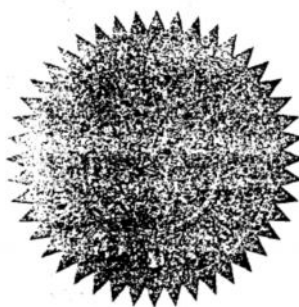
Заявка № 2002134415

Приоритет изобретения 20 декабря 2002 г.

Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений Российской Федерации 10 мая 2004 г.

Срок действия патента истекает 20 декабря 2022 г.

Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам



Б.П. Симонов

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2447981

**СПОСОБ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ЛОКАЛЬНО
ИЗНОШЕННОЙ ПОВЕРХНОСТИ КОРПУСНЫХ
ДЕТАЛЕЙ, ИЗГОТОВЛЕННЫХ ИЗ ПЛАСТИЧНЫХ
МАТЕРИАЛОВ И МАТЕРИАЛОВ С ОГРАНИЧЕННОЙ
ПЛАСТИЧНОСТЬЮ, И УСТРОЙСТВО ДЛЯ ЕГО
ОСУЩЕСТВЛЕНИЯ**

Патентообладатель(ли): *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Тверской государственный технический университет" (RU)*

Автор(ы): *см. на обороте*

Заявка № 2010114603

Приоритет изобретения **12 апреля 2010 г.**

Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений Российской Федерации **20 апреля 2012 г.**

Срок действия патента истекает **12 апреля 2030 г.**

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Б.П. Симонов

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2457268

МАТЕРИАЛ ДЛЯ ФРИКЦИОННЫХ ДЕТАЛЕЙ

Патентообладатель(ли): *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Тверской государственный технический университет" (RU)*

Автор(ы): *см. на обороте*

Заявка № 2011118816

Приоритет изобретения **10 мая 2011 г.**

Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений Российской Федерации **27 июля 2012 г.**

Срок действия патента истекает **10 мая 2031 г.**

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Б.П. Симонов



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2013660019

Программа анализа технического состояния
технологической машины

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Тверской государственный технический университет» (ТвГТУ) (RU)*

Авторы: *Горлов Игорь Васильевич (RU), Алонзов Андрей Евгеньевич (RU), Горлов Артём Игоревич (RU)*

Заявка № 2013616449

Дата поступления 22 июля 2013 г.

Дата государственной регистрации
в Реестре программ для ЭВМ 22 октября 2013 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Б.П. Симонов