

# Учебник



**Тойгамбаев С.К. Дидманидзе О.Н.**

**Апатенко А.С. Парлюк Е.П. Севрюгина Н.С.**

## **РАБОТОСПОСОБНОСТЬ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ**



**Москва 2022**



**МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
**«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ –**  
**МСХА имени К.А. ТИМИРЯЗЕВА»**  
(ФГБОУ ВО РГАУ - МСХА имени К.А. Тимирязева)

**Институт Механики и энергетики имени В.П. Горячкина**

**Кафедра «Технический сервис машин и оборудования»**

**Тойгамбаев С.К. Дидманидзе О.Н.**

**Апатенко А.С. Парлюк Е.П. Севрюгина Н.С.**

## **РАБОТОСПОСОБНОСТЬ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

Учебник для ВУЗов по изучению дисциплины.

**Москва 2022**

**Министерство сельского хозяйства Российской Федерации**  
**«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ –**  
**МСХА имени К.А. ТИМИРЯЗЕВА»**  
**ИНСТИТУТ МЕХАНИКИ И ЭНЕРГЕТИКИ им. В. П. ГОРЯЧКИНА**

**Кафедра «Технический сервис машин и оборудования»**

**Тойгамбаев С.К., Дидманидзе О.Н.,**  
**Апатенко А.С., Парлюк Е.П., Севрюгина Н.С.**

## **РАБОТОСПОСОБНОСТЬ**

## **ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

Учебник для студентов по дисциплинам: “Основы работоспособности технических систем”, “Работоспособность технологических систем и оборудования” “Основы теории надежности”.

Утверждено Федеральным УМО по укрупненной группе специальностей и направлений подготовки 23.00.00 - «Техника и технологии наземного транспорта» в качестве учебного пособия для обучающихся по направлениям подготовки 23.03.02 «Наземные транспортно-технологические комплексы», уровень образования - «бакалавриат», 23.03.03 «Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов», уровень образования - «бакалавриат», 23.03.03 «Техническая эксплуатация транспортных и транспортно-технологических машин и оборудования» уровень образования - «бакалавриат», 23.05.01 «Наземные транспортно-технологические средства», уровень образования «специалист».

Москва 2022

Авторы: Тойгамбаев Серик Кокибаевич к.т.н., профессор кафедры «Технический сервис машин и оборудования» РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева;

Дидманидзе Отари Назирович д.т.н., академик РАН, профессор заведующий кафедрой «Тракторы и автомобили» РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева;

Апатенко Алексей Сергеевич д.т.н. профессор заведующий кафедрой «Технический сервис машин и оборудования» РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева;

Парлюк Екатерина Петровна к.э.н., доцент кафедры «Тракторы и автомобили» РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева;

Севрюгина Надежда Савельевна к.т.н., доцент кафедры «Технический сервис машин и оборудования» РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева;

Рецензенты: Быков В.В. д.т.н., профессор кафедры ЛТ-4 ФГБОУВО НИУ МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Кравченко И.Н. д.т.н., профессор кафедры метрологии, стандартизации и управления качеством РГАУ-МСХА им. К. А. Тимирязева.

УДК 621.7. 621.17. 631.3. Учебник «Работоспособность технических систем» по изучению дисциплин студентами ИМЭ им. В.П. Горячкина по дисциплинам: “Основы работоспособности технических систем”, “Работоспособность технологических систем и оборудования”, “Основы теории надежности”./ Российский государственный аграрный университет–МСХА им. К.А. Тимирязева .

Авторы: С.К. Тойгамбаев, О.Н. Дидманидзе, А.С. Апатенко. М., Парлюк Е.П., Севрюгина Н.С. 2021, ©.

Учебник разработан на кафедре «Технический сервис машин и оборудования» ИМЭ им. В.П. Горячкина РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева. В данном учебнике изложен курс по обеспечению работоспособности технических и технологических систем и оборудования по данным дисциплинам.

Табл. 84. Ил. 61.

© РГАУ – МСХА им. К.А. Тимирязева  
Москва 2022

## Введение

Свойства объекта сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания, хранения и транспортирования - так ГОСТ 27.002-89 устанавливает понятие работоспособность технического объекта.

В основе новых рыночных отношений между изготовителем технического объекта и его потребителем является оценка качества изготовленного объекта, а при эксплуатации объекта - минимизация затрат труда и денежных средств за счет повышения качества технического обслуживания и ремонта.

Под качеством объекта понимается совокупность всех его свойств удовлетворять потребителя в соответствии с назначением данного объекта. Современные транспортно -технологические машины и оборудования представляют собой сложные технические системы с большим количеством различных агрегатов и узлов и с использованием различных гидравлических, механических и других приводов, поэтому качество данных машин является основной технико-экономической характеристикой их использования. Качество промышленной продукции вообще и машин в частности оценивается с помощью различных показателей: назначения, надежности, технологичности, эргономичности, стандартизации и унификации, патентно-правовых. Надежность является одним из основных свойств и во многом определяет качество изделий.

Показатели надежности объекта являются наиболее важными составляющими его качества, так как они определяют его работоспособность. От свойств безотказности и долговечности машины во многом зависит ее производительность и эффективность ее использования.

Определенные свойства надежности машин - безотказность, долговечность, ремонтпригодность и сохраняемость - закладываются еще на стадии их проектирования. Особо важную роль в соблюдении заданных свойств надежности машины играют технологические процессы изготовления деталей и сборки. Своевременное и грамотное проведение технического обслуживания и ремонта в

период эксплуатации машины позволяет достаточно длительно сохранять эти свойства. Задачей инженерно-технической службы заключается в том, чтобы обеспечить грамотное и эффективное использование техники, реализовать те показатели надежности, которые заложены в конструкции машин при их создании. Без знания теории надежности нельзя добиться долговечной и безотказной работы сельхозмашин.

Показатели надежности машины относятся к категории случайных величин, и при определении их численных значений рекомендуется определять не только их среднее значение, но и доверительные границы рассеивания, пользуясь методами теории вероятности и математической статистики.

Потребитель сложной техники должен уметь определять показатели ее надежности и на этой основе планировать и осуществлять работу службы эксплуатации, развивать технический сервис машин, правильно решать технологические, организационные и экономические задачи поддержания машин в работоспособном состоянии в течение всего периода их эксплуатации.

Конструирование машины, обоснование технологии изготовления и сборки ее основных элементов, разработку и оптимизацию управляющих воздействий, направленных на поддержание работоспособности машин в эксплуатации, следует проводить, учитывая техническое состояние основных сборочных единиц и закономерности его изменения в процессе работы машины. Из всего многообразия показателей, характеризующих технический уровень машин, показатели надежности в наибольшей мере поддаются управлению в сфере проектирования, производства и эксплуатации. Недостаточная работоспособность машин сказывается на уменьшении их производительности из-за простоев в ремонте, на величине материальных и трудовых затрат на их содержание, на росте капитальных вложений в производственные фонды ремонтного производства и промышленности, занятую выпуском запасных частей.

Настоящий учебник призван ознакомить студентов с общей системой управления качеством и надежностью, напрямую влияющих на работоспособность всей машины.

# Глава 1 Качество продукции

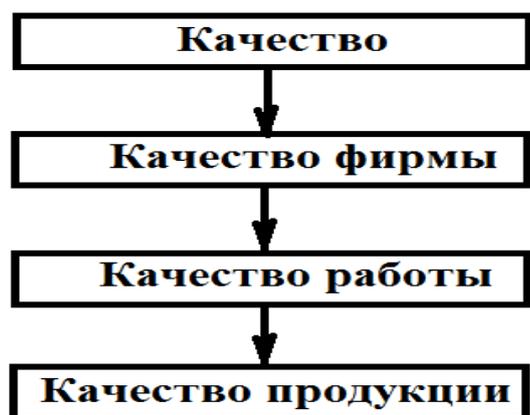
## 1.1. Основные понятия о качестве продукции

Качество продукции – это совокупность свойств данной продукции, пригодные удовлетворять определенные потребности человека, отрасли или общество в соответствии с назначением данной продукции. Применительно к технике (машинам) понятие "продукция" заменяется понятием "изделие". Изделие – единица промышленной продукции (ГОСТ 15467). Таким образом, качество изделия есть совокупность свойств изделия, которые удовлетворяют потребителя. Качество изделия распространяется не только на конечное изделие, но одновременно и на все агрегаты, узлы и детали этого изделия, если говорить, например, о машинах.

Качество – комплексное понятие, характеризующее эффективность всех сторон деятельности, разработку стратегии, организацию производства, маркетинг и др. Важнейшей составляющей всей системы качества является качество продукции. В современной литературе и практике существуют различные трактовки понятия качества. Международная организация по стандартизации определяет качество (стандарт ИСО 8402) как совокупность свойств и характеристик продукции или услуги, которые придают им способность удовлетворять обусловленные или предполагаемые потребности. Этот стандарт ввел такие понятия, как «обеспечение качества», «управление качеством», «спираль качества». Требования к качеству на международном уровне определены стандартами ИСО серии 9000. Эти стандарты установили четкие требования к системам обеспечения качества. Они положили начало сертификации систем качества. Возникло самостоятельное направление менеджмента - менеджмент качества.

Стандарты ИСО серии 9000 установили единый признанный в мире подход к договорным условиям по оценке систем качества и одновременно регламентировали отношения между производителями продукции. Качество можно представить в виде пирамиды (рис. 1.1).

*Качество фирмы* - это работа, связанная с обеспечением высокого организационно-технического уровня производства, требуемых условий труда.



*Качество работы* включает обоснованность принимаемых управленческих решений, систему планирования. Особое значение имеет качество работы, непосредственно связанной с выпуском продукции (контроль качества технологических процессов, своевременное выявление брака).

Рис. 1.1 Пирамида качества *Качество продукции* является составляющей и следствием качества работы. На этом этапе непосредственно оценивается качество годной продукции, мнение потребителя, анализируются рекламации.

В соответствии с ГОСТ15467 качество продукции – это совокупность свойств продукции, обуславливающих ее пригодность удовлетворять определенные потребности в соответствии с ее назначением.

Каждая продукция имеет свои показатели качества.

Показатель качества продукции - количественная характеристика одного или нескольких свойств продукции, входящих в ее качество, рассматриваемая применительно к определенным условиям ее создания и эксплуатации или потребления.

Показатели качества транспортных и транспортно - технологических машин и технических средств можно классифицировать как технические и технологические.

**Технические показатели** качества транспортных и технологических машин и технических средств, включают следующие показатели:

*назначения* – данный показатель характеризует свойства объекта, определяющего основные функции, для выполнения которых он предназначен;

*надежности* – данный показатель определяет количественные характеристики одного или нескольких свойств, составляющих надежность объекта;

*эргономичности* – данный показатель характеризует не отдельный объект, а систему человек - машина с точки зрения удобства и комфорта эксплуатации конкретного изделия;

*экологичности* – данный показатель характеризуют еще более сложную систему человек – машина - среда с точки зрения вредных воздействий на природу в процессе эксплуатации машин;

*эстетичности* – данный показатель характеризует рациональность формы, целостность композиции и совершенство производственного использования изделия;

*патентно-правовые* – данный показатель характеризует степень обновления технических решений, использованных в конкретном объекте, их патентную защиту, а также возможность беспрепятственной реализации за рубежом.

***Технологические показатели качества машин*** включают следующие показатели:

*технологичности* – данный показатель характеризует приспособленность конструкции машины к ее изготовлению и эксплуатации;

*транспортабельности* – данный показатель характеризует приспособленность объекта к транспортированию, не сопровождающему его использование по прямому назначению;

*стандартизации и унификации* – данный показатель характеризует оснащенность объекта стандартными, унифицированными и оригинальными частями, а также унификацию с другими изделиями;

*безопасности* – данный показатель характеризует особенности объекта, обуславливающие безопасность обслуживающего персонала при его эксплуатации.

## **1.2. Основные факторы повышения качества изделия**

Повышение качества изделия осуществляется по двум основным направлениям:

- 1) повышение качества изделия при его создании и изготовлении;
- 2) повышение качества технической эксплуатации изделия.

Под технической эксплуатацией изделия подразумевают систему технического обслуживания (ТО) и ремонта (Р) изделия.

Качество изделия при его создании и изготовлении совершенствуется двумя методами.

Во-первых, повышается качество ранее освоенной техники, без пересмотра, лежащих в ее основе конструктивных идей и рабочих процессов. Примером может служить повышение качества изготавливаемой машины путем:

1) внесения прогрессивных изменений в ее конструкцию или в конструкцию агрегатов, узлов, деталей, не меняющих саму конструктивную идею машины;

2) за счет применения более высококачественных и износостойких материалов, улучшения термической обработки деталей, более высокой точности сборки и т.д.

Во-вторых, качество изделия существенно повышается при освоении и введении машины, основанной на совершенно новых конструктивных идеях или выполняющие принципиально новые рабочие процессы. Например, использование тепловозов и электровозов взамен паровозов, применение реактивных двигателей вместо поршневых.

Качество машин зависит многих факторов, главными из которых считаются:

- инженерные;
- производственные;
- снабженческие;
- квалификационные;
- организационные;
- экономические.

Инженерными факторами являются конструкция изделия и технологические процессы его изготовления, которые определяются чертежами, стандартами, техническими условиями, конструкторской, технологической и иной документацией.

Производственными факторами являются состояние и технический уровень применяемого оборудования для изготовления изделий, использование современных средств контроля за выполнением технологического процесса изготовления деталей, сборки узлов и агрегатов.

Снабженческими факторами определяются качество поставляемых заводу-изготовителю комплектующих изделий, узлов, деталей, исходных материалов, режущего инструмента и т.д.

Квалификационными факторами являются знания и опыт работы производственных рабочих, инженерно-технических работников.

Организационные факторы охватывают состояние технологической дисциплины, соблюдение принципов и методов организации труда, внедрение прогрессивных технологий и методов контроля над технологическим процессом изготовления изделия и т.п.

К числу экономических факторов относятся уровень цен на потребляемые материалы и комплектующие изделия и в целом на изготовленное изделие.

Повышение качества технической эксплуатации изделия также зависит от многих факторов, основными из которых являются:

- качество эксплуатационной документации на изделие;
- соответствие и состояние эксплуатационного оборудования и приспособлений;
- наличие запасных частей и принадлежностей;
- квалификация эксплуатационников.

Отдельно рассматривается качество изделия после текущего и капитального ремонтов, на которое влияет ряд дополнительных факторов – соответствие производственных площадей, ремонтного оборудования и оснастки, квалификация ремонтников, их социальный аспект и др.

### **1.3. Оценки качества изделия**

Качество изделия оценивается определенными показателями. Гост 15467 так характеризует показатель качества изделия: показателем качества изделия называется количественное выражение одного или нескольких его (изделия)

свойств, применительно к определенным условиям его создания и эксплуатации.

Показатели качества подразделяются на единичные и комплексные (групповые).

Единичные показатели относятся только к одному из свойств изделия. Например, для двигателя внутреннего сгорания его назначение (функционирование) характеризуется следующими единичными показателями:

- мощность двигателя;
- частота вращения коленчатого вала;
- удельный расход топлива на единицу мощности;
- моторесурс;
- удельная материалоемкость и др.

Единичные показатели широко используются в работе конструкторов и технологов при создании и освоении новых и модернизации освоенных изделий, при техническом контроле их производства и во многих других целях.

Комплексные показатели качества изделия служат для оценки качества только по нескольким важнейшим свойствам изделия. Например, надежность изделия, эргономическая характеристика изделия и т.д. Каждое из этих свойств определяется совокупностью нескольких показателей. Так, надежность изделия характеризуется комплексными показателями безотказности, долговечности, ремонтпригодности и сохраняемости, которые, в свою очередь, оцениваются несколькими единичными показателями.

Обобщая вышесказанное, применительно к новым или отремонтированным машинам их качество изготовления или ремонта, а также качество технической эксплуатации можно оценить совокупностью количественных показателей, характеризующих работоспособность и надежность машины.

На рис. 1.2 дана схема оценочных показателей качества транспортных и транспортно - технологических машин и технических средств.

Качество выпускаемых изделий, а также качество их эксплуатации и ремонта зависит от многих факторов, но главенствующими из них являются:

- качество документации на изготовление, эксплуатацию или ремонт изделия;
- качество оборудования, приспособлений, инструмента, измерительных средств;
- качество сырья, материалов, комплектующих изделий, запасных частей;
- качество труда исполнителей.

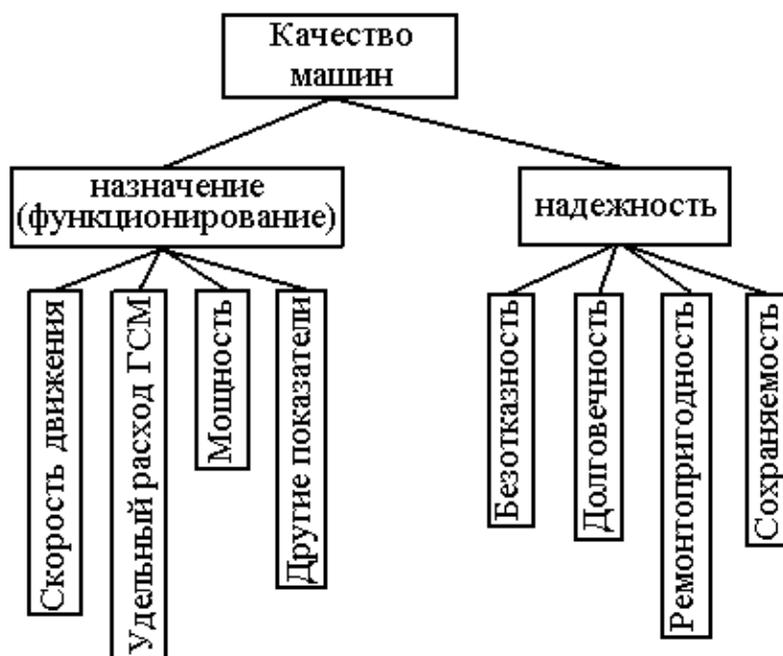


Рис. 1.2. Оценочные показатели качества транспортных и транспортно - технологических машин и технических средств

Качество документации характеризует не только ошибки в чертежах, но и уровень стандартизации и унификации конструкции изделия, обоснованный выбор структуры технологического процесса, степени автоматизации оборудования, оптимальных режимов обработки.

Качество оборудования включает оценку их технических характеристик и технологических возможностей. Надежность сложного оборудования и приспособлений во многом определяют качество получаемой продукции. Своевременная аттестация измерительных средств и правильный их выбор также во многом определяют качество изготавливаемого изделия.

Качество конструкционных материалов, смазок, комплектующих изделий играет существенную роль в обеспечении качества продукции

Одним из определяющих факторов, обеспечивающий требуемый уровень качества изделия, является качество труда исполнителей. Их квалификация, добросовестное отношение к выполняемой работе, жесткий пооперационный и другие виды контроля являются залогом изготовления изделия с заданными характеристиками качества. Надежность изделия как один из основных показателей его качества требует особого внимания на всех стадиях проектирования, изготовления и эксплуатации изделия.

С этой целью разрабатываются программы обеспечения надежности изделия, имеющие особо важное значение при создании опытных образцов и запуске серии. Содержание мероприятий, входящих в программу обеспечения надежности, зависит от типа изделия, требований к нему, организации его изготовления и т.д. Однако структура программы, как правило, имеет общее построение и содержит типовые разделы:

- требования по надежности, в которых устанавливаются перечень и конкретные значения показателей надежности;
- информация о надежности от различных источников;
- анализ надежности для оценки слабых мест конструкции и технологического процесса;
- методы испытания, обеспечивающие с определенной достоверностью получаемые показатели надежности;
- анализ методов эксплуатации изделия, включая этапы транспортировки, хранения, технического обслуживания и ремонта.

Разработка программы по обеспечению надежности изделия должна производиться с учетом стандартов и нормативных документов.

#### **1.4. Система управления качеством продукции.**

Эта система представляет собой совокупность управленческих органов и объектов управления, мероприятий, методов и средств, направленных на установление, обеспечение и поддержание высокого уровня качества продукции.

Система управления качеством продукции включает следующие функции:

- стратегического, тактического управления;

- принятия решений, управляющих воздействий, анализа и учета, формационно-контрольные;
- специализированные и общие функции для всех стадий жизненного цикла продукции;
- управление по научно-техническим, производственным, экономическим и социальным факторам и условиям.

***Функции стратегического управления включают:***

- прогнозирование и анализ базовых показателей качества;
- определение направлений проектных и конструкторских работ;
- анализ достигнутых результатов качества производства;
- анализ информации о рекламациях;
- анализ информации о потребительском спросе.

***Функции тактического управления включают:***

- управление сферой производства;
- поддержание на уровне заданных показателей качества;
- взаимодействие с управляемыми объектами и внешней средой.

В 1987 г. Техническим комитетом Международной организации по стандартизации при участии США, Канады, ФРГ были разработаны и утверждены пять международных стандартов серии 9000 (по системам качества), в которых были установлены требования к системам обеспечения качества продукции, в том числе к разработке продукции, изготовлению, к организации контроля и испытаний продукции, к ее эксплуатации, хранению и транспортированию.

Международные стандарты ИСО 9000 по системам качества включают пять наименований.

1. ИСО 9000 «Общее руководство качеством и стандарты по обеспечению качества. Руководящие указания по выбору и применению».
2. ИСО 9001 «Система качества. Модель для обеспечения качества при проектировании и (или) разработке, производстве, монтаже и обслуживании».
3. ИСО 9002 «Система качества. Модель для обеспечения качества при производстве и монтаже».

4. ИСО 9003 «Система качества. Модель для обеспечения качества при окончательном контроле и испытаниях».

5. ИСО 9004 «Общее руководство качеством и элементы системы качества. Руководящие указания».

Система управления качеством продукции должна удовлетворять требованиям к системам:

- контроля и испытаний продукции, сертификации надежности;
- организации производства;
- управления качеством от проектирования до эксплуатации.

Система управления качеством включает:

- 1) разработку и соблюдение политики в области качества;
- 2) разработку и ведение документации и планирования;
- 3) документирование требований по качеству и контроль их выполняемости;
- 4) контроль качества во время разработки (планирование, компетентность, документация, проверка, результат, изменения);
- 5) контроль и документирование качества закупок;
- 6) обозначение качества изделий и возможность их контроля;
- 7) проведение мероприятий по соблюдению требований качества во время производства (планирование, инструкции, квалификация, контроль);
- 8) мероприятия по проверке качества (входные проверки, межоперационный контроль, окончательный контроль, документация испытаний);
- 9) контроль за испытательными средствами;
- 10) организацию и проведение корректирующих мероприятий;
- 11) проведение мероприятий по соблюдению требований качества при хранении, перемещении, упаковке, отправке;
- 12) внутрифирменный контроль над системой поддержания качества;
- 13) обучение персонала;
- 14) применение статистических методов;
- 15) анализ качества и систем принимаемых мер.

*Контролируемые показатели качества* устанавливаются в зависимости от специфики продукции, например система показателей качества может кон-

тролировать следующие показатели:

- качество машин - технические (мощность, точность, удельный расход ресурсов, надежность и др.);

- качество труда - причины образования брака;

- качество продукции - производственные, потребительские, экономические;

- качество технологии - число нарушений.

*Политика в области качества* может быть сформулирована в виде направления деятельности или долгосрочной цели и может предусматривать:

- улучшение экономического положения предприятия;

- расширение или завоевание новых рынков сбыта;

- достижение технического уровня продукции, превышающего уровень ведущих фирм;

- ориентацию на удовлетворение требований потребителей определенных отраслей или определенных регионов;

- освоение изделий, функциональные возможности которых реализуются на новых принципах;

- улучшение важнейших показателей качества продукции;

- снижение уровня дефектности изготавливаемой продукции;

- увеличение сроков гарантии на продукцию;

- развитие сервиса.

В соответствии со стандартом ИСО *жизненный цикл* продукции включает 11 этапов:

- 1) маркетинг, поиск и изучение рынка;

- 2) проектирование и разработку технических требований, разработку продукции;

- 3) материально-техническое снабжение;

- 4) подготовку и разработку производственных процессов;

- 5) производство;

- 6) контроль, проведение испытаний и обследований;

- 7) упаковку и хранение;

- 8) реализацию и распределение продукции;
- 9) монтаж и эксплуатацию;
- 10) техническую помощь и обслуживание;
- 11) утилизацию после испытания.

Принятие решений по управлению качеством основывается на данных проведенных предварительно мероприятий контроля, учета, анализа.

Наилучших результатов в создании и выпуске конкурентоспособной продукции добиваются предприятия, обладающие исчерпывающими сведениями о состоянии производственных процессов, а также своевременно вырабатывающие меры по их совершенствованию.

По мнению отечественных и зарубежных специалистов, качество продукции закладывается в конструкторской и технологической документации, поэтому и та и другая должны соответствующим образом оцениваться.

Начинать нужно с освоения производства товара, пользующегося спросом, т. е. производить то, что кто-то купит, а если улучшать этот товар, то число его покупателей будет расти, улучшатся экономические показатели предприятия и можно будет найти средства для реализации следующих этапов решения проблем качества.

Однако товар, пользующийся спросом - это чаще всего новая продукция. Следовательно, начинать надо с изучения спроса на рынке и его учета при создании и освоении производства новых изделий.

Необходимо иметь дилерскую, торговую сеть продаж, а также систему распространения товара и информации о нем. Нет этого - никакое, даже самое высокое качество продукции не спасет предприятие. Так, например, производственно-художественное объединение «Хохломская роспись» (г. Семенов Нижегородской области) выпускает продукцию высочайшего качества, но не имея хорошей дилерской сети, особенно за рубежом, вынуждено продавать продукцию по ценам в 5...10 раз ниже, чем ее оценивают зарубежные эксперты. В результате предприятие терпит большие убытки и испытывает финансовые трудности.

Нужно минимизировать издержки производства. С этой целью необходимо все пересчитать, переосмыслить материально-техническую базу предприятия, отказаться от всего лишнего, провести реструктуризацию. Не сделав этого, начинать борьбу за качество не стоит, так как предприятие может «умереть от другой болезни». Примеров, подтверждающих это, много - почти каждое российское предприятие имеет огромные издержки. Они настолько велики, что предприятия вынуждены искажать отчетность. В результате почти невозможно правильно составить калькуляцию затрат на качество и, следовательно, управлять экономикой качества. Надо научиться управлять финансами, а это - искусство, причем непростое. Прежде всего, необходимо наладить контроль за финансами.

Бесконтрольность - путь к потерям финансов, их расхищению и банкротству предприятия. Главный фактор, способствующий этому, - отсутствие у больших промышленных предприятий их реальных собственников. На таких предприятиях собственностью практически распоряжаются высшие менеджеры, и потому многое зависит от их порядочности и честности. Тем не менее, дальновидные менеджеры заинтересованы в налаживании финансового контроля и работают в этом направлении.

Все четыре обязательных условия успешной деятельности предприятий, приведенные выше, рассматриваются в различных концепциях качества, но там речь идет об их улучшении. На большинстве же российских предприятий эти условия нужно создавать практически с нуля. И только когда предприятие как-то справится с этой задачей, оно может приступать к решению проблемы качества путем создания и сертификации систем качества, отвечающих требованиям стандартов ИСО 9000.

### **1.5. Контроль качества**

Контроль качества, независимо от совершенства применяемых для этого методик, предполагает прежде всего отделение хороших изделий от плохих. Естественно, что качество изделия не повышается за счет выбраковки некачественных изделий. Современные фирмы сосредоточивают внимание не на выявлении

брака, а на его предупреждении, на тщательном контролировании производственного процесса, и осуществляют свою деятельность в соответствии с концепцией «регулирование качества». Большую роль в обеспечении качества продукции играют статистические методы.

Целью методов статистического контроля является исключение случайных изменений качества продукции. Такие изменения вызываются конкретными причинами, которые нужно установить и устранить.

Статистические методы контроля качества основаны на применении:

- статистического приемочного контроля по альтернативному признаку;
- выборочного приемочного контроля по варьирующим характеристикам качества;
- стандартов статистического приемочного контроля;
- системы экономических планов;
- планов непрерывного выборочного контроля;
- методов статистического регулирования технологических процессов.

Каждая из разновидностей статистических методов контроля качества имеет свои преимущества и недостатки. Например, выборочный приемочный контроль по варьирующим характеристикам имеет то преимущество, что требует меньшего объема выборки. Недостаток этого метода заключается в том, что для каждой контролируемой характеристики нужен отдельный план контроля. Если каждое изделие проверяется по пяти характеристикам качества, необходимо иметь пять отдельных планов проверок.

Как правило, планы выборочного приемочного контроля проектируют таким образом, чтобы максимально уменьшить вероятность ошибочного бракования годной продукции, т. е. уменьшить «риск производителя». Большинство планов выборочного контроля проектируется так, чтобы значение «риска производителя» составляло  $\alpha = 0,05$ .

Если при установленном плане выборочного контроля уровень приемлемого качества соответствует предполагаемой доле брака  $p$  в генеральной совокупно-

сти, то считают, что вероятность забраковать годную продукцию мало отличается от 0,05. Поэтому уровень приемлемого качества и значение  $\alpha$  соответствуют способу плана выборочного контроля. Важно также, чтобы план приемочно - выборочного контроля составлялся с таким расчетом, чтобы вероятность приемки продукции низкого качества была мала, т. е. был мал «риск потребителя». Граница между хорошей и плохой продукцией называется *допустимой долей брака в партии*.

Система управления качеством продукции на ремонтных предприятиях предусматривает совокупность мероприятий, методов и средств, направленных на установление, обеспечение и поддержание необходимого качества ремонта изделий. Комплексная система управления качеством должна обеспечивать эффективное использование передовых форм и методов организации ремонтного производства и его элементов, а также способствовать совершенствованию организационной структуры управления.

При разработке системы управления качеством ремонта изделий проводят объективисте оценку состояния ремонтного фонда;

- проектируют, внедряют и осваивают передовые технологии;
- поддерживают стабильное качество; обеспечивают трудовую и технологическую дисциплину;
- повышают эффективность за счет сокращения потерь от брака и устранения рекламаций;
- организуют и совершенствуют сбор, анализ и использование информации о качестве ремонта изделий;
- повышают квалификацию и организуют обучение персонала прогрессивным формам и методам ремонта;
- совершенствуют формы и методы материального и морального стимулирования труда;
- усиливают ответственность за изготовление и выпуск недоброкачественной ремонтной продукции, управляют качеством ремонта (эту часть управле-

ния производством осуществляют органы управления ремонтного предприятия).

На предприятии система управления качеством включает организационное, техническое, технологическое, экономическое, информационное и социальное управления, критериями которых являются:

*организационное управление* - включает определение площади предприятия, специализации производства, уровня механизации, порядка использования производственных мощностей и интенсивности загрузки оборудования;

*техническое управление* определяет структуры основных производственных фондов, техническую вооруженность труда, фондоемкости технологических процессов, прогрессивность и сроки службы оборудования, уровни автоматизации и роботизации производства, степени физического и морального износа оборудования, порядок обновления оборудования;

*технологическое управление* - подразумевает определение оснащенности оборудованием, прогрессивными технологиями и оснасткой, размера производственной площади;

*экономическое управление* - определяет производительность труда, фондоотдачу и рентабельность предприятия, себестоимость ремонта единицы продукции, эффективное использование площадей.

*Информационное и социальное управления* подразумевают обучение и повышение квалификации персонала и стимулирование его на повышение качества оказываемых услуг и продукции.

Приведенные критерии могут быть уточнены экспертами. Для организационно-технической оценки предприятия наиболее целесообразно иметь 20...25 критериев.

*Цель технического контроля* - проведение ремонта машин в соответствии с установленными техническими условиями, предупреждение брака, недопущение выпуска недоброкачественной продукции. Качество ремонта машин определяется техническими условиями, любое отклонение от которых приводит к производственному браку. В зависимости от степени отклонения от установ-

ленных требований и технических условий производственный брак подразделяют на окончательный, исправимый, условный.

*Окончательный брак* имеет место при значительных отклонениях от технических условий, когда изделие не поддается исправлению, например трещина в кольцах подшипников качения, возникающая в результате неправильного монтажа.

*Исправимый брак* возможен при таких отклонениях от технических условий, при которых изделие может быть исправлено, например шлифовка шеек коленчатых валов под следующий ремонтный размер.

*Условный брак* - это брак, вызванный незначительными отклонениями от технических условий. При этом изделие может находиться в работе с некоторым снижением его технического ресурса.

Примером такого брака может быть применение несоответствующих красок. Производственный брак приводит к убыткам и дезорганизации производства. Убытки от окончательного брака определяются стоимостью изделия, от исправимого брака - стоимостью дополнительных операций и сокращением технического ресурса изделия.

Причины, вызывающие брак, разделяют на - прямые и косвенные. Прямыми причинами могут быть ошибки в чертежах, применение несоответствующего материала, плохая вентиляция и т. п. Для предупреждения и выявления брака осуществляют технический контроль за поступающими на предприятие запасными частями, материалами, состоянием технического оборудования, приспособлений, режущего и измерительного инструментов, выполнением отдельными рабочими требований технологического процесса, выявлением и предупреждением брака, выяснением причин его возникновения.

В зависимости от производственных взаимоотношений между контролером и начальником производственного участка различают три системы технического контроля: - зависимую; - полузависимую; - независимую.

При *зависимой системе контроля* контролеры подчиняются непосредственно начальнику производственного участка, отделения. Такую систему практикуют

на ремонтных заводах. Но она не позволяет достаточно объективно контролировать выпускаемую продукцию, поэтому используют как цеховой, так и внутренний контроль.

*Полузависимая система контроля* предусматривает подчинение контролера непосредственно руководителю предприятия. Назначает и освобождает контролера от работы вышестоящая организация. Например, инженер по техническому контролю подчиняется управляющему районным объединением, а назначает его областное производственное объединение.

При *независимой системе контроля* контролер подчинен вышестоящей организации, а не руководству ремонтным предприятием. Такая система контроля наиболее объективна. В условиях ремонтного производства могут применять технические инспекции, периодически направляемые на ремонтные предприятия вышестоящими организациями. Виды контроля устанавливают в зависимости от организации работы на предприятии и требований к качеству продукции.

По охвату операций различают контроль пооперационный (изделия проверяют после каждой операции), групповой (изделия проверяют после нескольких операций), окончательный (все изделия проверяют на соответствие их требованиям, стандарту или техническим условиям).

По охвату проверяемых изделий различают контроль выборочный и сплошной. При *выборочном контроле* проверяют отдельные изделия и партии; осуществляют его на ремонтных предприятиях при приемке запасных частей и материалов на склад, получении отремонтированных по кооперации агрегатов.

При *сплошном контроле* проверяют все без исключения детали или агрегаты; осуществляют его при дефектации деталей, испытании ответственных агрегатов, таких, как двигатель, топливный насос и т. п.

Различают также периодический, летучий и целевой контроль.

*Периодический контроль* проводят через определенный промежуток времени для различных операций технологического процесса ремонта: разборки, мойки и т. д.; *летучий* - выборочно, как по отдельным операциям, так и по отдельным деталям и агрегатам, по усмотрению инженера по техническому кон-

тролю; *целевой* – как правило, для выявления причин значительного брака, обнаруженного на отдельных участках.

На ремонтных предприятиях применяют следующие методы контроля качества изделий: внешний осмотр, проверка геометрических параметров, проверка отдельных свойств, испытания.

*Внешним осмотром* устанавливают комплектность агрегатов, машин, видимые невооруженным глазом трещины или изломы, срывы резьбы. К этому же методу относят проверку на ощупь, на слух, с помощью ударов молотка.

Для *проверки геометрических параметров* контролируют линейные и угловые размеры, отклонения формы, расположение поверхностей, используя измерительные инструменты и приборы.

При *проверке отдельных свойств* определяют твердость, упругость, герметичность и т. д.

*Испытанию* подвергают ответственные детали и агрегаты (головки цилиндров, блоки, топливные насосы, двигатели и др.).

Поступающие на ремонтные предприятия запасные части контролируют, устанавливая их соответствие техническим условиям. При приемке проверяют основные свойства получаемых материалов, например у металлов - химические и механические свойства, твердость. Машины и агрегаты, поступающие в ремонт, осматривают для установления их комплектности.

Окончательно состояние машины определяют после разборки и выявления дефектов. Для выяснения пригодности деталей к дальнейшему использованию или восстановлению проводят их дефектацию с помощью универсальных средств измерения и калибров.

### Контрольные вопросы

1. Дайте определение понятию – качество продукции.
2. Перечислите виды качества.
3. Что входит в технические показатели качества с/х машин?
4. Что входит в технологические показатели качества с/х машин?
5. Что подразумевается под инженерными факторами качества машин?
6. От чего зависит повышение качества технической эксплуатации машины?
7. Приведите оценочные показатели качества с/х машин.
8. Перечислите основные этапы жизненного цикла изделия.
9. Что входит в понятие статистического контроля?
10. Перечислите виды брака.
11. Назовите виды контроля при производстве изделия.

## **Глава 2. Состояние технических средств и транспортно-технологических машин при эксплуатации**

### **2.1. Понятия и определения**

ГОСТом 27.002-2015 установлены основные понятия и определения теории надежности. В формулировке определения надежности используется термин "объект". Под этим термином в теории надежности подразумевают изделия определенного назначения, рассматриваемый в период его проектирования, производства, испытаний на надежность и эксплуатации. Изделие подразделяется на составные части – агрегаты, сборочные единицы (узлы), детали, а также на технические системы и их элементы. Техническая система, например, трактор – совокупность совместно действующих элементов (двигатель, трансмиссия, ходовая часть и т.д.), предназначенная для самостоятельного выполнения заданных функций. Но понятие система и ее элемент при определении их надежности необходимо рассматривать в каждом конкретном случае. Например, двигатель с точки зрения надежности можно рассматривать как систему, состоящую из отдельных элементов (группа деталей газораспределения, поршневая группа, топливная группа и др.), но двигатель в составе машины рассматривается уже как элемент.

Выпускаемые промышленностью транспортные и технологические машины (объекты) в процессе эксплуатации могут находиться в одном из следующих состояний: - исправном; - неисправным; - работоспособным; - предельным.

*Исправное состояние объекта.* Такое состояние объекта, при котором он соответствует всем требованиям нормативно-технической и конструкторской документации (НТ и КД). Другими словами, детали этого объекта изготовлены из тех материалов, которые были заложены в конструкции конструктором, объект покрашен той краской, которая указана в технической документации, оборудован соответствующим типом и маркой гидроцилиндров и т.д. В таком состоянии объект может выполнять заданные функции с характеристиками, установленными техническими требованиями.

*Неисправное состояние объекта.* Такое состояние объекта, при котором он:

- не соответствует хотя бы одному из требований нормативно-технической и конструкторской документации. Другими словами, например, ряд деталей изготовлены из других марок сталей вместо указанных на чертеже, объект покрашен в другой цвет или другой краской, используется другой марки аккумулятор и т.д. Такое состояние объекта не приводит к отказам и объект считается работоспособным.

- считается неисправным, если есть неисправности, ведущие к возникновению отказов (трещины в металлоконструкции рамы, нарушение элементов электропривода и т.д.).

В неисправное состояние объект может перейти и при его несущественном повреждении.

*Повреждение* – это событие, заключающееся в нарушении исправности объекта или его составных частей вследствие влияния внешних воздействий. Повреждение может быть несущественным, при котором работоспособность объекта сохраняется, и существенным, которое может явиться причиной нарушения работоспособности объекта. Например, несущественные повреждения как помятое крыло автомобиля, разбитые стекла кабины комбайна, выкрашивание 1-го режущего зуба жатки и т.п. не повлияют на работоспособность машины, т.е. выполнять ею все заданные функции с характеристиками, установленными техническими требованиями.

Незначительными являются повреждения, при котором нарушение исправности не повлекло потери работоспособности машины. Некоторые незначительные повреждения могут переходить в категорию значительных и тем самым приводить к отказу объектов. Наиболее общей причиной незначительных повреждений является изменение параметров и характеристик элементов во времени, обусловленное происходящими в них физико-химическими процессами.

*Работоспособное состояние* – состояние объекта, при котором он способен выполнять заданные функции, сохраняя значения основных заданных параметров в пределах, установленных НТ и КД. Основные параметры характеризуют

функционирование объекта при выполнении поставленных задач и устанавливаются нормативно-технической документацией (производительность, мощность, тягово-скоростные характеристики, параметры рабочего процесса и другие).

В процессе эксплуатации вследствие ряда неизбежных причин (износ, усталостные разрушения деталей и сопряжений), а также в связи с нарушением правил эксплуатации и по другим причинам, работоспособность машины периодически нарушается из-за возникновения *отказа*.

Отказ – это *событие, заключающееся в нарушении работоспособного состояния машины*.

Из работоспособного состояния машина переходит в *неработоспособное состояние*. Таким образом, техническое состояние любой машины характеризуется как:



Эксплуатация сельскохозяйственных транспортных и технологических машин не ограничивается первой потерей работоспособности. В течение их срока службы работоспособность машин неоднократно восстанавливается путем устранения отказов или проведения ремонтов.

Работоспособность в общем случае может быть полным или частичным. Полностью работоспособный объект обеспечивает в определенных условиях максимальную эффективность его применения. При этом он может не удовлетворять, например, эстетическим требованиям, если ухудшение внешнего вида объекта не препятствует его нормальному (эффективному) функционированию. Очевидно, что работоспособный объект может быть неисправным, однако отклонения от требований НТД при этом не настолько существенны, чтобы нарушалось нормальное функционирование.

*Предельное состояние объекта* - такое состояние объекта когда:

а) дальнейшая эксплуатация объекта недопустима из-за *неустранимого* несоблюдения заданных технических и технологических параметров (характери-

стик) установленными нормативами;

б) неустранимого нарушения требований безопасности;

в) использование его нецелесообразно по каким-то причинам;

г) восстановление работоспособности объекта невозможно или нецелесообразно по экономическим и другим причинам.

Если говорить о транспортной или технологической машине и если при достижении предельного состояния машины необходима ее дальнейшая эксплуатация, то она направляется в ремонт. Если же восстановление ее работоспособности невозможно или нецелесообразно, то машина списывается.

Таким образом, техническое состояние транспортной и технологической машины с точки зрения надежности можно выразить следующей диаграммой (рис. 2.1):



Рис. 2.1 Диаграмма технического состояния машины

## 2.2. Критерии предельного состояния объекта

Все объекты подразделяются на:

- восстанавливаемые или невосстанавливаемые и
- ремонтируемые и неремонтируемые.

*Восстанавливаемый объект* – объект, для которого в рассматриваемой ситуации проведение восстановления работоспособного состояния предусмотрено в нормативно-технической и конструкторской документации.

*Невосстанавливаемый объект* – объект, для которого в рассматриваемой ситуации проведение восстановления работоспособного состояния не предусмотрено в нормативно-технической и конструкторской документации.

Эти два определения не связаны с предельным состоянием объекта и их нельзя употреблять, когда речь идет о предельном состоянии объекта. Восстановление работоспособного состояния у *восстанавливаемого объекта* осуществляется за счет устранения отказов.

Но если восстановление объекта необходимо, несмотря на то, что объект по своему техническому состоянию и другим причинам полностью исчерпал свои возможности, он отправляется в ремонт и за счет ремонтных операций производится восстановление объекта в работоспособное состояние.

*Ремонтируемый объект* – объект, ремонт которого предусмотрен нормативно-технической документацией. Все транспортные и технологические машины - ремонтируемые объекты, но ряд элементов этих машин не ремонтируются. Это поршневые кольца, прокладки, манжеты, тормозные накладки, подшипники, лампочки и др.

*Неремонтируемый объект* – объект, ремонт которого не возможен или не предусмотрен нормативно-технической документацией. Чаще всего предельное состояние неремонтируемого объекта связано с нарушением жизнедеятельности человека (нарушение техники безопасности, экологии и т.д.) хотя работоспособность объекта может еще и сохраняться.

Предельное состояние транспортных и технологических машин и их элементов (агрегатов, узлов, деталей) устанавливаются по различным критериям, которые объединяют в три основные группы.

1. *Технические критерии предельного состояния.* К этой группе относятся все случаи, когда предельное состояние машины или ее отдельного агрегата или узла определяется невозможностью выполнения ими своих функций по:

а) техническим причинам: поломка отдельной детали, увеличенный зазор в сопряжении, например, шейка коленчатого вала – вкладыш шатуна и др.

б) из-за неустраняемого нарушения требований безопасности: износ тормозных накладок, более 80%-ый износ протектора шины и т.д.

Стандартом установлены единые технические критерии предельного состояния машин. Ими должны руководствоваться все организации, которые занима-

ются эксплуатацией и ремонтом машин.

Например, состояние трактора считают предельным, если необходим капитальный ремонт двигателя и одной или более составных частей трактора: рамы, или рулевого механизма, или гидросистемы.

2. *Технико-экономические критерии предельного состояния.* По технико-экономическим критериям определяют предельное состояние машины (агрегата, узла) в том случае, когда в результате *изменения их технического состояния изменяются и их определенные свойства*, которые приводят к неустраняемому снижению эффективности использования отдельного агрегата, узла или машины в целом. Например, с износом цилиндро-поршневой группы двигателя увеличивается удельный расход топлива. Если эта величина превышает установленные нормативные значения, то двигатель достиг предельного состояния.

Кроме технического состояния машины учитывают и экономическую эффективность ее эксплуатации. Если эксплуатация машины в связи с изменением ее технического состояния требует материальных (денежных и трудовых) затрат больше установленных нормативами, то дальнейшая ее эксплуатация нецелесообразна.

3. *Технологические критерии предельного состояния.* Технологические критерии предельного состояния машины оценивают рабочие характеристики самой машины или ее агрегатов. Они определяют такое предельное состояние машины или ее агрегатов, при котором резко снижается эффективность эксплуатации машины. Например, при достаточно изношенном двигателе грузового автомобиля на данном автомобиле нельзя перевозить установленное нормативами по массе грузы, перемещаться с установленной скоростью, создается повышенный шум, который раздражает водителя и снижает его внимание, необходимое для обеспечения безопасности движения. При изношенном двигателе запуск двигателя становится затруднительным даже при исправных системах зажигания и питания. Отработавшие газы, попадая в кабину, отравляют водителя и т.д.

### 2.3. Три группы элементов предельного состояния

Признаки (критерии) предельного состояния машины или ее агрегатов и узлов устанавливаются нормативно-технической документацией на данную машину. Для транспортных и технологических машин различают три группы элементов, отличающихся характеристиками предельных состояний:

- невосстанавливаемые элементы, (группа А):
- восстанавливаемые элементы и простые системы с конечным временем восстановления, (группа Б):
- сложные системы из элементов с конечным временем восстановления, (группа В).

К группе А относятся детали, которые не восстанавливаются после первого отказа из-за предельного состояния этих деталей: изношенные фрикционные накладки тормозов и муфт, поломанные пружины, подшипники качения с большими радиальными зазорами, изношенные или с поломанными отдельными зубьями зубчатые колеса, уплотнения, вкладыши подшипников скольжения и др. К группе А могут быть отнесены несложные узлы, которые нецелесообразно ремонтировать по каким-то причинам. Таким образом, предельное состояние элементов группы А наступает при однократном отказе машины, агрегата, узла из-за этих элементов.

Группа Б включает детали, узлы и агрегаты машины, которые *вызывают* за период эксплуатации машины *более одного отказа* из-за неработоспособности данных деталей, узлов или агрегатов. Работоспособность элементов данной группы до *их предельного состояния* поддерживается регулировкой, очисткой, заменой отдельных деталей и другими операциями. Примеры: произошел отказ гидравлической системы из-за разрегулирования перепускного клапана распределителя. Отказ устраняется регулировкой. Отказ в работе машины по причине попадания постороннего предмета в цепную передачу. Устранение отказа – очистка цепной передачи и т.д.

*Предельное состояние* элементов данной группы наступает при возникновении отказа, вызывающего необходимость ремонта данных элементов.

К объектам группы В относят машины в целом. Работоспособность объектов рассматриваемой группы до предельного состояния поддерживается в результате проведения технических обслуживаний (ТО) и текущих ремонтов (Р). Предельное состояние объектов группы В наступает при необходимости проведения капитального ремонта или списания.

#### **2.4. Оценка длительности эксплуатации объекта**

Для оценки длительности эксплуатации объекта или его элементов (агрегат, узел, деталь) введено три понятия: *наработка*, *ресурс* и *срок службы*.

1. *Нарработка* – это продолжительность работы или объем выполненной работы объектом, измеряемые в часах, моточасах, машино-часах, километрах пробега, кубических объемах земли, гектарах спланированной поверхности или в других единицах. Для транспортных и технологических машин наработка чаще всего выражается либо в моточасах (м. ч) или машино-часах (маш-ч).

Нарработка наиболее универсальная оценка длительности эксплуатации машины или ее элементов, так как она может оценивать длительность эксплуатации машины от начала эксплуатации до первого отказа, между отказами, длительность эксплуатации машины от начала эксплуатации до текущего ремонта или до капитального ремонта, либо от текущего до капитального ремонта.

2. *Ресурс* - суммарная наработка объекта от начала его эксплуатации или ее возобновления после ремонта до перехода в предельное состояние.

ГОСТ 27.002 устанавливает еще два значения ресурса:

- *назначенный ресурс* – суммарная наработка, при достижении которой эксплуатация объекта должна быть прекращена независимо от его технического состояния;

- *остаточный ресурс* – суммарная наработка объекта от момента контроля его технического состояния до перехода в предельное состояние.

3. *Срок службы* – календарная продолжительность эксплуатации объекта от начала его эксплуатации или ее возобновление после ремонта до перехода в предельное состояния. Срок службы выражается в часах, месяцах, годах.

Кроме понятия "срока службы", ГОСТ устанавливает еще одно значение срока службы: *назначенный срок службы*.

*Назначенный срок службы* – календарная продолжительность эксплуатации, при достижении которой эксплуатация объекта должна быть прекращена независимо от его технического состояния.

Назначенный срок службы эксплуатации объекта (машины, агрегата, узла, детали) и назначенный ресурс казалось бы одно и то же, так как они определяются одним и тем же состоянием эксплуатируемого объекта. Однако они существенно отличаются друг от друга. При одном и том же ресурсе может быть различный срок службы в зависимости от интенсивности эксплуатации объекта. Например, две сеялки с ресурсом 4,0 тысяч маш-ч каждая, но с интенсивностью эксплуатации 2,0 тыс. и 4,0 тыс. маш-ч в год, будут иметь соответственно срок службы у первой сеялки 2 года, а у второй – 1 год.

Наработку также нельзя смешивать со сроком службы, так как, например, два объекта за один и тот же срок службы могут иметь неодинаковую наработку.

Один часто простаивал по техническим и организационным причинам (частые перебазировки на другие участки и пр.) и имел малую наработку, а второй практически работал без остановок.

#### Контрольные вопросы

1. Перечислите виды состояния с/х машин в процессе эксплуатации.
2. Что подразумевается под понятием – неисправное состояние объекта?
3. Что такое «повреждение»?
4. Дайте определение отказу.
5. Что подразумевается под предельным состоянием объекта?
6. Что входит в понятие технического критерия предельного состояния машины?
7. Перечислите оценки длительности эксплуатации изделия.
8. Что подразумевается под ресурсом изделия и его виды?
9. В чем различие между понятием «ресурс» и «назначенный срок службы»?
10. Что такое ресурс?

## Глава 3. Основные понятия о трении сопрягаемых поверхностей деталей

### 3.1. Определение и понятия трения

Различают трение внешнее и внутреннее.

*Внешним трением* (трением) называют явление сопротивления относительно перемещению, возникающее между двумя сопрягаемыми поверхностями деталей в зонах их соприкосновения. При *внешнем трении* взаимодействие осуществляется в общем случае между различными по строению твердыми телами и имеет двойственную атомно-молекулярную и механическую природу. Здесь процессы реализуются в отдельных изолированных друг от друга зонах фактического контакта. Скорость скольжения в зонах фактического контакта изменяется скачком.

При внешнем трении скольжения взаимодействие твердых тел обусловлено процессами, происходящими в тонких (толщиной обычно менее 10 мкм, реже 20 мкм) поверхностных слоях. Оно может осуществляться при отсутствии смазочного материала (сухое трение), при граничной смазке, с упругогидродинамической или с гидродинамической смазкой.

При внешнем трении всегда происходит деформирование тонких поверхностных слоев взаимодействующих тел, при котором сплошность их не нарушается, а деформированием материала нижележащих слоев можно пренебречь.

*Внутреннее трение* характеризуется процессами, происходящими в объеме одного объекта (твердого тела, жидкости или газа). Процессы осуществляются в поверхностных слоях выделенного слоя. Скорость, с которой слои вещества движутся относительно друг друга, изменяется непрерывно и достаточно плавно.

По движению сопрягаемых поверхностей относительно друг друга трение характеризуют как: - трение покоя и трение движения;

- трение скольжения и трение качения;

- трение без смазочного материала и трение со смазочным материалом.

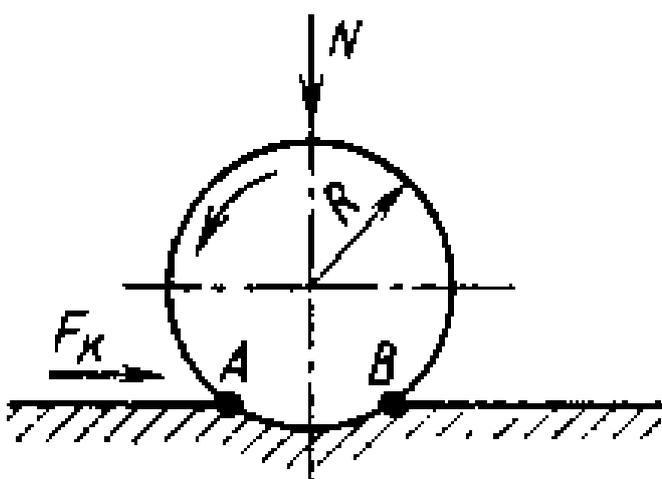
*Трение покоя* - трение двух тел при микросмещениях до перехода к движению сопряженных поверхностей относительно друг к другу.

*Трение движения* - трение двух тел, находящихся в движении сопряженных поверхностей относительно друг к другу.

*Трение скольжения* - трение движения, при котором скорости сопрягаемых поверхностей в точке касания различны по величине и направлению или только по величине или только по направлению. Этот вид трения характерен для опор скольжения и направляющих.

*Трение качения* - трение движения сопрягаемых поверхностей, при котором их скорости в точках касания одинаковы по величине и направлению.

Физическая сущность трения качения заключается в следующем. При взаимодействии цилиндра с плоскостью (рис. 3.1) материал цилиндра на участке  $A...B$  сжимается, а материал плоскости в этой же области растягивается.



Таким образом, при качении цилиндра, т. е. при последовательном нарушении контакта, точки поверхности цилиндра на участке  $A...B$  будут стремиться сблизиться, а соответствующие точки плоскости - удалиться одна от другой. Это приведет к относительному скольжению цилиндра

Рис. 3.1. Схема контакта поверхностей деталей при трении качения.

и плоскости. Такой характер взаимодействия и соответственно вид трения наблюдается в шариковых и роликовых подшипниках качения, в сопряжениях ролик - направляющие.

Сила трения качения  $F = f_k N / R$  зависит от коэффициента трения качения  $f_k$ , радиуса  $R$  цилиндра и нормальной составляющей внешних сил  $N$ .

Коэффициент трения качения имеет линейную размерность и представляет собой полухорду зоны сжатия  $A...B$  материала. Значение коэффициента трения

качения зависит от упругих свойств материалов деталей сопряжения.

В узлах трения сборочных единиц часто возникает одновременно трение качения и трение скольжения. Это особенно характерно для элементов зубчатых передач. Перечисленные виды трения наблюдаются при взаимодействии твердых тел. Между тем сопротивление относительно перемещению возникает и при взаимодействии твердых тел с жидкостью или газом.

В технических системах такие виды трения встречаются в подшипниках, в элементах гидравлического или пневматического привода машины. В таких случаях характер трения определяется микрогеометрией твердой поверхности, параметрами потока (скорость, расход жидкости или газа), а также свойствами рабочей среды (вязкость, плотность, температура). Существуют и другие виды трения, классификация которых представлена на рис. 3.2.

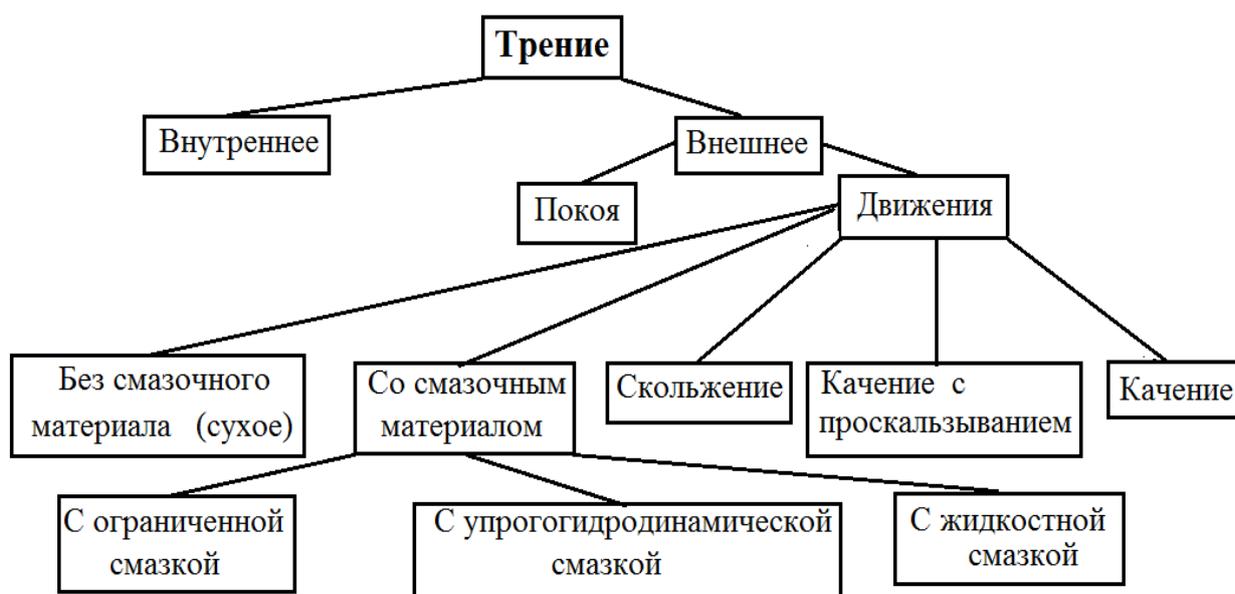
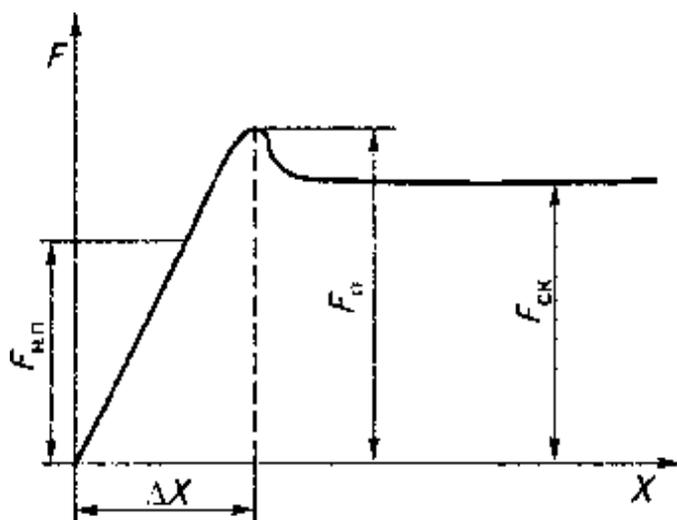


Рис. 3.2. Классификация видов трения

Количественной мерой внешнего трения служит *сила внешнего трения*  $P$  - сила сопротивления относительно скольжению, лежащая в плоскости касания двух твердых тел и являющаяся равнодействующей элементарных сил трения, возникающих в зонах контактов отдельных микронеровностей.

Очень часто силу трения путают с внешней силой, приложенной к контактирующим твердым телам и вызывающей их скольжение. Эта сила равна силе трения, но противоположна ей по направлению и называется *силой тяги*  $T$ .

Сила трения - сила непостоянная. Различают силу трения покоя, неполную силу трения покоя и силу трения скольжения. Рассмотрим взаимодействие твердых тел при сдвиге. Экспериментально установлено, что при сдвиге сила трения возрастает при увеличении смещения одного твердого тела относительно другого до некоторого значения, затем остается неизменной и не зависящей от перемещения либо уменьшается до некоторого значения, также не зависящего



го от перемещения (рис. 3.3.).

Максимальная сила трения, соответствующая наибольшему предварительному смещению, называется *силой трения покоя*  $F_n$ .

Сила трения, меньшая силы трения покоя и зависящая от смещения  $\Delta X$ , называется *неполной силой трения покоя*.

Рис. 3.3 Изменение силы трения.

$F_{нп}$ . Сила трения, соответствующая непрерывному скольжению  $F$  от перемещения  $X$  между взаимодействующими твердыми телами и не зависящая от перемещения, называется *силой трения скольжения*  $F_{ск}$ .

*Перемещение  $\Delta X$  между твердыми телами, при котором происходит изменение силы трения, называется предварительным смещением.*

В 1699 г. Гильом Амонтон впервые сформулировал в математическом виде закон, позволяющий определять силу сопротивления перемещению  $F$  пропорционально силе нормальной нагрузки  $P$ , прижимающей одно тело к другому:

$$F = f \cdot P \quad (3.1)$$

где  $f$  -коэффициент пропорциональности, вызванный коэффициентом трения.

Это соотношение позволяет определить *коэффициент трения*  $f$

$$f = F / P \quad (3.2)$$

Закон Амонтона достаточно актуален и в наше время. Он стал основой при расчете и решении множества инженерных задач.

Для дальнейшего движения вперед были необходимы специальные опыты, позволяющие дать инженерам-практикам количественные оценки силы трения. Французский ученый и военный инженер Шарль Кулон, который по праву считается одним из основоположников науки о трении, решил проверить справедливость закона своего соотечественника Амонтона и в результате многочисленных опытов пришел к более общей зависимости, называемой теперь законом Амонтона-Кулона:

$$F = A + f \cdot P \quad (3.3)$$

где  $F$  – сила трения;  $A$  – константа, характеризующая сцепляемость тел;  
 $f$  – коэффициент трения;  $P$  – нагрузка.

Полностью подтвердив простое соотношение между силой трения и внешней силой, Кулон обнаружил способность тел к слипанию и созданию тем самым сопротивления проскальзыванию, не зависящего от нагрузки  $P$ .

Вторым важным выводом Кулона следует считать своего рода «понижение в должности» основного понятия - коэффициента трения. Вместо универсальной константы коэффициент трения превратился в результате тщательной проверки опытом всего лишь в трибологическую характеристику, зависящую от материалов пары трения, шероховатости поверхностей, влажности окружающей среды и даже времени предварительного контакта тел.

Дальнейшее развитие учения о трении стало возможным благодаря фундаментальным успехам в области учения о теплоте и физике поверхностных явлений. Согласно этим учениям были сформулированы ряд теорий трения.

### 3.2. Адгезионная теория трения

Согласно *адгезионной теории трения* касание трущихся поверхностей происходит не по номинальной, а по фактической площади контакта, которая обуславливается деформационными свойствами неровностей поверхности трения. В зоне фактического контакта наблюдается сильная адгезия, в результате чего образуются «мостики сварки». Сила, разрушающая эти адгезионные связи, и

является силой трения. Основная расчетная формула адгезионной теории трения следующая:

$$F = \frac{\tau P}{36\tau} \quad (3.4)$$

где  $\tau$  – касательные напряжения;  $\sigma_T$  – предел текучести.

Опыты английского ученого Д. Деагулье с «намертво» слипшимися образцами свинца были необычайно наглядны. Такая сила, соединяющая части тела, оказывается куда прочнее, чем их земное притяжение. Эта сила, какова бы ни была ее природа, называется *притяжением когезии*.

Оно велико, когда тела касаются друг друга, но очень быстро уменьшается, когда тела, находившиеся до этого в контакте, разъединяются. Даже самый малый промежуток между ними приводит к тому, что притяжение становится почти неощутимым. Позднее словом «когезия» стали обозначать только слипание одинаковых материалов, а для общей характеристики явления был введен термин «адгезия».

Адгезионная модель трения обрела физическую основу только в конце XIX в., когда Л. Бриллюэн, опираясь на совершенно новые представления о строении вещества, указал на возможность рассеяния энергии в теплоту при последовательном разрыве и образовании адгезионных связей. Иначе говоря, при скольжении происходит непрерывный обмен связей. Тепловыделение при подобном обмене неизбежно, так как силовые поля вокруг молекул по-разному реагируют на сжатие и растяжение в отличие, скажем, от обычных пружин. Трение согласно такой гипотезе есть результат интенсивного обмена адгезионных связей при скольжении одного тела по другому телу.

Адгезионная теория предполагала, что при удалении молекул происходит потеря энергии. Идеей рассеивания энергии заинтересовались и далее ее развили В.Д. Кузнецов и Б.В. Дерягин. Однако наиболее полно, с точки зрения энергетической, процесс трения был представлен Б.И. Костецким, который сформулировал основы *энергетической теории трения*, опирающиеся на постулаты первого закона термодинамики.

Согласно энергетической теории принято считать, что энергия, затрачиваемая на преодоление сил трения, идет на генерацию теплоты  $Q$  и запасается во вторичных структурах поверхностных слоев благодаря пластическому деформированию.

### 3.3. Молекулярная теория трения

*Молекулярная теория трения* основана на гипотезе о молекулярной природе трения. Наибольшее развитие эта теория получила в трудах Харди и Б. В. Дерягина. Эта теория исходит из допущения существования молекулярных сил взаимодействия между контактирующими микровыступами. Факт существования молекулярной адгезии согласно эмпирической формулы Кулона, полученной им в 1799 г.:

$$F = A + f \cdot N \quad (3.5)$$

где  $F$  – сила трения, Н;  $A$  – молекулярная составляющая силы трения, Н;

$f$  – коэффициент трения;  $N$  – нормальная нагрузка, Н.

Из этой формулы следует, что при  $\mu = 0$  поверхности трения все-таки взаимодействуют, так как сила трения при этом  $F > 0$  ( $F = A$ ).

В соответствии с молекулярной теорией трения и изнашивания на отдельных участках трущихся поверхностей молекулы настолько сближаются, что начинает проявляться взаимодействие молекулярных сил, аналогичное притяжению разноименных зарядов. Результат молекулярного взаимодействия между трущимися телами – износ чисто обработанных поверхностей.

Более полно физическую сущность явлений трения и изнашивания отражает молекулярно-механическая теория.

### 3.4. Молекулярно-механическая теория

*Молекулярно-механическая теория* исходит из предположения, что трение имеет двойственную природу и обусловлено как взаимным внедрением микровыступов трущихся поверхностей, так и силами молекулярного взаимодействия. Молекулярное взаимодействие поверхностей трения невозможно без их тесного сближения. При этом неизбежны внедрение и разрушение микровы-

ступов. Эта теория с учетом влияния на процесс изнашивания вида трения является общепризнанной.

Наибольшее распространение для объяснения силового взаимодействия твердых тел при трении получила молекулярно-механическая теория трения, разработанная российским ученым И. В. Крагельским.

Эта теория исходит из того, что поверхности твердых тел всегда имеют шероховатости (шероховатость, волнистость и микроотклонения формы). Под влиянием нормальной нагрузки первыми вступают в контакт те пары выступов, для которых сумма высот выступа первой поверхности и противолежащего ему выступа второй поверхности будет наибольшей. По мере увеличения нагрузки в контакт вступают все новые пары противостоящих выступов, обладающие меньшей суммой высот. Вступившие в контакт выступы деформируются вначале упруго, а затем, когда нагрузка превысит предел упругости, пластически.

Наиболее сильно деформируются пары выступов с максимальной высотой. Выступы, высота которых меньше средней, обычно не вступают в контакт даже при высоких нагрузках. Поэтому площадь касания мало зависит от номинальной площади сопрягаемых тел (площади, очерченной внешними размерами сопряженных поверхностей).

Фактическая площадь контакта (площадь, на которой контактируют микро-неровности) зависит от нагрузки, высоты шероховатостей, механических свойств и составляет не более 0,01...0,1 номинальной площади. Пятна фактического контакта, образованные вследствие деформации отдельных микровыступов, имеют диаметр 3...50 мкм. При перемещении одного тела относительно другого в местах контакта возникают элементарные силы сопряжения с двойственной молекулярно-механической природой.

Механическое взаимодействие характеризуется следующим. Выступы более твердой поверхности внедряются в выступы сопряженной поверхности из-за различных механических свойств, геометрических очертаний контактирующих участков, а так же неоднородности свойств на отдельных участках тел. При этом выступы более мягкой поверхности расплющиваются и изменяют

свою форму. В дальнейшем при относительном скольжении поверхностей трения внедрившиеся неровности деформируют (пластически оттесняют металл) менее жесткий поверхностный слой.

Сопротивление относительному перемещению, вызванное деформированием поверхностных слоев при скольжении, называют механической или деформационной составляющей силы трения.

Молекулярное взаимодействие характеризуется возникновением заметных межмолекулярных связей на участках поверхностей трения, находящихся на достаточно близком расстоянии ( $10^{-6}$  мм).

При скольжении одного тела относительно другого эти связи чисто механически нарушаются, вызывая повреждения наружных слоев поверхностей трения и частичный перенос материала с одной поверхности на другую.

Сопротивление относительному перемещению, вызванное нарушением межмолекулярных связей при скольжении, называют молекулярной составляющей силы трения. Таким образом, трение рассматривается как работа, затрачиваемая на формирование и разрушение механических и молекулярных связей, которые возникают при относительном перемещении поверхностей трения.

Явления, сопровождающие трение без смазочного материала при граничной смазке, существенно влияют на состояние соприкасающихся поверхностей трения. В частности, упругое и пластическое деформирование металла в зоне контактов вызывает его упрочнение (наклеп) и появление здесь остаточных напряжений сжатия, которые в конечном итоге приводят к усталостным разрушениям поверхностей трения. Деформация (особенно пластическая) способствует превращению работы трения в теплоту. Высокая температура нагрева поверхности трения в зоне контакта, а также высокие скорости нагрева и охлаждения создают условия для протекания новых, вторичных термических процессов в поверхностных микрообъемах. При этих условиях их протекание существенно отличается от условий обычной термической обработки (на несколько порядков превышают скорости нагревания и охлаждения, структурные и фазовые перемещения протекают одновременно с пластической деформаци-

ей). В результате этого на поверхностях трения возникают различные новые структурные составляющие. Неравномерный нагрев поверхностей трения (особенно по толщине) вызывает остаточные напряжения, которые способствуют протеканию усталостных процессов.

В тех случаях, когда металл нагревается на значительную глубину и температурный режим на поверхностях трения сохраняется примерно по-стоянным, повышается пластичность и понижается прочность металла детали, что снижает сопротивление изнашиванию.

Теплота, возникающая при трении в поверхностных слоях металлов, создает условия для активного взаимодействия поверхностей трения с окружающей средой и прежде всего с кислородом, углеродом, водородом и азотом воздуха.

Этому способствует пластическая деформация отдельных объемов металла поверхностей трения. В моменты сдвигов и смещений атомов плоскостей создаются благоприятные условия для диффузии атомов растворяющихся веществ, а также протекания других физико-химических процессов в поверхностных слоях трущихся деталей. Эти процессы протекают с большими скоростями и вызывают изменения химического состава и структурного состояния поверхностных слоев, а также влияют на фазовые превращения.

В свою очередь, фазовые и структурные превращения приводят к возникновению напряжений, разупрочняющих материал и разрушающих трущиеся поверхности. Разупрочнение материала также сопровождается образованием хрупких и непрочных продуктов взаимодействия с внешней средой, которые располагаются как по поверхности трения, так и по границе зерен.

Взаимодействие трущихся поверхностей значительно усложняется, если в смазочном слое присутствуют кислоты и другие химические соединения. При взаимодействии с металлами они образуют соединения с совершенно новыми физическими свойствами. Процесс разрушения трущихся поверхностей при этом ускоряется еще расклинивающим действием полярных молекул смазывающей жидкости. Последние, попадая в различные поверхностные микротрещины, создают давление до 100 МПа, расклинивают их и тем самым способствуют

разрастанию трещин или отрыву некоторого объема металла. При попадании на трущиеся поверхности воды и особенно почвенной влаги образуются окисные и другие пленки, приводящие к повышенному износу.

Процессы, ведущие к разупрочнению и разрушению поверхностей трения, значительно усиливаются, а процесс изнашивания начинает протекать интенсивнее при попадании в зону контакта твердых частиц (абразивных частиц или продуктов взноса). Перемещаясь между трущимися поверхностями, они вносят микростружки, пластически деформируют или оттесняют металл.

Деформацию и разрушение поверхностных слоев деталей вызывают также высокоскоростные потоки жидкости, локальные гидравлические удары и другие процессы, сопровождающие работу трущихся поверхностей.

Таким образом, при взаимодействии поверхностей трения протекают процессы, в конечном итоге разупрочняющие и разрушающие поверхности. Скорости протекания всех этих процессов различны и зависят от условий трения. Процессы, протекающие с наибольшей скоростью, оказываются доминирующими и частично оттесняют процессы, протекающие с наименьшей скоростью. В результате каждой паре трения при установившемся режиме ее работы сопутствует свой присущий ей процесс, который определяет характер и интенсивность изнашивания. При помощи молекулярно-механической модели можно качественно объяснить причины трения с физической точки зрения.

Согласно микроскопической модели трение включает процессы, которые можно разделить на две группы процессов: деформационные и адгезионные. Как правило, принадлежащие к этим двум группам процессы не являются независимыми друг от друга. Однако в некоторых условиях один процесс может преобладать над остальными, поэтому роль последних может быть относительно малой, и в первом приближении ими можно пренебречь.

Соппротивление движению произвольной микронеровности зависит от физико-химического состояния поверхностей трения, взаимодействующих тел и напряженного деформированного состояния в зоне контакта. При определении сил и коэффициентов внешнего трения рассматривают взаимодействие абсо-

лотно жесткого тела с шероховатой поверхностью с менее жестким твердым телом, обладающим гладкой поверхностью. Под нагрузкой происходит внедрение произвольной микронеровности  $h_1$ . Поверхности взаимодействующих твердых тел покрыты пленками, возникающими в результате физической адсорбции и хемосорбции. Поверхности сближаются на расстояния, при которых возможны в общем случае межмолекулярные, а на отдельных участках и межатомные взаимодействия. В результате этих взаимодействий в зонах фактического касания между частицами, составляющими поверхностные слои, возникают связи, кроме того, могут появляться и координационные связи.

При скольжении жесткая микронеровность будет деформировать материал поверхностных слоев менее жесткого тела. В результате будет возникать сопротивление этому деформированию. Межатомные и межмолекулярные взаимодействия, промежуточные взаимодействия, приводящие к образованию водородной и координационной связи, а также макроскопическое электрическое взаимодействие, обусловленное реологическими свойствами, вызывают появление сопротивления относительно скольжению.

Силу сопротивления, обусловленную этими взаимодействиями, называют *молекулярной составляющей силы трения*  $F_m$ .

Силу сопротивления, обусловленную деформированием материала поверхностного слоя более прочными микронеровностями, называют *деформационной составляющей силы трения*  $F_d$ .

Молекулярная и деформационная составляющие силы внешнего трения взаимосвязаны и оказывают взаимное влияние друг на друга.

### **3.5. Тепловые процессы при трении**

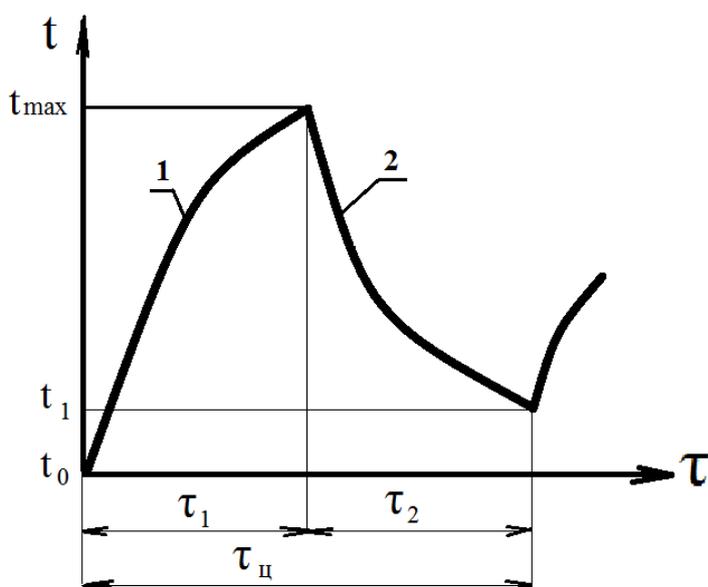
Взаимодействие рабочих поверхностей деталей при трении сопровождается интенсивным тепловыделением. Пластическая деформация и срез микронеровностей вызывают искажения кристаллической решетки материала детали, проявляющиеся в виде местного повышения температуры.

На микроплощадках фактического контакта в процессе трения возникают температурные вспышки, достигающие 1000 °С.

Вследствие теплопроводности материалов трущихся деталей тепло, выделившееся при трении, распределяется на несколько тепловых потоков, направляемых внутрь каждой из взаимодействующих деталей и в окружающую среду. Таким образом, трение рабочих поверхностей деталей сопряжения сопровождается процессами распространения тепла в материалах деталей и в окружающей среде (воздухе, смазочном материале, рабочей жидкости).

Условия теплообмена деталей трения с окружающей средой, теплофизические свойства материалов, параметры профилей рабочих поверхностей деталей и режим работы сопряжения в совокупности определяют среднюю температуру трущихся поверхностей, которая в значительной степени влияет на коэффициент трения, характер изнашивания деталей и долговечность сопряжения.

В результате анализа процессов теплообразования и теплообмена при трении определены количественные показатели для оценки режима работы сопряжения. Это особенно важно при планировании стендовых и лабораторных испытаний, при проведении ускоренных испытаний машин на долговечность, а также при обосновании областей и режимов рационального использования машин в эксплуатации.



На рис. 3.4 показана кривая изменения температуры трущихся поверхностей деталей в течение единичного рабочего цикла при присутствии теплоотдачи:

где  $\tau_{ц}$  — продолжительность работы сопряжения,

$\tau_2$  — продолжительность паузы.

Рис. 3.4 Изменение температуры трущихся поверхностей деталей при присутствии теплоотдачи.

На рис. 3.5 показана кривая изменения температуры трущихся поверхностей деталей при отсутствии теплоотдачи. Увеличение температуры рабочих поверхностей вызывает изменение механической и молекулярной составляющих сил трения. Механическая составляющая сил трения металлических поверхностей при повышении температуры изменяется в основном из-за уменьшения твердости материала.

При повышении температуры происходит снижение твердости трущихся поверхностей, причем у менее твердых материалов этот процесс протекает интенсивнее.

### 3.6. Влияние смазочного материала на процесс трения

Трение без смазочного материала (рис. 3.6 а) всегда сопровождается механическим повреждением трущихся поверхностей, упруго-пластическим деформированием, резким повышением температуры, возникновением шума и вибрации. Для этого вида трения характерно как механическое, так и молекулярное взаимодействие рабочих поверхностей. Имеющиеся на поверхности деталей неровности мешают контакту поверхности по всей номинальной площади, поэтому даже при малой нагрузке возникает большое давление, достигающее в отдельных точках  $10^8 \dots 10^9$  Па. Под влиянием этого давления выступы при относительном перемещении поверхностей деформируются, взаимно внедряются и разрушаются. Этот процесс сопровождается интенсивным тепловыделением.

Разрушение окисных пленок и сближение поверхностей при трении без смазочного материала обеспечивают благоприятные условия для молекулярного взаимодействия рабочих поверхностей деталей. Таким образом, при трении без смазочного материала силы сопротивления перемещению обусловлены меха-

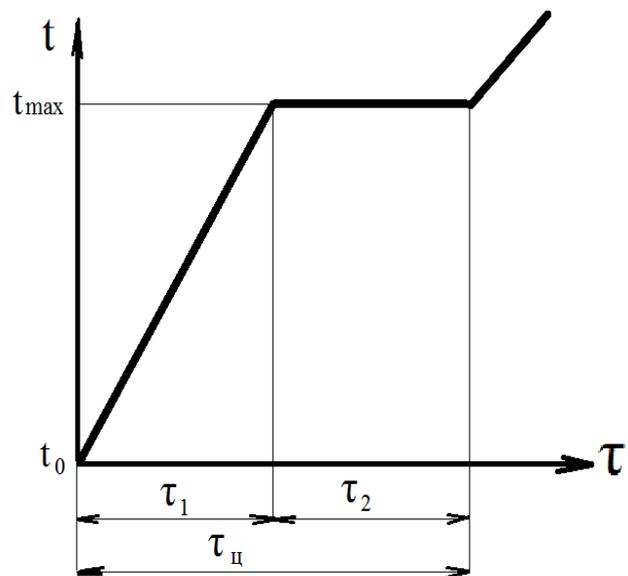


Рис. 3.5 Изменение температуры трущихся поверхностей деталей при

отсутствии теплоотдачи.

ническим зацеплением выступов неровностей и молекулярным взаимодействием материалов в зонах контакта поверхностей. В условиях трения без смазочного материала работают элементы тормозных устройств, сухих муфт сцепления, некоторые открытые шарнирные сочленения.

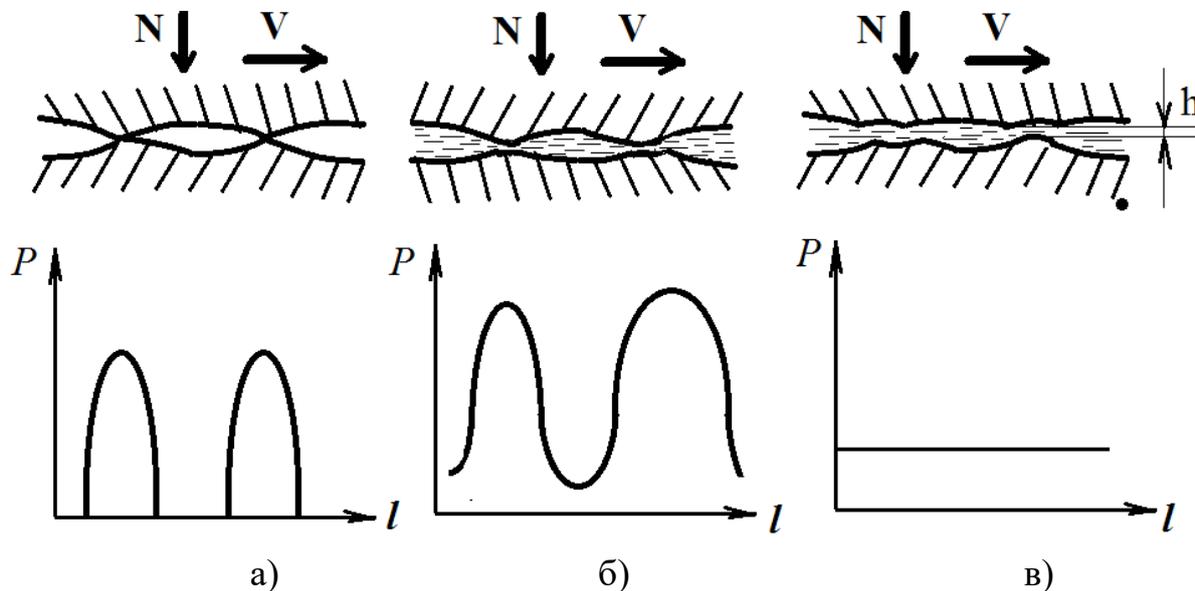


Рис. 3.6 Графики распределения давления по длине рабочей поверхности при трении

а) - без смазочного материала, б) - со смазочным материалом при  $h < 0,5$  мкм, в) - со смазочным материалом при  $h > 0,5$  мкм.

Трение со смазочным материалом (рис. 3.6, б, в) происходит при значительно более благоприятных условиях взаимодействия поверхностей и характеризуется уменьшением сил трения, более равномерным распределением давления по поверхности трения и меньшей интенсивностью тепловыделения.

Сопротивление относительно перемещению рабочих поверхностей в присутствии смазочного материала уменьшается вследствие образования граничных пленок смазочного материала и стимулирования образования окисных пленок. В свою очередь, окисные пленки обеспечивают уменьшение механического взаимодействия неровностей, полярной активности поверхностного слоя металла и вследствие этого уменьшение молекулярной составляющей силы трения. У обычных поверхностей трения толщина граничных пленок, образуемых окислами, а также химически и полярно активными компонентами сма-

зочного материала, значительно меньше высоты неровностей и составляет 0,1-0,5 мкм. Механическое взаимодействие поверхностей при этом полностью не исключается, а лишь снижается благодаря уменьшению давления в точках фактического контактирования. В результате деформация поверхности полностью не исключается, но проявляется в легкой форме в тонких поверхностных слоях металла, пластифицированного смазочным материалом. Взаимодействие смазочного материала с металлом приводит к изменениям физических свойств:

- масла - под действием силового поля металлической поверхности;
- поверхностных слоев материала детали - в результате химической активности масла.

Если смазочный материал подобран правильно, то в результате этих изменений обеспечиваются положительные механические свойства материала.

Смазочный материал не только уменьшает трение вследствие относительного скольжения слоев масла. Проникая в имеющиеся на поверхности деталей микропоры, смазочный материал снижает пластическую деформацию металла, способствует перераспределению температуры, давления и, таким образом, обеспечивает благоприятные условия работы сопряжения.

Однако в местах сближения микровыступов (см. рис. 3.6, б) сохраняются более нагруженные зоны. Поэтому при относительном перемещении поверхностей происходит колебание напряжений в каждом микровыступе, что в свою очередь создает условия для усталостного разрушения материала. Тонкая граничная пленка смазочного материала способна выдержать нормальное давление в несколько тысяч паскалей и защищает поверхность металла от повреждения. Кроме того, слой смазочного материала, разделяя трущиеся поверхности, значительно снижает силы молекулярного взаимодействия.

Однако при этом износ не исключается полностью, а лишь несколько снижается. В таких условиях работают элементы редукторов, опоры скольжения и шариковые подшипники.

С увеличением количества смазочного материала в зоне трения создаются условия, при которых трущиеся поверхности полностью разделены слоем масла

(рис. 3,6 в). При этом внешнее трение твердых поверхностей заменяется трением слоев смазочного материала.

Механическое и атомно-молекулярное взаимодействие рабочих поверхностей полностью исключается. В этих условиях давление равномерно распределяется по всей номинальной площади контакта деталей и передается на несущую поверхность через слой смазочного материала.

Благодаря этому значительно уменьшается тепловыделение в процессе трения, и сопряжение работает с незначительным повышением средней температуры. Такие условия трения обеспечивают максимальную долговечность сопряжений и часто формируются в опорах скольжения и подшипниках качения.

### **3.7. Условия, определяющие характер трения**

Характер процесса трения определяется комплексным показателем, которым является коэффициент трения.

При решении практических задач коэффициент трения часто принимают постоянным для заданных материалов. Это справедливо, если не учитывать изменение шероховатости поверхностей деталей сопряжения и их деформацию под нагрузкой, а также изменение температуры рабочей поверхности. В действительности же коэффициент трения зависит от микро- и макрогеометрии поверхностей, физических свойств материалов деталей, скорости относительного перемещения и температуры трущихся поверхностей, от толщины слоя и эксплуатационных свойств смазочного материала, от давления в зоне контакта и от твердости материалов.

На рис.3.7 приведена зависимость коэффициента трения от скорости скольжения в условиях трения со смазочными материалами, имеющие различную вязкость. Влияние температуры рабочих поверхностей и смазочного материала на характер трения было рассмотрено ранее. Влияние скорости относительного перемещения поверхностей на силы сопротивления движению долгое время оставалось неустановленным.

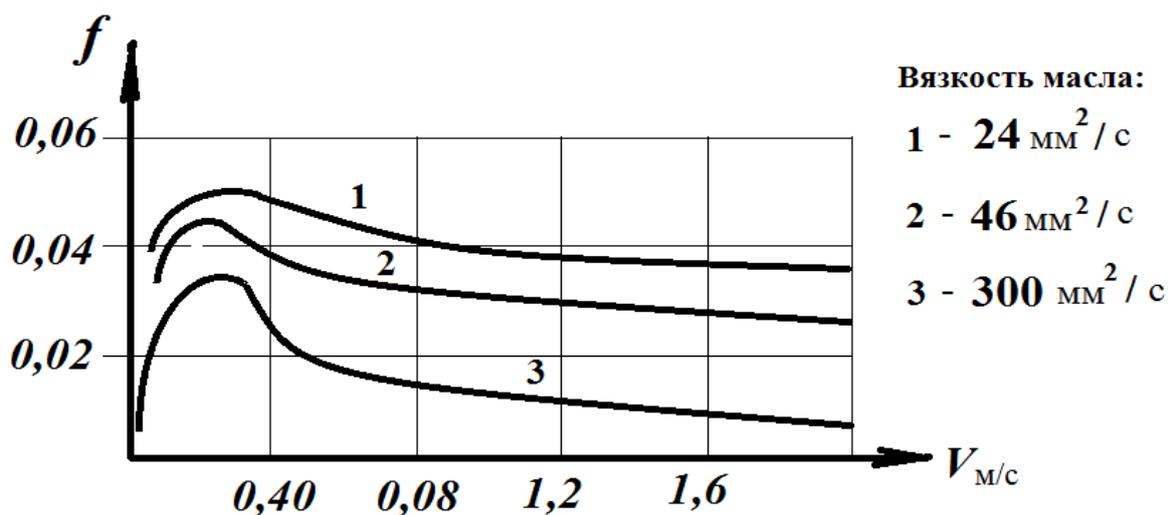


Рис. 3.7. Изменение величины коэффициента трения в зависимости от скорости скольжения сопрягаемых поверхностей при смазке с различной вязкостью

Основная трудность в получении соотношения между коэффициентом или силой трения и скоростью состоит в том, что взаимодействие поверхностей сопровождается интенсивным тепловыделением, изменением температуры в контакте, а это, в свою очередь, влечет за собой изменение физических и механических свойств материалов, трудно регистрируемое в процессе работы сопряжения. Малым скоростям скольжения соответствует увеличение коэффициента трения (см. рис.3.7 начальный участок кривой). В этот период наблюдается максимальный коэффициент трения скольжения, обусловленный большим внутренним сопротивлением слоев смазочного материала относительно смещению. Дальнейшее увеличение скорости относительного перемещения поверхностей сопровождается существенным повышением температуры в зоне трения из-за ухудшения условий теплоотдачи. В результате нагрева смазочного материала снижается его вязкость, и вследствие этого уменьшаются силы трения слоев смазочного материала. Плавное понижение кривой на этом участке соответствует этим процессам. При высоких скоростях скольжения часто происходит разрушение смазочного слоя с последующим резким увеличением коэффициента трения скольжения. Чем больше вязкость смазочного материала, тем больше скорость скольжения, при которой наступает разрушение масляной пленки.

При малой толщине смазочного слоя и небольших скоростях скольжения трение обусловлено в основном местным молекулярным взаимодействием и срезом узлов сваривания на участках фактического контакта. Такой характер взаимодействия поверхностей сопровождается местными температурными вспышками, не оказывающими существенного влияния на механизм трения. Коэффициент трения увеличивается вследствие увеличения деформационной составляющей.

При высоких скоростях относительного перемещения поверхности деталей подвергаются интенсивному фрикционному нагреву, вызывающему структурные изменения материалов поверхностных слоев. В зависимости от шероховатости поверхностей и свойств материалов трение в этом случае сопровождается обширным пластическим течением тонких поверхностных слоев материала, причем температура поверхности близка к температуре плавления металла.

### **3.8. Трение эластомерных материалов**

Полимерные материалы в зависимости от температуры могут быть в различных физических состояниях:

- высокоэластичным; - стеклообразным; - вязкотекучим.

Высокоэластичное состояние для разных эластомеров наблюдается в интервале от температуры стеклования до температуры пластичности  $T_n=150+200^{\circ}\text{C}$ . В этом температурном режиме работает большинство деталей машин из полимерных материалов.

Переход полимерного материала от высокоэластичного к стеклообразному состоянию происходит при температуре  $T = - (20...70)^{\circ}\text{C}$

В стеклообразном состоянии эластомеры в процессе трения ведут себя подобно хрупким металлам. При нагревании материала детали выше температуры пластичности эластомеры переходят в вязкотекучее состояние, сопровождающееся в процессе работы накоплением необратимой остаточной деформации, а также химическим распадом молекул полимера - деструкцией материала. Работа эластомеров при температуре, близкой к температуре  $T_n$ ,

ведет к значительному снижению долговечности деталей из полимерных материалов и поэтому недопустима. Характер трения эластомеров зависит от их физического состояния, материала и профиля сопряженной поверхности, режима работы сопряжения, а также от смазочного материала.

Эластомеры обладают несоизмеримо малым модулем упругости по сравнению с модулем упругости материала сопряженной детали. Вследствие этого площадь фактического контакта в узлах трения с полимерными материалами близка к номинальной даже при малых нормальных давлениях.

Силы сопротивления перемещению эластомеров относительно сопряженной поверхности обусловлены молекулярным взаимодействием при малых скоростях скольжения и нормальных давлениях и силами упругой деформации при высоких скоростях и нагрузках. При определенных скоростях, различных для разных материалов, происходит скачкообразное движение деталей трения, вызванное упругой деформацией эластомера. В местах контактирования эластомера с твердой поверхностью возникают силы молекулярного притяжения, которые создают значительное сопротивление трению вследствие большой площади фактического контакта.

Деформационная составляющая силы трения вызвана запаздывающим восстановлением исходной формы рабочей поверхности детали эластомера после внедрения неровностей твердой поверхности. Для гладких поверхностей деформационная составляющая практически исключается, но при этом несколько возрастает молекулярная. Для уменьшения молекулярной составляющей силы трения используется смазочный материал.

#### Контрольные вопросы

1. Что называется «внешним трением»?
2. перечислите основные виды трения.
3. Как определяется коэффициент трения?
4. В чем различие между понятиями «адгезия» и «когезия»?
5. Какие процессы ведут к разупрочнению и разрушению поверхностей трения?

## Глава 4. Виды изнашивания деталей машин

### 4.1. Виды изнашивания

В сопряжениях машин существуют четыре типа относительного перемещения рабочих поверхностей деталей: скольжение, качение, удар, осцилляция. Осцилляцией называется перемещение, имеющее характер относительных колебаний с малой амплитудой (в среднем 0,02...0,05 мм).

Различают изнашивание при трении без смазочного материала, при трении со смазочным материалом, при трении с абразивным материалом. В зависимости от свойств материалов деталей, смазочного материала или абразивного материала, а также от их соотношения в сопряжениях в процессе работы возникают разрушения поверхностей различных видов. Изнашивание разделяют на следующие виды (рис. 4.1):

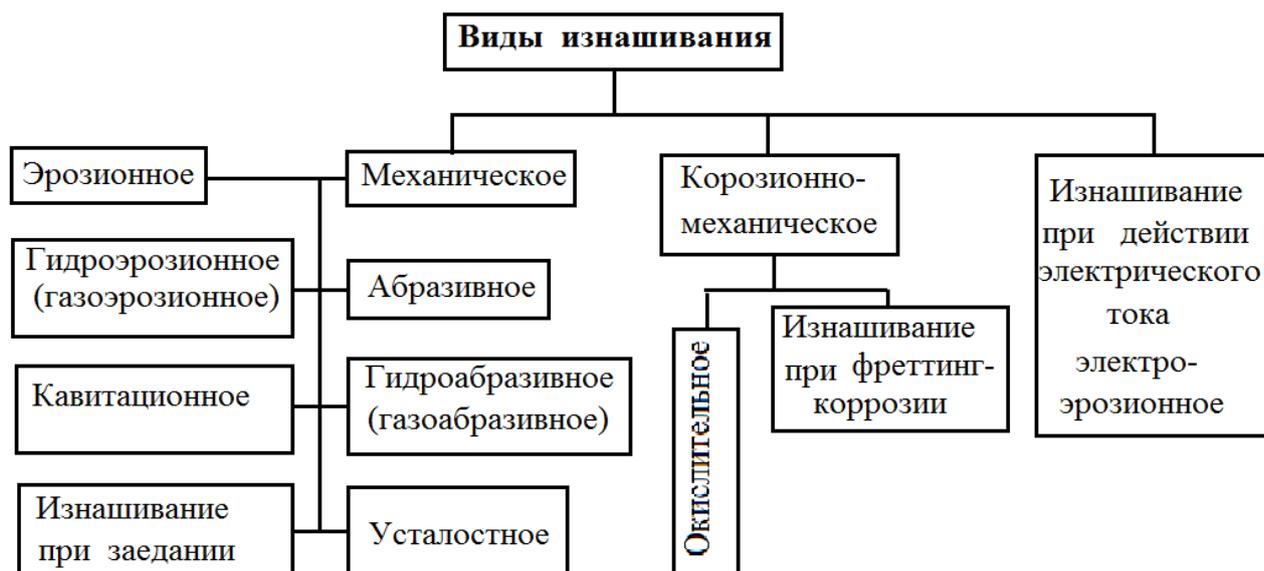


Рис. 4.1. Классификация видов изнашивания

По более обобщенной классификации виды изнашивания объединяют в 4 группы:

1. Механическое – изнашивание в результате механических воздействий.
2. Молекулярно-механическое - вызываемое одновременным воздействием механических, молекулярных или атомных сил.
3. Коррозионно-механическое – вызываемое одновременным воздействием механических и химических взаимодействий металла со средой.

4. Эрозионное – механическое изнашивание в результате действия потока жидкости, газа, электрического тока.

В реальных условиях работы сопряжений машин наблюдаются одновременно несколько видов изнашивания. Однако, как правило, устанавливается ведущий вид изнашивания, лимитирующий долговечность деталей. Механизм ведущего вида изнашивания определяют путем изучения изношенных поверхностей. Наблюдая характер проявления износа поверхностей трения (царапины, трещины, выкрашивания, пленки окислов) и зная показатели свойств материалов деталей и смазочного материала, а также данные о наличии и характере абразива, интенсивности изнашивания и режиме работы сопряжения, можно достаточно полно обосновать заключение о виде изнашивания сопряжения и разработать мероприятия по повышению долговечности машины.

Формирование изнашиваемой поверхности происходит в результате действия различных по интенсивности и видам внешних факторов: среды, температуры, давления, вида трения, скорости относительного перемещения, характера нагрузки и др.

Для объяснения природы трения и изнашивания при механическом истирании существуют три теории, дополняющие и уточняющие друг друга. Их исходные положения сводятся в основном к механическому, молекулярному и молекулярно-механическому взаимодействиям между трущимися поверхностями. Поэтому и эти теории называют механической, молекулярной и молекулярно-механической.

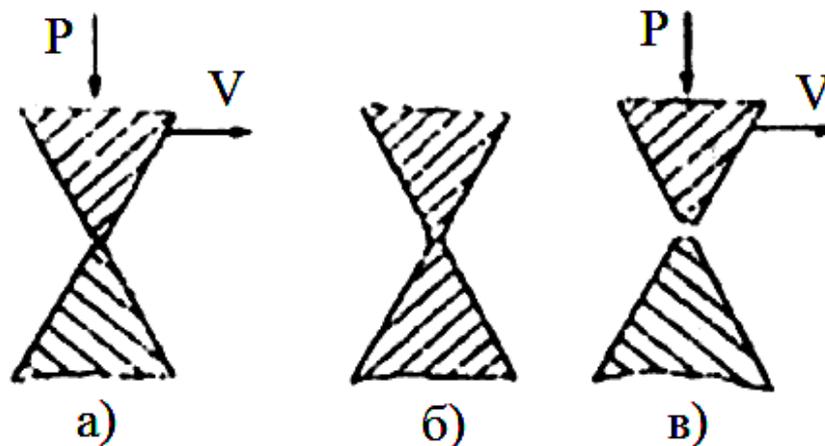
***Механическая теория.*** Изнашивание представляет собой процесс деформации и разрушения поверхностных слоев, происходящий в результате механического взаимодействия микронеровностей при скольжении одного тела по другому.

Сближение шероховатых поверхностей приводит как к контакту микронеровностей, так и к взаимному проникновению микро выступов одной из поверхностей во впадины другой. В связи с различной высотой микронеровностей контактирующие микро выступы нагружаются по-разному, поэтому одни из

них испытывают упругие деформации, другие – пластические. При относительном перемещении трущихся поверхностей имеют место все известные виды деформаций – смятие, сдвиг, изгиб.

Важно отметить, что трущиеся детали соприкасаются не всей видимой поверхностью, а лишь микровыступами, пятнами касания. По расчётам английского ученого Боудена, фактическая площадь касания составляет 0,01...0,001 видимой поверхности (в зависимости от класса шероховатости). В силу этого удельные нагрузки на отдельные микровыступы достигают больших значений. Так, если в подшипниках коленчатых валов автотракторных двигателей среднее расчетное давление составляет 4 МПа, то фактическое давление на микровыступах может достигать 400...4000 МПа.

При таком давлении в контактных точках возникают температурные вспышки локального характера и происходит сваривание микровыступов с почти мгновенным разрывом мостиков сварки. Процесс образования мостиков сварки и последующего их разрушения схематично показан на рисунке 4.2.



Это подтверждается на практике в виде задиров и наплывов на трущихся поверхностях. С течением времени фактическая площадь касания увеличивается. Идет процесс приработки. В период приработки (рисунок 4.3) происходит «пе-

ремалывание» старых микронеровностей, полученных при механической обработке, с образованием новых.

Значительная часть работы трения (70... 80%) переходит в теплоту, поэтому температура на поверхностях трения резко повышается (I период на кривой изнашивания).

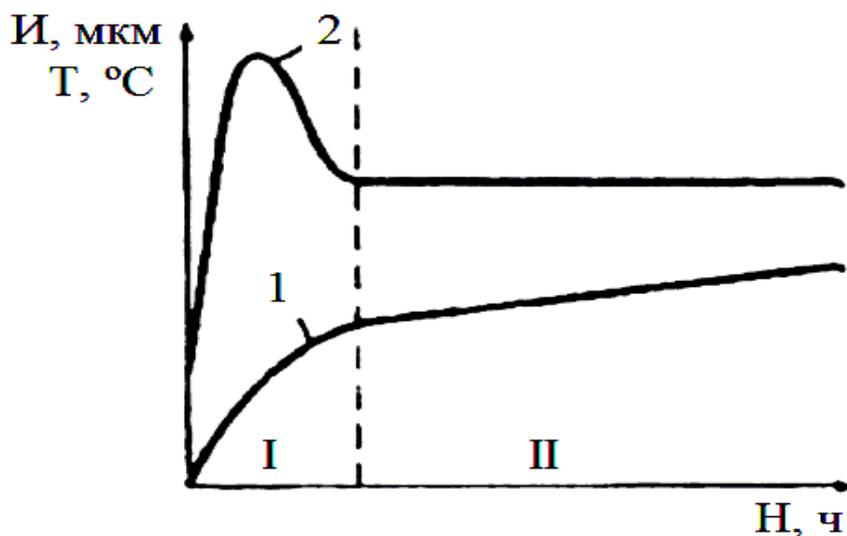


Рис. 4.3. Зависимости износа (1) и температуры (2) на поверхности трения от наработки:

I – процесс приработки; II – нормальное изнашивание

При установившемся трении тепловой баланс стабилизируется, и соединение приобретает некоторую среднюю температуру, соответствующую II периоду нормального изнашивания. Разделяя процесс изнашивания на два основных периода (первоначальной приработки и нормального изнашивания), механическая теория получила довольно стройный вид. Однако, находясь на позициях механической теории, невозможно объяснить некоторые явления, происходящие при изнашивании материалов. Так, если считать, что изнашивание – следствие лишь процессов деформации и разрушения поверхностных слоев при механическом взаимодействии микронеровностей, то как объяснить тот факт, что чисто обработанные поверхности в процессе трения и изнашивания приобретают определенную шероховатость? Не представляется возможным объяснить и то, что поверхности с высокими механическими свойствами при трении о мягкие поверхности изнашиваются.

## 4.2. Механическое изнашивание

*Механическое изнашивание* – это изнашивание в результате механических воздействий. К этому виду изнашивания относят:

- абразивное;
- эрозионное;
- усталостное;
- изнашивание при заедании и схватывании;
- коррозионно-механическое изнашивание.

## 4.3. Абразивное изнашивание

*Абразивное изнашивание* – это механическое изнашивание материала в результате режущего или царапающего действия на него твердых частиц, находящихся в свободном или закрепленном состоянии в жидкости (гидроабразивное) или в газе (газоабразивное). Это наиболее распространенный вид изнашивания деталей сельскохозяйственной техники, вызываемый воздействием на них абразивных (твердых) частиц. Последние содержатся в почве и при контакте с поверхностью рабочих органов. Твердые (абразивные) частицы могут образовываться и в самой машине в виде закаленных частиц металла – продуктов износа соединенных пар трения.

Интенсивность абразивного изнашивания особенно велика у машин, эксплуатируемых в условиях запыленного воздуха, при недостаточной герметичности уплотнений. Основным источником попадания абразивных частиц в сопряжения машин является окружающая среда. В 1 м<sup>3</sup> воздуха содержится от 0,04 до 5 г пыли, на 60...80 % состоящей из взвешенных частиц минералов. Большинство частиц имеют размеры от 5 до 120 мкм, т. е. соизмеримы с зазорами в сопряжениях дорожных машин. Основные составляющие пыли: двуокись кремния SiO<sub>2</sub>, окись железа Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, соединения Al, Ca, Mg, Na и других элементов. Частицы минералов, содержащиеся в воздухе, обладают высокой твердостью. Так, твердость частиц двуокиси кремния SiO<sub>2</sub> достигает 10 780...11 700 МПа, а окиси алюминия - от 20 900 до 22 900 МПа, что превышает твердость рабочих поверхностей большинства деталей сельскохозяйственных машин. В роли абрази-

ва могут выступать также продукты изнашивания и выпавшие в осадок присадки масел. Если твердость абразивной частицы соизмерима с твердостью основного металла рабочей поверхности детали, то при работе сопряжения абразивная частица будет способствовать разрушению окисной пленки. В обнажившемся в результате этого металле под воздействием окружающей среды (кислорода воздуха и влаги) активизируются коррозионные процессы и происходит коррозионно-механическое изнашивание. Так, двигатель с неисправным воздухоочистителем через несколько часов теряет компрессию и выходит из строя в результате форсированного износа поршневых колец и зеркала цилиндров. Накопление пыли в смазочном материале до 0,25% по массе приводит к отказу подшипников качения за 1000 мото-ч при нормативной долговечности в 10 раз большей.

Абразивное изнашивание длительное время связывали лишь с режущим действием абразивных частиц. С этим представлением связан и сам термин

«абразивный», происходящий от латинского слова «abrasio» – соскабливание. При таком подходе процесс изнашивания соединения «вал-подшипник» можно представить в виде схемы, показанной на рисунке 4.4.

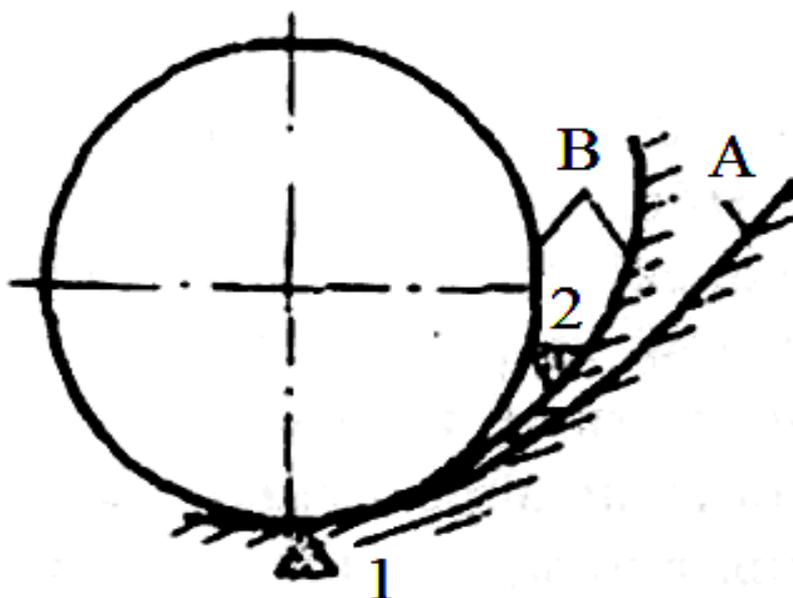


Рис. 4. 4. Схема абразивного изнашивания соединения «вал-подшипник»:

А – мягкая поверхность; В – твердые поверхности;

1, 2 – абразивные частицы

Абразивные частицы 1 и 2 по-разному ведут себя в зависимости от твердости поверхностей взаимодействующих деталей. Когда одна из трущихся поверхностей (А) изготовлена из мягкого материала, абразивные частицы 1 поглощаются этой поверхностью, что при малой концентрации абразивных частиц в смазочном материале предохраняет твердую поверхность (В) от износа. С течением времени мягкая поверхность насыщается абразивными частицами и превращается в своеобразный абразивный инструмент, который царапает соединенный вал.

Если обе соединенные поверхности (В) имеют значительную твердость, то абразивные частицы 2, попадая в зазор между ними, или царапают поверхности, или разрушаются, не повреждая ни ту, ни другую поверхности. Все зависит от соотношения твердостей взаимодействующих поверхностей и абразива.

Степень агрессивности абразивных частиц по отношению к изнашиваемым поверхностям оценивают коэффициентом твердости ( $K_T$ ):

$$K_T = \frac{H}{H_A}, \quad (4.1)$$

где  $H$  – микротвердость материала детали, МПа;

$H_A$  – микротвердость абразива, МПа.

Профессором М.М. Тененбаумом установлено критическое значение коэффициента твердости  $K_{T,кр} = 0,5...0,7$ . При  $K_T < 0,5$  происходит интенсивное абразивное изнашивание, при  $K_T > 0,7$  сопротивление материала абразивному изнашиванию резко возрастает.

Дальнейшие исследования показали, что твердость не может однозначно характеризовать сопротивление материала абразивному изнашиванию. Здесь оказывают влияние прочностные и некоторые другие свойства материала. Особенно интересными оказались свойства деформационных материалов.

Деформационными свойствами объясняется неожиданное поведение сравнительно мягких, пластичных материалов в условиях абразивного изнашивания. В отличие от ранее высказанного утверждения о решающем значении поверхностной твердости в снижении интенсивности абразивного изнашивания мяг-

кие полимеры вполне удовлетворительно сопротивляются воздействию абразивных частиц.

Деформационные свойства проявляются в том, что напряжения на контактах абразивных частиц с пластмассами оказываются значительно меньшими по сравнению с напряжениями на контактах тех же частиц с металлами. Это приводит к тому, что для разрушения пластмассовой поверхности требуются значительно большие усилия, чем для разрушения металла.

Применительно к деталям и сопряжениям сельскохозяйственных транспортных и технологических машин абразивное изнашивание, при котором происходит истирание поверхности трения за счет скалывания микронеровностей или режущего воздействия на поверхность абразивных включений, имеет наибольшее распространение. Абразивному изнашиванию подвергаются детали ходовой части машины, трущиеся детали трансмиссий, коленчатые и шлицевые валы, гильзы, поршни, клапаны, втулки и т.д.

Для снижения абразивного износа твердость рабочей поверхности детали должна быть в 1,3 раза больше твердости абразива. Однако, повышать твердость материала по сравнению с твердостью абразива в 1,3 раза экономически не выгодно. В таблице 4.1. представлены основные методы повышения абразивной износостойкости поверхности детали. Кроме мероприятий, представленных в таблице 4.1. применяют и другие методы и способы снижения абразивного износа.

Для уменьшения интенсивности абразивного изнашивания необходимо поставить преграду для абразивных частиц на пути к поверхностям трения с помощью уплотнений, воздухоочистителей и маслофильтров, а также тщательной очисткой агрегатов, сборочных единиц и деталей машин при их ремонте.

Уплотнения, воздухоочистители и маслофильтры устанавливаются в машины при их изготовлении. Очистку выполняют при техническом обслуживании.

**Таблица 4.1. Методы повышения абразивной износостойкости поверхности детали**

<b>Метод</b>	<b>Материал детали</b>	<b>Форма проявления</b>
Гальваническое покрытие	Большинство черных и цветных металлов	Образование тонкого твердого гладкого покрытия
Анодирование	Алюминий	Образование тонкого окисного слоя повышенной твердости
Насыщение (цементация, цианирование, азотирование)	Малоуглеродистые стали	Повышение твердости поверхности
Напыление (металлизация, наплавка порошкового металла, напыление керамики)	Металлические и полимерные материалы	Формирование слоев взаимосвязанных частично окисленных частиц
Кокильная отливка	Серый чугун	Образование на поверхности слоя белого чугуна
Плазменная закалка	Чугун, сталь	Повышение локальной твердости поверхности
Лазерное упрочнение	Чугун, сталь	Повышение твердости материала детали в тонких поверхностных слоях

Для придания трущимся поверхностям наибольшего сопротивления абразивному изнашиванию применяют специальные виды наплавки и гальванических покрытий, например хромирование. В этих же целях наряду с известными видами термической обработки (цементация, закалка и др.) в ремонтном производстве применяют термомеханическую обработку (ТМО), электромеханическую обработку (ЭМО) и др.

Новый метод повышения надежности деталей машин, работающих в абразивной среде, – облицовывание металлических поверхностей пластическими массами и резиной. Эта мера снижения интенсивности абразивного изнашивания вытекает из рассмотренного ранее механизма взаимодействия пластмасс с твердыми частицами, когда проявляются деформационные свойства полимерного материала. Характерный пример такой защиты – изготовление поддерживающих роликов с резиновыми бандажами на гусеничных тракторах.

Однако повышение твердости поверхности детали при выкрашивании вызывает образование продуктов износа высокой твердости, под действием которых происходит микрорезание и повышенный абразивный износ.

Эффективными методами защиты деталей машин от абразивного изнашивания являются герметизация сопряжений с помощью уплотнительных элементов, обеспечение чистоты применяемых топлив, смазочных материалов, гидравлических жидкостей. Например, фильтрация дизельного топлива перед заправкой двигателя обеспечивает снижение интенсивности изнашивания деталей топливной аппаратуры в 10 раз.

#### **4.4. Абразивное изнашивание полимеров**

В подшипниках скольжения и сопряжениях вал - втулка при шероховатости  $R_z < 0,05$  мкм поверхности металла износ полимеров в основном обусловлен истиранием и адгезией. С увеличением шероховатости поверхности металла наступает абразивное изнашивание. При трении без смазочного материала интенсивность изнашивания может возрасти в  $10^4$  раз и выше по мере увеличения шероховатости в 50 раз.

Износостойкость пластмасс в условиях абразивного изнашивания уменьшается с ростом их модуля упругости в отличие от износостойкости металлов, для которых наблюдается обратная закономерность.

При работе деталей из эластомерных материалов также наблюдается абразивное изнашивание. Причинами этого могут быть не только абразивные частицы, продукты износа, но также и выступы микронеровностей твердой поверхности сопряженной детали. Выступы микронеровностей вызывают истирание и вырывы частиц материала, на поверхности эластомера возникают микропорезы и продольные царапины.

Абразивная износостойкость эластомеров обратно пропорциональна коэффициенту трения. Припудривание поверхности резины тальком или введение в состав материала антифрикционных смазочных масел позволяет значительно повысить износостойкость деталей из эластомеров.

#### **4.5. Гидроабразивное изнашивание**

Наиболее характерным примером гидроабразивного изнашивания является износ коренных вкладышей коленчатых валов двигателей, через центральные отверстия которых подается жидкая смазка, засоренная продуктами износа. Механическое воздействие твердых частиц может сочетаться с коррозионным и кавитационным разрушением. При возникновении ядер кавитации в потоке жидкости вследствие существования микрообъемов воздуха, пузырьков возможна реализация двух механизмов разрушения – гидроабразивного и кавитационного. Во времени абразивный износ развивается приблизительно линейно, кавитационный – в существенно нелинейной зависимости. Инкубационный период, характерный для кавитационного разрушения при абразивном изнашивании, отсутствует. На гидроабразивный износ влияют также соотношение значений твердости материала и абразива, величина угла атаки.

Гидроабразивное изнашивание характерно для элементов топливной аппаратуры, двигателей внутреннего сгорания, гидропривода, а также для деталей гидродинамических передач.

#### **4.6. Газоабразивное изнашивание**

*Газоабразивное изнашивание* - происходит в результате воздействия твердых частиц, увлекаемых газовым потоком. Газоабразивное изнашивание типично для газовых турбин, доменного производства, газодобывающего оборудования, различных деталей пневматических машин и др. Главными факторами влияния в этом случае являются скорость потока абразивных частиц, угол атаки, свойства и концентрация абразива, физико-химические характеристики среды.

#### **4.7. Эрозионное изнашивание**

*Эрозионное изнашивание* - механическое изнашивание в результате воздействия потока жидкости или газа. В его основе лежит явление эрозии материалов, т. е. последовательное разрушение микроскопических объемов поверхностных слоев деталей под влиянием механических воздействий потока жидкости или газа. Сам процесс разрушения поверхностных слоев обуславливается

частыми ударами о материал жидких или газообразных частиц. Под действием этих ударов отдельные микроскопические объемы материала многократно деформируются, что в конечном итоге приводит к разрушению.

Характер разрушения поверхностных слоев деталей будет определяться возникающими в металле напряжениями, состоянием самого металла и другими факторами. Наиболее часто протекают процессы отслаивания или выкрашивания материала. В практике эрозионному изнашиванию подвержены рабочие поверхности корпусов насосов.

#### 4.8. Усталостное изнашивание

*Усталостное изнашивание* - механическое изнашивание в результате усталостного разрушения при повторном деформировании микрообъемов материала поверхностного слоя. Усталостное изнашивание наблюдается в большинстве сопряжений машин в качестве сопутствующего вида изнашивания. Оно возникает как при трении качения, так и при трении скольжения. Процесс усталостного изнашивания обычно связан с многократно повторяющимися циклами напряжений в контакте качения или скольжения. В процессе взаимодействия поверхностей в их верхних слоях возникают поля напряжений. Схема распределения напряжений при контакте цилиндра с плоскостью, рассчитанная методом конечных элементов, приведена на рис. 4.5.

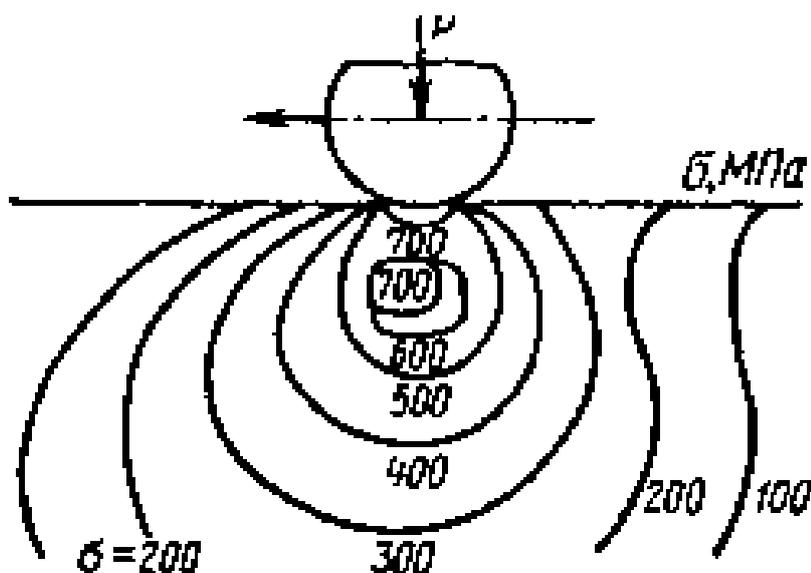


Рис. 4.5. Схема распределения касательных напряжений, возникающих при качении цилиндра по плоскости

В процессе трения на рабочей поверхности деталей возникают максимальные напряжения сжатия, а по глубине материала детали распространяются направленные касательные напряжения, максимум которых концентрируется на некотором расстоянии от точки контакта.

Интенсивность усталостного изнашивания определяется следующими факторами: наличием остаточных напряжений и поверхностных концентраторов напряжений (окислов и других крупных включений, дислокаций); - качеством поверхности (микропрофиль, загрязнения, вмятины, царапины, задиры, канавки, риски); - распределением нагрузки в сопряжении (упругими деформациями, перекосом деталей, зазором); - видом трения (качения, скольжения или качения с проскальзыванием); - наличием и типом смазочного материала.

Механизм усталостного изнашивания материала объясняют по-разному. Большое распространение в настоящее время получила теория усталостного изнашивания, разработанная группой советских ученых под руководством

Согласно теории И. В. Крагельского частицы износа с поверхности трения могут отделяться и без внедрения шероховатостей одной детали в поверхностные слои другой детали сопряжения. Изнашивание может происходить вследствие усталости микрообъемов материала, возникающей под действием многократных сжимающих и растягивающих усилий, не превышающих критических  $P_{кр}$ .

В результате циклического воздействия нагрузки на поверхности детали возникают усталостные микротрещины, которые постепенно смыкаясь приводят к образованию частиц износа. Это явление получило название фрикционно-контактной усталости. При механическом взаимодействии деталей в поверхностных слоях материала возникает сложное напряженное состояние: - перед выступом шероховатости образуется зона сжатия материала, а за выступом - зона растяжения. В результате такого знакопеременного циклового воздействия в микрообъемах материала накапливаются повреждения, снижающие его прочность. Накопление усталостных микрповреждений ведет к разрушению поверхностных слоев материала в зоне трения.

Процесс катастрофического усталостного изнашивания протекает следующим образом (рис.4.6,*a*). Сначала на трущейся поверхности 1 образуются усталостные микротрещины 2. Смазочный материал, попадая в микротрещины, способствует их расклиниванию 3 и выкрашиванию частиц 4 металла, в результате чего на поверхности детали появляются мелкие оспины (питтинг). Число этих оспин и одновременно их размеры увеличиваются до тех пор, пока увеличивающиеся контактные напряжения на рабочих поверхностях не приведут к пластической деформации и интенсивному изнашиванию детали. Толщина разрушенного слоя металла примерно соответствует глубине распространения под поверхностью максимальных касательных напряжений.

В зависимости от соотношения нормальной и тангенциальной составляющих сил в контакте, а также от структуры материала и его физико-механических свойств первичная микротрещина может зародиться и в подповерхностном слое. В этом случае механизм разрушения поверхности можно представить следующим образом (рис. 4.6, б):

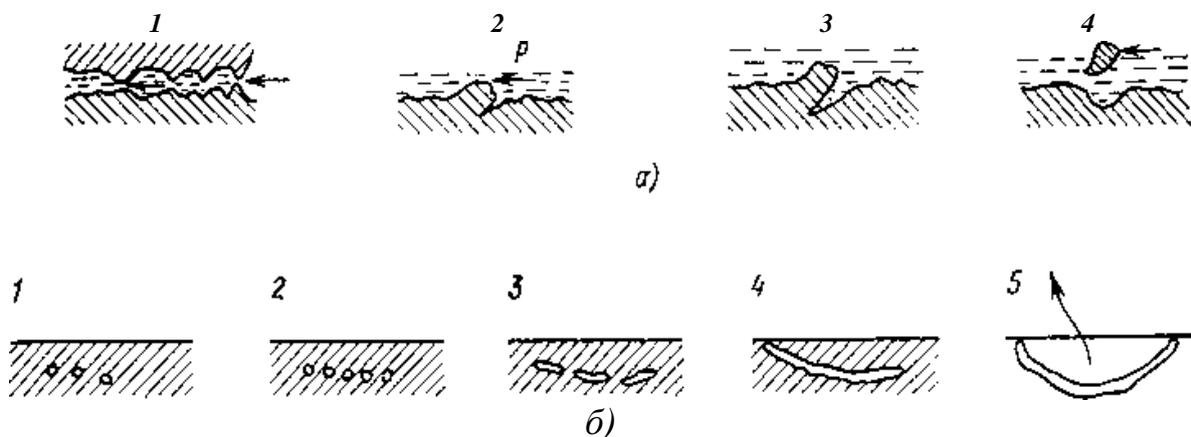


Рис. 4.6. Схема усталостного изнашивания поверхности при  $P < P_{кр}$

и возникновении: *a* – первичной микротрещины на поверхности;

*б* – микротрещины в подповерхностном слое.

1 - зарождаются подповерхностные дислокации; 2 - идет процесс накопления дислокаций; 3 - образуются полости; 4 - слияние полостей ведет к образованию микротрещин, параллельных поверхности трения; 5 - при достижении микротрещиной некоторой критической длины отделяется частица износа.

Подповерхностные микротрещины зарождаются, как правило, у деталей с

неоднородной структурой материала: азотированных, цементованных, поверхностно закаленных, а также у деталей, работающих при очень больших контактных напряжениях.

Участки рабочих поверхностей деталей, поврежденные усталостным изнашиванием, имеют две типичные области: относительно гладкого материала, которая формируется по краям в результате трения двух сторон микротрещины при ее раскрытии и смыкании (в этой области металл обычно имеет специфическую окраску вследствие воздействия масла, пыли и продуктов коррозии); шероховатой поверхности «рваного» металла, расположенная на дне раковины.

Способность детали сопротивляться усталостному изнашиванию обычно оценивают временем работы в заданных условиях до отрыва частиц металла (образования углублений на поверхности) или максимальным контактным напряжением, при котором не наступает питтинг при заданном числе циклов нагружения. Наибольшее влияние на развитие усталостного изнашивания оказывают условия трения (нагрузка и температура), свойства материалов (твердость и шероховатость поверхности) и применяемые смазочные материалы.

Сопротивление материалов питтингу прямо пропорционально твердости рабочей поверхности и вязкости смазочного материала. С возрастанием нагрузки  $N$  на рабочую поверхность деталей наработка до возникновения усталостного выкрашивания уменьшается.

Смазочные материалы уменьшают напряжение, действующее в контакте, в результате процесс образования микротрещин в начальной стадии идет медленнее. Усталостное изнашивание наиболее часто наблюдается в условиях высоких контактных нагрузок при одновременном качении и проскальзывании одной поверхности по другой. В таких условиях работают, например, зубчатые колеса, тяжело нагруженные шестерни и подшипники качения, зубчатые венцы.

Усталостное изнашивание рабочих поверхностей деталей сопровождается повышением уровня шума и вибрации по мере увеличения износа. Усталостное изнашивание материала может быть умеренным и прогрессирующим.

Обычное умеренное усталостное изнашивание для большинства пар трения

не является опасным, и детали, имеющие усталостные повреждения, могут использоваться длительное время. Прогрессирующее изнашивание возникает при высоких контактных напряжениях, сопровождается интенсивным разрушением поверхности и может привести к поломке деталей (например, зуба шестерни).

При интенсивном абразивном изнашивании рабочих поверхностей разрушение их происходит быстрее, чем образование усталостных трещин. Поэтому, как правило, в таких случаях питтинг не наблюдается.

Усталостное изнашивание также проявляется и при взаимодействии деталей из эластомерных материалов. Упругие свойства эластомерных материалов позволяют им воспроизводить шероховатость противоположащей твердой поверхности в процессе скольжения, что, в свою очередь, приводит к многократному циклическому нагружению материала.

Если выступы неровностей твердой поверхности имеют закругленную форму и не вызывают абразивного изнашивания, то повреждение может возникнуть в подповерхностных слоях эластомера под действием повторяющихся напряжений сжатия, растяжения и знакопеременных касательных напряжений. Этот усталостный механизм вызывает износ относительно малой интенсивности и становится существенным, когда циклические напряжения действуют в течение длительного времени.

#### **4.9. Изнашивание при заедании**

Изнашивание при заедании происходит в результате схватывания, глубинного вырывания материала, переноса его с одной поверхности трения на другую и воздействия возникших неровностей на сопряженную поверхность. Изнашивание этого вида является одним из наиболее опасных и разрушительных. Оно сопровождается прочным соединением контактирующих участков поверхностей трения. В процессе трения относительное перемещение поверхностей приводит к вырыву частиц металла одной поверхности и наволакиванию их на другую более твердую поверхность.

В механизме изнашивания при заедании важную роль играет атомно-молекулярное взаимодействие материалов деталей, возникающее при сближе-

нии поверхностей. В отличие от изнашивания других видов, для которых требуется определенное время на развитие процесса и накопление разрушительных повреждений, при заедании разрушение поверхности наступает довольно быстро и приводит к тяжелым формам повреждений (задиры и раковины).

Процесс образования металлических связей зависит от свойств сопряженных поверхностей (их природы, твердости), а также от методов их обработки. При наличии окисных пленок на поверхности металлов процесс заедания зависит также от свойств этих пленок. Защитные пленки, прочно соединяющиеся с основным металлом и способные быстро восстанавливаться при разрушении, препятствуют схватыванию металлов.

Изнашивание при заедании металлов происходит при нарушении правила положительного градиента механических свойств в условиях трения без смазочного материала или при недостаточном его количестве. При трении качения в условиях граничной смазки также наблюдается изнашивание, вызванное схватыванием материалов и заеданием. Схватывание происходит при местном разрыве смазочной пленки и установлении металлического контакта. Это возможно не только при прекращении подачи смазочного материала, но и вследствие общей перегрузки сопряжения, резкого повышения температуры масла в поверхностных слоях, местных температурных вспышек и т. д.

Интенсивность изнашивания при заедании зависит от режимов работы сопряжения, скорости относительного перемещения, нагрузки, температурных условий и т. п. Различают заедание в результате схватывания I или II рода.

Процесс схватывания I рода возникает и развивается при малых скоростях скольжения (0,005...0,2 м/с) поверхностей трения и давлениях (5...100)  $10^5$  Па, превышающих предел текучести металла на участках фактического контакта. Этот процесс сопровождается незначительным повышением температуры и приводит к интенсивному пластическому деформированию и разрушению поверхностей деталей. При этом наблюдается интенсивное изнашивание, возрастающее с увеличением давления. В диапазоне скоростей 0,005...3,3 м/с при  $p = 10^5$  Па наблюдается окислительное изнашивание относительно малой ин-

тенсивности. С увеличением давления окислительный износ уменьшается.

Прекращение схватывания I рода происходит, поскольку скорость относительного перемещения поверхностей достаточно велика для того, чтобы металлические связи разрушались в процессе своего зарождения без повреждения поверхности. Давление недостаточно велико для герметизации зоны трения, в результате чего к рабочим поверхностям свободно поступает воздух и изнашивание приобретает окислительный характер.

При повышении давления металлические связи образуются несмотря на высокие скорости, окислительные процессы прекращаются, развивается процесс схватывания II рода, вызывающий заедание и интенсивное изнашивание.

Процесс схватывания II рода развивается при больших скоростях скольжения поверхностей трения и повышенных давлениях. Наблюдается также значительное увеличение температуры в поверхностных слоях металлов, вызывающее их разупрочнение и разрушение. Условия, благоприятные для возникновения схватывания металлов, создаются естественным путем в процессе изнашивания. Силы, действующие в местах фактического контакта, вызывают напряжения, превышающие предел текучести металла, что влечет за собой пластические деформации поверхностных слоев металла. При этом разрушаются адсорбированные газовые пленки и загрязнения, обнажая отдельные участки металлов. Одновременно происходит сглаживание неровностей и увеличение площади фактического контакта. При тесном сближении участков поверхностей с разрушенными пленками загрязнений возникает междуатомное притяжение металлов, образуются металлические связи. Образовавшиеся узлы схватывания (рис. 4.7) разрушаются, так как сопряженные поверхности перемещаются одна относительно другой. В результате пластической деформации в узлах схватывания металл упрочняется, поэтому разрушение поверхности происходит по основному, менее прочному металлу. Частицы металла, оторвавшиеся от поверхности трения, частично налипают на противоположную поверхность, а частично образуют продукты износа. В местах вырыва происходит концентрация напряжений, образуются трещины, снижается прочность деталей.

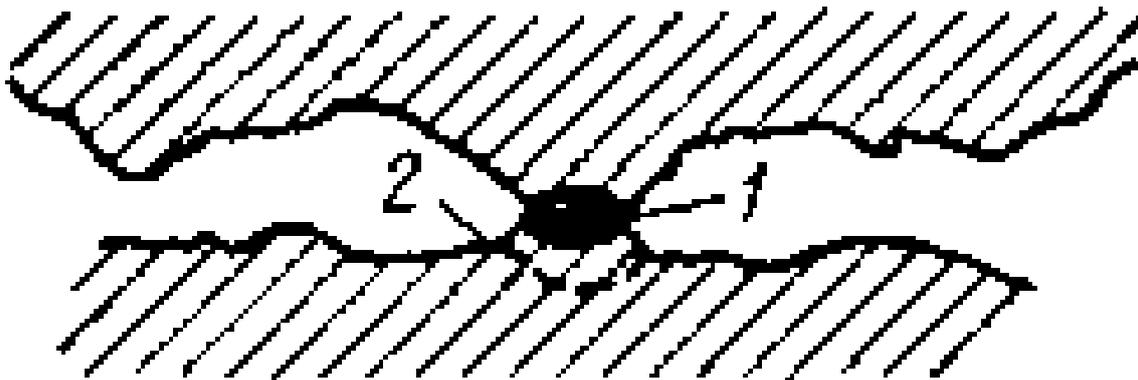


Рис. 4.7. Схема формирования узла схватывания

1 – узел схватывания, 2- линия разрыва материала

Заедание поверхностей характеризует аварийное состояние сопряжения и в процессе эксплуатации машин должно быть исключено. Большое значение имеет правильный выбор смазочного материала. Противозадирные свойства смазочных материалов можно оценить по критической нагрузке  $P$ , при которой в заданных условиях происходит заедание поверхностей. Эта нагрузка называется нагрузкой заедания. Большое влияние на нагрузку заедания оказывают вязкость и состояние смазочного материала. Например, для масла ТМ-5-18 при температуре  $150^{\circ}\text{C}$  нагрузка заедания примерно в 3 раза меньше нагрузки заедания при температуре масла  $50^{\circ}\text{C}$ . Более вязкое масло обеспечивает лучшие противозадирные характеристики.

При работе деталей в сплошном потоке масла заедание происходит при меньших нагрузках, чем при работе в диспергированном (вспененном) масле. Это объясняется интенсивным восстановлением окисных пленок под воздействием кислорода воздуха, поступающего к трущимся поверхностям деталей вместе со смазочным материалом. Диспергированное состояние масла вызывает нарушение благоприятного режима смазки, что в ряде случаев (например, в гидродинамических подшипниках скольжения) может привести к задиру.

Изнашивание при заедании чаще всего встречается в зубчатых зацеплениях. По способности противостоять заеданию в одних и тех же условиях нагружения зубчатые передачи всех типов можно расположить в следующем порядке:

- цилиндрические передачи с внутренним зацеплением;
- цилиндрические

передачи с внешним зацеплением; - конические передачи с прямыми, косыми и спиральными зубьями; - гипоидные и, наконец, винтовые передачи, имеющие самую низкую противозадирную стойкость.

Это объясняется тем, что у гипоидных и винтовых передач наибольшее скольжение зубьев в зацеплении. Изнашивание при заедании встречается также в шариковых и роликовых подшипниках, в тяжело нагруженных опорах качения.

При взаимодействии эластомерных материалов с металлическими деталями также наблюдается явление схватывания. Эластомер изнашивается, если коэффициент трения между эластомерным материалом и твердой поверхностью достаточно велик, а прочность эластомера на разрыв мала. Если поверхностные слои материала находятся в состоянии максимальной деформации, то в направлении, перпендикулярном направлению скольжения, появляется риска или небольшая трещина. Далее происходит постепенное вырывание части упругого материала эластомера, находящегося в состоянии схватывания с твердой поверхностью. При этом слой эластомера, отделяемый от поверхности, скручивается в ролик и образует частицу износа. Интенсивность изнашивания эластомера в этом случае существенно зависит от температуры, нагрузки и смазочного материала. Подбирая смазочный материал с учетом внешних условий и упругих свойств эластомера, можно полностью исключить этот вид изнашивания.

#### **4.10. Коррозионно-механическое изнашивание**

Этот вид изнашивания характеризуется процессом трения материала, вступившего в химическое взаимодействие со средой. При этом на поверхностях металла образуются новые менее прочные химические соединения, которые в процессе работы сопряжения удаляются с продуктами износа. К коррозионно-механическому изнашиванию относят окислительное изнашивание и изнашивание при фреттинг-коррозии.

Окислительным называют изнашивание, при котором основное влияние на разрушение поверхности имеет химическая реакция материала с кислородом или окисляющей окружающей средой. Окислительное изнашивание возникает при трении качения без смазочного материала, а также при трении со смазоч-

ным материалом. Скорость окислительного изнашивания невелика и составляет 0,05...0,1 мкм/ч. Процесс окислительного изнашивания активизируется с повышением температуры, особенно во влажной среде.

Изнашиванием при фреттинг-коррозии называется коррозионно-механическое изнашивание соприкасающихся тел при малых колебательных относительных перемещениях. Изнашивание при фреттинг-коррозии отличается от изнашивания при фреттинге -механического изнашивания соприкасающихся тел при малых колебательных относительных перемещениях.

Основное отличие заключается в том, что изнашивание при фреттинге происходит в отсутствие окисляющей окружающей среды без проявления химической реакции материалов деталей и продуктов износа с кислородом. Учитывая это, нетрудно провести аналогию в механизмах развития изнашивания при фреттинге и фреттинг-коррозии.

*Изнашивание при фреттинге и фреттинг-коррозии* обычно происходит на сопряженных поверхностях валов с напрессованными на них дисками колес, муфтами и кольцами подшипников качения; на осях и ступицах колес; на опорных поверхностях пружин; на затянутых стыках, пригнанных поверхностях шпонок и пазов; на опорах двигателей и редукторов.

Необходимым условием возникновения фреттинг-коррозии является относительное проскальзывание сопряженных поверхностей, которое может быть вызвано вибрацией, возвратно-поступательным перемещением, периодическим изгибом или скручиванием сопряженных деталей. Фреттинг-процесс сопровождается схватыванием, окислением, коррозией и усталостным разрушением микрообъемов. В результате фреттинг-коррозии усталостная прочность поверхности уменьшается в 3...6 раз. На поверхностях деталей в местах сопряжений образуются натирсы, налипания металла, вырывы, раковины, а также поверхностные микротрещины. Отличительным признаком износа вследствие фреттинг-коррозии является наличие на поверхностях трения раковин, в которых сосредоточены спрессованные окислы, имеющие специфическую окраску. При фреттинг-коррозии, в отличие от изнашивания других видов, продукты из-

носа в основной своей массе не могут выйти из зоны контакта рабочих поверхностей деталей.

Изнашивание при фреттинг-коррозии влечет за собой нарушение размерной точности соединения (если часть продуктов износа находит выход из зоны контакта) либо заедание и заклинивание разъемных соединений (если продукты износа остаются в зоне трения). Для фреттинг-коррозии характерно следующее:

- малые скорости (около 3 мм/с) относительного перемещения поверхностей и путь (0,025 мм) трения, эквивалентный амплитуде колебаний, при частоте колебаний до 30 Гц и выше;
- локализация повреждений поверхности на площадках действительного контакта вследствие малых относительных смещений;
- активное окисление и интенсификация разрушения поверхностей под действием кислорода воздуха.

Процесс изнашивания при фреттинг-коррозии в условиях трения без смазочного материала можно разделить на три этапа.

*Первый этап*, когда вследствие циклически повторяющихся колебательных относительных перемещений контактирующих поверхностей под действием высоких нагрузок происходит разрушение выступов и окисных пленок. Идет процесс упрочнения материалов и пластического деформирования выступов микронеровностей, вызывающего сближение поверхностей. Сближение поверхностей вызывает молекулярное взаимодействие и схватывание металла в отдельных точках контакта. Разрушение вследствие усталости выступов и узлов схватывания порождает продукты износа, часть которых окисляется. Для этого этапа характерен повышенный износ с монотонно убывающей скоростью изнашивания.

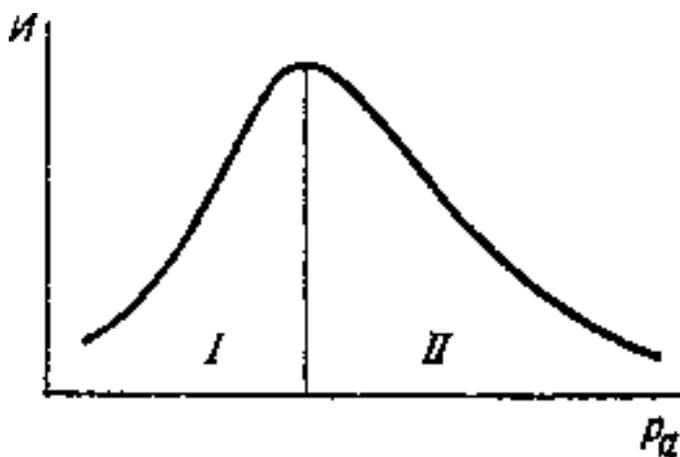
*Второй этап*, когда в поверхностных слоях накапливаются усталостные повреждения. В зоне трения формируется коррозионно-активная среда под действием кислорода воздуха и влаги. Между поверхностями создается электролитическая среда, интенсифицирующая процесс окисления металлических поверхностей, а также процесс коррозионного разрушения. Для этого этапа характерна стабилизация процесса изнашивания, уменьшение скорости изнашивания по сравнению со скоростью изнашивания на первом этапе.

Третий этап, когда вследствие усталостных коррозионных процессов разупрочненные поверхностные слои металлов начинают интенсивно разрушаться с постепенно возрастающей скоростью. Процесс имеет коррозионно-усталостный характер разрушения.

Интенсивность разрушения поверхностей при фреттинг-коррозии зависит от амплитуды и частоты колебаний, нагрузки, свойств материалов деталей и окружающей среды. Для возникновения фреттинг-коррозии достаточно колебательных перемещений поверхностей с амплитудой скольжения  $a = 8 \cdot 10^{-7}$  мм.

С увеличением амплитуды скольжения износ поверхностей возрастает прямо пропорционально. При больших амплитудах (различных для разных материалов) разрушение приобретает характер обычного окислительного или усталостного изнашивания. Частота колебаний сказывается на скорости относительного перемещения поверхностей и на периоде цикла. При этом также меняется контактная температура.

С повышением частоты колебаний поверхности трения фреттинг-износ деталей, работающих в воздушной среде, убывает. Это связано с тем, что при уменьшении периодичности нагружения увеличивается усталостная долговечность металлов. При определенном значении частоты колебаний износ стабилизируется. С возрастанием давления до определенной величины износ при фреттинг-коррозии увеличивается (зона I), а затем уменьшается (зона II) по экспоненциальной зависимости (рис. 4.8). Внешняя среда оказывает серьезное



влияние на интенсивность изнашивания при фреттинг-коррозии. В воздушной среде износ больше, чем в жидких средах, поэтому для снижения интенсивности разрушения поверхностей при фреттинг-коррозии рекомендуется применять смазочные материалы. Как показывает опыт,

Рис. 4.8. Износ при фреттинг-коррозии. смазочные масла не обеспечивают эффективной защиты поверхностей от изна-

шивания при фреттинг-коррозии. Поэтому для этой цели чаще применяют пластичные смазочные материалы, защитные свойства которых в условиях фреттинг-коррозии определяются их чувствительностью к сдвигу. Обычно при использовании смазочных материалов, устойчивых против сдвига, наблюдается более высокая повреждаемость деталей. В связи с этим рекомендуется либо разбавлять пластичные смазочные материалы смазочными маслами, либо с помощью загустителей доводить вязкость жидкого смазочного материала до соответствующей консистенции.

Характерно, что с уменьшением чистоты обработки поверхности ее износостойкость в условиях фреттинг-коррозии в присутствии смазочного материала повышается. Это объясняется тем, что микронеровности поверхности образуют естественные резервуары, служащие для накопления и сохранения смазочного материала в процессе работы. Кроме того, в эти впадины собираются продукты износа и окислы.

Однако, если металл имеет низкую твердость, то с увеличением шероховатости контактирующих поверхностей износ возрастает. В общем случае оптимум шероховатости зависит от соотношения материалов деталей, наличия смазочного материала и режима работы.

Для предотвращения относительного перемещения поверхностей и уменьшения изнашивания при фреттинг-коррозии увеличивают натяг в случае прессовых посадок, применяют демпфирующие устройства для гашения вибрации и другие конструктивные решения.

Широкие возможности для предотвращения изнашивания при фреттинг-коррозии дает подбор пар коррозионно-стойких материалов контактирующих деталей. Так, использование тефлона и резины в соединении вал — втулка позволяет почти полностью устранить фреттинг-коррозию. Тефлоновую пленку напыляют на вал, а затем деталь подвергают термообработке и перед сборкой покрывают пластичным смазочным материалом. Часто используют в качестве прокладки между контактирующими поверхностями резину, что позволяет предотвратить изнашивание при фреттинг-коррозии.

#### 4.11. Электрохимическая коррозия

Основная причина, вызывающая коррозионное разрушение металлов, – протекание на их поверхностях реакций взаимодействия металла с окружающей средой. Если последняя способна проводить электрический ток, то коррозию называют электрохимической. Электрохимическая коррозия сопровождается упорядоченным движением ионов, т.е. появлением электрического тока.

Электродные потенциалы обычно находят по отношению к водородному электроду сравнения, потенциал которого принимают равным нулю. В соответствии с законом Ома появление тока коррозии (а с ним связан процесс электрохимической коррозии) имеет место при наличии разности потенциала ( $E_k - E_a > 0$ ) и электропроводящей среды ( $R < \infty$ ). Другими словами, электрохимическая коррозия имеет место при наличии в системе неоднородных металлов (катода и анода) и окружающей среды в виде электролита. При этом образуется гальваническая пара, в которой один из металлов (анод) претерпевает разрушение.

На практике сплошь и рядом наблюдается коррозия однородных металлов. Коррозия последних происходит потому, что абсолютно однородные металлы в технике не применяют, так как они содержат включения графита, карбидов и др. Последние в сочетании с основным металлом образуют систему микрогальванических элементов, которые при наличии токопроводящей среды (электролита) приводят к электрохимической коррозии. Электролит образуется в результате конденсации влаги на поверхности металла и атмосферных газов ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{SO}_2$  и др.) в пленке воды.

Для коррозионно-механического изнашивания характерно образование на поверхности деталей пленок окислов, которые при трении снимаются с поверхности и в дальнейшем действуют как абразивные частицы. К деталям, подверженным коррозионно-механическому (окислительному или фреттинг-коррозионному) изнашиванию, относятся шейки коленчатых валов, поршневые пальцы, внутренние поверхности гильз цилиндров и др.

#### **4.12. Окислительное изнашивание**

Окислительное изнашивание – это коррозионно-механическое, при котором основное влияние на изнашивание имеет химическая реакция материала с кислородом или окисляющей окружающей средой. При окислительном изнашивании одновременно протекает два процесса: пластическое деформирование малых объемов металла поверхностных слоев и проникновение кислорода воздуха в деформированные слои. На первой стадии происходит разрушение и удаление мельчайших твердых частиц металла из непрерывно образующихся от проникновения кислорода пленок. Вторая стадия характерна образованием и выкрашиванием пластически недеформирующихся хрупких окислов.

#### **4.13. Изнашивание при действии электрического тока**

*Изнашивание при действии электрического тока* – электроэрозионное, т.е. эрозионное изнашивание поверхности в результате воздействия разрядов при прохождении электрического тока.

При недостаточно больших напряжениях от отрицательного электрода отрываются электроны и с очень большой скоростью движутся в межэлектродном пространстве в сторону положительного электрода. Достигая твердой металлической поверхности анода, они резко останавливаются и выделяют всю энергию торможения в поверхностных слоях анода, вызывая механическое деформирование его поверхности и разрушение кристаллов металла. Некоторый объем металла анода расплавляется и выбрасывается в межэлектродное пространство. Часть металла может достигать катода и прочно оседать на нем.

#### **4.14. Водородное изнашивание**

*Водородное изнашивание* - процесс разрушения металлического элемента пары трения вследствие поглощения металлом водорода. Явление водородного изнашивания открыто советскими учеными Д. Н. Гаркуновым и А. А. Поляковым.

Водород присутствует почти во всех химических соединениях. Он попадает в металл при выплавке, в результате коррозии, в ходе химико-термической обра-

ботки деталей, гальванических процессов, смазывания, травления. В узлах трения в процессе работы всегда выделяется водород. В зоне контакта в условиях повышенной температуры смазочные материалы, топливо, пластмасса и другие углеводородные соединения, а также вода из воздуха выделяют водород. Водород имеет свойство концентрироваться в нагретых местах, поэтому в процессе трения он сосредоточивается в поверхностных слоях металлов. Некоторая часть водорода просачивается в пространственные дефекты металла. В зародышах микротрещин протоны водорода постепенно образуют молекулы. Увеличиваясь в размерах, они с огромной силой распирают поверхность в месте дефекта. В результате такого расклинивающего действия микротрещины сливаются одна с другой, происходит интенсивное охрупчивание металла и разрушение поверхности.

Водородное изнашивание проявляется в той или иной степени практически во всех узлах трения. Разрушению этого вида подвержены детали из стали, чугуна, титана и других металлических материалов. Вследствие водородного изнашивания часто выходят из строя коленчатые валы двигателей, элементы стальных цистерн. Во влажном и холодном климате процесс водородного разрушения интенсифицируется, поэтому, например, в условиях Севера техника изнашивается несколько раз быстрее, чем в средней полосе.

Для борьбы с водородным износом необходимо по возможности исключить из состава узлов трения те пластмассы и смазочные материалы, которые склонны к интенсивному выделению водорода. Введение кремния и органических соединений, содержащих хлор, вызывает связывание водорода в металле в безвредные химические соединения. Процесс проникновения водорода в поверхностные слои металла можно затормозить, уменьшив рабочую температуру поверхности до  $50...60^{\circ}\text{C}$  или создав электрический потенциал. Водород из металла после химико-термической обработки деталей удаляют при нагреве их и выдержке при температуре около  $250^{\circ}\text{C}$ .

#### 4.15. Избирательный перенос.

*Избирательный перенос* - это вид контактного взаимодействия деталей при трении, который возникает в результате протекания на поверхности комплекса механофизико-химических процессов, приводящих к снижению трения автокомпенсации износа. Эффект избирательного переноса впервые был обнаружен советскими учеными Д. Н. Гаркуновым и И. В. Крагельским при трении медных сплавов о сталь в условиях граничной смазки. В условиях избирательного переноса сопротивление относительно перемещению поверхностей обусловлено в основном молекулярной составляющей силы трения. При избирательном переносе в зоне контактирования поверхностей образуется защитная, так называемая сервовитная пленка, в которой реализуется диффузионно-вакансионный механизм деформации, протекающий без накопления дефектов, характерных для усталостных процессов.

Сервовитная пленка образуется в зоне трения в результате электрохимических процессов, развивающихся при трении в системе сталь - смазочный материал - медный сплав, которую можно рассматривать как гальванический элемент. Электрохимические процессы, протекающие при трении, приводят к резкому изменению структуры поверхностных слоев материала. В результате в поверхностном слое меди зарождается большое число вакансий и дислокаций, которые приводят к образованию в зоне контакта рыхлой медной суспензии, обладающей высокой пластичностью и малыми сдвиговыми сопротивлениями. Вследствие наличия сил молекулярного взаимодействия и схватывания в процессе трения сервовитная пленка переносится на стальную поверхность, способствует сглаживанию шероховатости поверхности и, заполняя впадины микронеровностей, образует защитный слой. При этом в 100 раз возрастает фактическая площадь контакта и приближается к номинальной, равномерно перераспределяется давление по всей рабочей поверхности.

Рыхлая структура сервовитной пленки обеспечивает диффузионно-вакансионный механизм сдвига, при котором деформация пленки в процессе трения происходит без накопления остаточных напряжений и дефектов. Поэто-

му коэффициент трения уменьшается до значения, соответствующего трению со смазочным материалом, а усталостные изменения структуры материала исключаются. Таким образом, при избирательном переносе реализуются условия положительного градиента механических свойств материала по нормали к поверхностям трения.

Избирательный перенос обеспечивает практически безызносную работу сопряжения вследствие эффекта автокомпенсации износа, который заключается том, что частицы износа не уходят из зоны трения, а взаимодействуя со смазочным материалом, образуют суспензию, покрывающую рабочую поверхность. В условиях избирательного переноса линейная интенсивность изнашивания составляет  $10^{-12}$ .

Для реализации явления избирательного переноса при трении необходимо наличие в смазочной среде поверхностно-активных веществ.

Поверхностно-активные вещества (ПАВ) вводят в смазочные материалы в виде присадок. Они характеризуются тем, что их молекулы или ионы концентрируются под действием молекулярных сил (адсорбируются) у поверхности. Поверхностно-активные вещества в составе смазочного материала, вступая в физико-химическое взаимодействие с металлом (медью), вызывают явления пластифицирования. Это явление впервые было обнаружено советским ученым П. А. Ребиндером и получило название «эффект Ребиндера». Эффект Ребиндера заключается в снижении прочности, разрыхлении поверхности твердого тела и облегчении ее деформации под влиянием адсорбции поверхностно активных компонентов. Сопоставляя процессы, происходящие в условиях избирательного переноса, и процессы в материалах при обычном трении, можно отметить, что если при обычных процессах трения схватывание является вредным, разрушительным явлением, то при избирательном переносе в сопряжениях с автокомпенсацией износа схватывание обеспечивает перенос частиц более мягкого, разрыхленного металла на противоположную твердую (стальную) поверхность и создает условия безызносности. Вследствие разрыхления поверхности металла и создания сервовитной пленки схватывание не увеличивает силы трения и

не вызывает повреждения рабочих поверхностей.

Если при обычном трении смазочный материал рассматривается как защитный слой по отношению к твердым поверхностям, то при избирательном переносе он выполняет роль разрыхляющей среды, превращающей верхние слои в квазижидкое состояние.

Если при обычном трении вследствие высоких давлений и температур поверхностные слои материала приближаются к аморфному состоянию из-за пластических деформаций, то при избирательном переносе они сохраняют кристаллическую структуру.

Эффект избирательного переноса возможен не только в парах медь - сталь, но и в сочетаниях: - бронза – сталь; - пластмасса – сталь; - сталь – сталь; - алюминий - чугун и др.

Для создания условий избирательного переноса в узлах трения применяют:

- соответствующие жидкие и пластичные смазочные материалы, обеспечивающие возникновение сервовитных пленок; - латунирование одного из элементов сопряжения; - металлоплакирующие пластичные смазочные материалы для пары сталь - сталь; - композиционные материалы; - пластмассы с наполнителем  $Cu_2O$  для пары пластмасса - сталь.

В настоящее время в условиях избирательного переноса уже работают некоторые узлы трения. К таким узлам трения относятся тяжело нагруженные шарнирно-болтовые соединения, ступицы колес, подшипники поворотных цапф ходовой части автомобиля, сопряжения винт - гайка и др. Как правило, в процессе эксплуатации машин одни и те же поверхности деталей подвергаются одновременно различным видам изнашивания, хотя в каждом конкретном случае один из процессов преобладает и вызывает наиболее характерный износ поверхности. Основными показателями изнашивания являются скорость, интенсивность, износостойкость и относительная износостойкость.

*Интенсивность изнашивания* – отношение значения износа к обусловленному пути (наработке), на котором происходило изнашивание.

Износостойкость восстановленных деталей при испытаниях проводимых по средней для испытанных образцов интенсивности изнашивания восстановленных деталей вычисляют по формуле:

$$I = \frac{W}{L} \quad (4.2)$$

где  $W$  – линейный износ образца, м;

$L$  – длина участка трения данного образца, соответствующий линейному износу, м.

**Скорость изнашивания** – отношение значения износа  $I$  к интервалу времени  $t$ , в течение которого он возник:

$$W_{\text{изн}} = \frac{I}{t}, \frac{\text{мм}}{\text{ч}}, \frac{\text{г}}{\text{ч}} \quad (4.3)$$

**Износостойкость** – величина, обратная скорости изнашивания. Она характеризует свойство материала оказывать сопротивление изнашиванию в определенных условиях трения:

$$E = \frac{1}{W_{\text{изн}}}, \frac{\text{ч}}{\text{мм}}, \frac{\text{ч}}{\text{г}} \quad (4.4)$$

**Относительная износостойкость** – отношение износостойкости испытуемого материала  $E_2$  к износостойкости эталонного материала  $E_1$ .

$$K = \frac{E_2}{E_1}. \quad (4.5)$$

Скорость изнашивания зависит от многих факторов, основными из которых являются: - твердость поверхностей трения; - давление на трущиеся поверхности; - чистота обработки (шероховатость) трущихся поверхностей; - скорость перемещения одной поверхности относительно другой; - характер промежуточной среды – смазка; - абразивы.

#### **4.16. Факторы, влияющие на характер**

##### **и интенсивность изнашивания элементов машин**

Явление изнашивания элементов машин представляет собой совокупность взаимосвязанных процессов и обусловлено различными по своей природе фак-

торами. Для выявления полной совокупности факторов необходимо рассмотреть систему механизм - оператор - внешняя среда - режим работы - эксплуатационные воздействия.

Под механизмом в данном случае подразумевается машина в целом, сборочная единица или сопряжение в зависимости от цели исследования. В результате анализа явления изнашивания элементов машин как системы выделены следующие основные факторы, определяющие их работоспособность:

а) эксплуатационные:

- характер производимых работ;
- режимы использования механизма;
- виды и периодичность технических воздействий;
- климатические условия работы механизма;
- состояние смазочных материалов и рабочих жидкостей;
- состояние фильтрующих и уплотнительных элементов.

б) конструктивные:

- вид трения рабочих поверхностей;
- характер нагружения;
- концентрация напряжений;
- наличие защитных покрытий;
- наличие компенсаторов износа;
- кинематика и динамика работы механизма;
- соотношение материалов деталей сопряжения.

в) технологические:

- структура поверхностного слоя металла;
- методы обработки поверхности;
- наличие остаточных напряжений;
- качество сборки сопряжений;
- наличие технологических загрязнений (стружки, окалины и др.) в картерах и емкостях машины;
- показатели микрогеометрии поверхностей трения.

г) субъективные особенности оператора:

- уровень профессиональной подготовки (квалификация);

- антропометрические;

- психофизические данные (усилия, прикладываемые к рычагам управления, частота включения механизмов; быстрота реакции, утомляемость и др.).

Из эксплуатационных факторов наиболее важными являются характер производимых работ и режимы использования машины. От этих факторов зависят температурный, нагрузочный и скоростной режимы работы сопряжений, определяющие условия трения и изнашивания деталей.

Регулировочные, крепежные и смазочные операции, проводимые в процессе технического обслуживания, позволяют в значительной степени уменьшить отрицательное влияние агрессивных компонентов внешней среды и внутренних процессов, происходящих в элементах сопряжений, на работоспособность машины. Поэтому от содержания и периодичности проведения технического обслуживания во многом зависит интенсивность изнашивания деталей машины. Это особенно важно для машин, работающих в сложных климатических условиях: при повышенной влажности или запыленности окружающей среды, при низкой или повышенной температуре окружающего воздуха.

Условия трения и изнашивания элементов сопряжений машин в значительной степени определяются соответствием смазочных материалов и рабочих жидкостей конструкции сборочных единиц и условиям эксплуатации. Поэтому при проведении технического обслуживания необходимо строго соблюдать рекомендации по применению основных марок смазочных материалов и рабочих жидкостей или их заменителей, оговоренных в инструкции по эксплуатации машины. Большое значение имеет также состояние топлив, смазочных материалов и рабочих жидкостей, применяемых в соответствующих системах машин. При выходе показателей состояния за установленные пределы необходимо заменить смазочный материал или рабочую жидкость.

Важнейшими конструктивными факторами, определяющими характер и интенсивность изнашивания элементов машин, являются кинематика и динамика

работы механизма. От кинематики относительного перемещения рабочих поверхностей деталей сопряжения зависят вид трения и условия изнашивания. Динамика работы механизма обуславливает характер нагружения и формирования полей внутренних напряжений в материалах деталей. Соотношение материалов деталей сопряжения оказывает решающее влияние на их фрикционное взаимодействие и, таким образом, на работоспособность машины.

Из технологических факторов основными являются методы обработки поверхностей и качество сборки сопряжений. Метод обработки рабочих поверхностей деталей определяет структуру материалов и их физико-механические свойства, наличие остаточных напряжений, микрогеометрию поверхностей трения. От качества сборки сопряжений зависит размерная точность механизма, а также количество технологических загрязнений в картерах двигателей, коробок переключения передач, балансиров, редукторов, в баках гидросистем. Частицы стружки и окалины, попадая в зоны трения деталей, вызывают абразивное изнашивание поверхностей и значительно сокращают сроки службы сопряжений. От субъективных особенностей оператора существенно зависит интенсивность изнашивания элементов машин. От квалификации оператора зависят не только усилия, прикладываемые к рычагам управления механическими передачами, частота и продолжительность включения механизмов, но и техническое состояние машины. Своевременное и качественное проведение мероприятий ежесменного обслуживания машины квалифицированным оператором является необходимым условием наиболее полной реализации уровня надежности, заложенного в конструкцию машины при ее проектировании и производстве.

Общее количество факторов, оказывающих влияние на характер изнашивания элементов машин, составляет более сорока в зависимости от уровня сложности механизма и глубины исследования процесса изнашивания. Однако при работе механизма изменяются и оказывают решающее влияние на интенсивность изнашивания не все факторы. Для выявления наиболее значимых, определяющих факторов проводят различные исследования: эксплуатационные, по-

лигонные, лабораторные, экспертные.

Влияние каждого фактора на интенсивность изнашивания в различных условиях неравнозначно. Так, кислород воздуха оказывает решающее влияние на интенсивность разрушения поверхностей металлических деталей в условиях окислительного изнашивания, но в условиях трения в абразивной среде к числу значимых факторов не относится.

Однако из общей совокупности можно выделить ряд факторов, влияние которых проявляется достаточно ярко при любом виде изнашивания. Рассмотрим основные из них.

***Влияние температуры поверхности трения.*** От температурного режима работы сопряжения зависит интенсивность изнашивания деталей. В процессе работы механизма значительная часть энергии расходуется на нагревание поверхностей трения. Температура поверхностей трения обусловлена конструкцией сопряжения (схема фрикционного контакта, условия теплоотдачи, материалы), режимом работы механизма, состоянием и количеством смазочного материала или рабочей жидкости, а также температурой окружающей среды.

Износ и интенсивность изнашивания рабочих поверхностей деталей сопряжений для большинства материалов с возрастанием температуры увеличиваются. Это объясняется тем, что при значительном повышении температуры происходит нарушение правильности строения кристаллической решетки, в результате чего на поверхности металла образуются свободные узлы, способствующие схватыванию поверхностей. При одновременном воздействии нагрузки и температуры повышается подвижность атомов и вместе с тем возрастает вероятность схватывания с последующим повреждением поверхности.

***Влияние структуры материала и качества поверхности.*** Одним из важнейших факторов, определяющих способность сопротивления материалов изнашиванию, является их структурное состояние, обеспечиваемое на стадии производства. Оптимальная износостойкость материалов обусловлена совокупностью свойств: - физико-механических (высокое сопротивление сжатию, изгибу, значительные силы молекулярно-механического сцепления, большие

твердость и вязкость при отсутствии хрупкости и др.); - физических (большая теплопроводность, небольшие различия температурных коэффициентов расширения фаз и др.); - физико-химических (высокая насыщенность и равномерность микрораспределения легирующих элементов сплавов, устойчивость против коррозии, химическая стабильность и др.).

Для обеспечения необходимой структуры материала детали проводят химико-термическую обработку, которую применяют:

- для увеличения твердости рабочих поверхностей деталей (цементацию, азотирование, нитроцементацию, борирование и др.) и сопротивления абразивному и эрозионному изнашиванию;

- для улучшения противозадирных свойств путем насыщения поверхностных слоев металла химическими соединениями, предотвращающими схватывание при трении (сульфидирование, селенирование, теллурирование и др.).

Одним из важнейших показателей физико-механических свойств материалов деталей является твердость. Установлено, что с увеличением твердости рабочих поверхностей металлических деталей их износостойкость повышается..

Шероховатость рабочих поверхностей деталей, обеспечиваемая при их механической обработке, влияет на продолжительность приработки сопряжения, обуславливает характер взаимодействия поверхностей при трении, а также вид и интенсивность изнашивания. Износ зависит не только от окончательной, но и от предварительной обработки рабочих поверхностей деталей. В зависимости от нагрузочного и скоростного режимов обработки детали изменяется структура материала поверхностного слоя, возникают остаточные напряжения, ускоряющие процесс разупрочнения и усталостного разрушения поверхности. Высота микронеровностей поверхности оказывает сложное влияние на интенсивность изнашивания. При очень малых значениях  $R_z$  создаются благоприятные условия для схватывания и интенсивного молекулярного-механического изнашивания. С увеличением микронеровностей доля молекулярной составляющей силы трения убывает, но при этом возрастает механическая составляющая. В результате с увеличением  $R_z$  увеличивается износ поверхности. При больших

значениях высот микронеровностей и относительно малой твердости противолежащей поверхности изнашивание может принять абразивный характер.

Значительное влияние на износ деталей и, следовательно, на работоспособность машины оказывает режим приработки. Большие нагрузки на поверхности деталей в период приработки приводят к вырывам гребешков, образованию новых впадин и интенсивному износу поверхности. При очень малых нагрузках процесс приработки протекает медленно, что снижает эффективность использования машины.

Таким образом, существует оптимальный режим приработки, при котором износ поверхностей и время приработки будут невелики, а эффективность использования машины максимальна.

#### Контрольные вопросы

1. Какие виды изнашивания наиболее распространены?
2. Какой вид изнашивания является более разрушительным?
3. Какими методами можно повысить абразивную износостойкость поверхности детали?
4. У каких деталей основным является эрозионное изнашивание?
5. Объясните механизм усталостного изнашивания поверхности детали.
6. Что такое «схватывание»?
7. Перечислите виды коррозионно-механического изнашивания и дайте им краткие характеристики.
8. Перечислите основные факторы, влияющие на характер и интенсивность изнашивания деталей машин.
9. Как влияет на процесс изнашивания микронеровности сопрягаемых поверхностей?
10. Какое влияние на износ деталей и, следовательно, на работоспособность машины оказывает режим приработки?

## Глава 5. Классификация отказов техники и ее элементов

Одним из важных показателей работоспособности сельскохозяйственных транспортных и технологических машин является понятие *отказа*.

Понятие отказа можно сформулировать так: - *событие, заключающееся в утрате полного или частичного работоспособного состояния машины*.

Признаком отказа является непосредственное или косвенное воздействие на органы зрения или чувств человека явления, характерное для неработающего состояния объекта или его элементов. Например, не заводится двигатель, не перемещается груз по ленте транспортера, не осуществляется возможность переключения передач и т.д.

Все виды отказов объединяют в две группы:

- отказы функционирования;
- параметрические отказы.

*Отказы функционирования* – это такие отказы, при возникновении которых изделие не может выполнять свои функции. Например, из-за отказа редуктора не осуществляется вращение последующих элементов машины, двигатель внутреннего сгорания не заводится, насос не подает масло и т.д. Чаще всего отказ функционирования связан с поломками, деформациями или износами отдельных элементов изделия, обрывами, замыканием элементов электросхем и т.п.

*Параметрические отказы* – это отказы, характеризующие выход технических и технологических параметров (характеристик) машины за допустимые пределы. Такие отказы, как нарушение регулировок, засорение гидравлической системы, ослабление креплений под действием вибраций, течь в местах соединения шлангов, встреча с непреодолимым препятствием рабочего органа, залипание рабочих органов грунтом и другие не ограничивают возможность дальнейшего функционирования изделия. Однако машина становится в данный момент неработоспособной с точки зрения требований, установленных техническими нормативами.

Так как видов отказов и причин их вызывающих достаточно много, то виды отказов пытаются классифицировать. Разные авторы – по разному. Поэтому, приведенная ниже классификация видов отказов, одна из разновидностей. Характеристики отказов даны применительно к принятому ГОСТом понятию «объект» или его элементов.

В 1-ю группу отказов объединены отказы *по причине их возникновения*:

- конструктивные;
- производственные (технологические);
- эксплуатационные;
- деградационные.

Конструктивный отказ – отказ, возникший по причине, связанной с несовершенством или нарушением установленных правил и норм проектирования и конструирования объекта или его элементов.

Самыми распространенными причинами появления конструктивных отказов являются:

- несовершенство прочностных расчетов элементов конструкции машины, когда конструктором не учтены случайные перегрузки, величина которых значительно превышает расчетные эксплуатационные нагрузки;
- не в полной мере учитываются физико-механические свойства материалов, применяемых для изготовления деталей (неправильно выбран материал детали);
- выбранные посадки сопряжения не соответствуют условиям их работы.

Иногда конструктор сознательно допускает некоторую вероятность возникновения отказа, чтобы облегчить и удешевить конструкцию. Это конечно допустимо лишь в тех случаях, когда отказ не вызывает серьезных последствий.

*Производственный отказ* – отказ, возникающий по причине, связанной с несовершенством или нарушением установленного процесса изготовления или ремонта изделия, выполняемого на ремонтных предприятиях. Другими словами, в результате неправильных или нарушаемых технологических процессов изготовления деталей, сборки, регулировки, приработки и испытания узлов,

агрегатов или машины в целом может быть причина данного отказа. Но чаще такой отказ возникает у отремонтированных машин. В основном несовершенная ремонтная база, отсутствие необходимых запасных частей, заставляют производить собственные запасные части во многих случаях более низкого качества, чем завода-изготовителя.

Например, достаточно широко в ремонтном производстве применяется технологический процесс восстановления шеек коленчатого вала двигателя вибродуговой наплавкой под слоем флюса. В наплавленном слое возникают микротрещины, что приводит к снижению усталостной прочности наплавленного металла. И таких примеров пока можно приводить много.

*Эксплуатационный отказ* – отказ, возникающий по причине, связанной с нарушением установленных правил и условий эксплуатации машины или ее элементов.

Например, машина, изготовленная для юга, эксплуатируется на севере, применение несезонных масел, шланги гидросистемы перекручены или направлены под острыми углами, отклонение от правил технического обслуживания и т.д.

*Деградационный отказ* – отказ элементов объекта (детали, узлы, агрегаты) или объекта (машины) в целом при соблюдении всех установленных правил и норм проектирования, изготовления и эксплуатации, обусловленный естественными процессами.

К таким относятся процессы:

- изменения параметров деталей вследствие изнашивания;
- старения;
- усталости материалов деталей;
- изменения параметров деталей вследствие пластических деформаций;
- изменения физико-механических свойств материалов деталей под влиянием окружающей среды в период эксплуатации (разупрочнение, наклеп, коррозия, снижение эластичности резинотехнических изделий и т.п.).

Во 2-ю группу объединены отказы по характеру их проявления. Данные отказы подразделяются на: - постепенные; - внезапные;  
- перемежающиеся; - устойчивые.

*Постепенный отказ* – отказ, возникающий в результате возрастающей потери работоспособности его элементов. Основные причины постепенного отказа:

- износ деталей, что приводит к увеличению зазоров в сопряжениях, снижению прочности и т.п.;

- усталостное разрушение металла – появление микротрещин в структуре металла, их рост и переход в макротрещины и, как следствие, разрушение металла;

- старение металла – снижение физико-механических свойств металла, что приводит к более интенсивному износу поверхностного слоя детали и другим механическим повреждениям.

На постепенный отказ можно влиять, проводя своевременно и качественно техническое обслуживание, т. е. с помощью регулировок, смазки, замены быстроизнашивающихся деталей и других операций можно отодвигать время наступления данного отказа.

*Внезапный отказ* – отказ, характеризующий внезапный полной потери работоспособности объекта или его элементов. Примерами таких отказов могут служить поломки деталей из-за недопустимых перегрузок или неправильной эксплуатации машины. Например, прокол колеса автомобиля, поломки детали из-за внутренних дефектов и т.д.

В некоторых случаях между внезапным и постепенным отказами существует взаимосвязь – постепенное разрушение деталей от усталости металла может привести к внезапному отказу.

*Перемежающийся отказ* – многократно возникающий самоустраняющийся отказ одного и того же характера. Перемежающийся отказ устраняется без вмешательства человека. Например, отказ тормозов в результате попадания в них влаги, кратковременное засорение топливопроводов и др. Разновидностью перемежающегося отказа является сбой.

*Сбой* – самоустраняющийся отказ или однократный отказ, устраняемый незначительным вмешательством оператора.

В 3-ю группу объединены отказы по взаимосвязи и сложности их обнаружения: - независимые; - зависимые; - явные; - скрытые.

*Независимый отказ* – отказ, не обусловленный другими отказами, т.е. возникающий по любым причинам, кроме действия другого отказа.

*Зависимый отказ* – отказ, обусловленный другими отказами. Например, отказ масляного насоса приводит к заклиниванию коленвала. Отказ насоса в данном примере независимый отказ, заклинивание коленчатого вала – зависимый отказ.

*Явный отказ* – отказ, обнаруживаемый визуально или штатными методами и средствами контроля (датчики, манометры, указатели на щитке приборов и пр.) и диагностирования при подготовке объекта к применению или в процессе его применения по назначению.

*Скрытый отказ* – отказ, не обнаруживаемый визуально или штатными методами и средствами контроля, но выявленный при проведении технического обслуживания или специальными методами диагностики.

В 4-ю группу входят отказы, которые как:

- легкие; - среднетяжелые и - тяжелые.

*Легкие отказы* - не вызывают остановку объекта и могут быть устранены в удобное время. К таким отказам относят незначительную утечку гидрожидкости, разрушение прокладки, ослабление несилловых болтов.

*Среднетяжелые отказы* - вызывают немедленную остановку объекта для ремонта.

*К тяжелым отказам* - относят отказы, вызывающие отдельные значительные разрушения элементов объекта.

В 5-ю группу отказов входят отказы по сложности их устранения. Их подразделяют на 3 категории: - устраняемые путем проведения технических обслуживаний; - устраняемые путем проведения текущего ремонта; - устраняемые путем проведения капитального ремонта.

Ниже в таблице 5.1 приводится краткий перечень отказов транспортных и технологических машин и технических средств.

Таблице 5.1. Перечень отказов транспортных и технологических машин и технических средств.

Характер отказа	Элементы, выходящие из строя
Износ	Поверхности сопряжений деталей, рабочие органы.
Выкрашивание	Поверхности зубьев шестерен, роликов и втулок, цепей, колец подшипников.
Излом	Элементы трансмиссий и металлоконструкций.
Остаточная деформация	Оси, валы, зубья колес, звездочек, элементы металлоконструкций.
Трещина	В рамах несущих элементов и в элементах рабочего оборудования.
Срез резьбы	Винтовые соединения.
Срез	Шпонки.
Затупление	Режущие элементы рабочих органов.
Увеличенный люфт	Механические передачи.
Ослабление креплений	Болтовые и винтовые соединения.
Потеря упругости	Пружины.
Разрыв	Шланги, металлические трубопроводы, ремни, цепи передач.
Расслоение, растрескивание	Шланги, ленты транспортера, ремни передач.
Нарушение герметичности	Соединения в гидравлических и пневматических системах.
Вытягивание	Транспортерная лента, ремень, цепь.
Обрывы, пробой, замыкание	Элементы электропривода.
Разрегулировка	Тормоза, муфты, клапана и т. д.

Возникновение отказа обычно обуславливается структурой и свойствами материала, напряжениями, вызванными нагрузкой, и часто также температурой. Процессы, приводящие к отказам, классифицируются по ряду признаков. По месту протекания различают процессы, происходящие: в объеме материала элементов, на поверхности элемента, в сочленениях деталей (неподвижных и подвижных), в электрических цепях, связанных с взаимным влиянием элементов. Воздействующие при эксплуатации факторы влияют на возникновение отказов двояко: во-первых, они вызывают постепенное изменение характеристик и параметров элементов, во-вторых, при определенных значениях этих характеристик и параметров изменения интенсивности воздействия до некоторого критического уровня может наступить отказ элемента.

Различают воздействия, влияющие на элементы независимо от того, работают они или выключены, и воздействия, возникающие в условиях активной работы элемента.

К первым можно отнести: - влажность; - атмосферное давление;

- температуру окружающей среды; - химический состав и загрязнение среды.

Ко вторым: – напряжение и ток установившихся и переходных режимов;

- выделяющееся в элементе тепло; - механические нагрузки возникающие в самом работающем элементе при эксплуатации.

По виду изменений, вызываемых в материале воздействующими факторами, различают необратимые изменения (например, коррозия) и обратимые (например, деформация в пределах упругости металлических деталей).

По характеру изменений во времени различают воздействия постоянные, закономерно изменяющиеся во времени, и воздействия, являющиеся случайными функциями времени.

Воздействие эксплуатационных факторов связано с режимом хранения или активной эксплуатации. В устройствах, подвергающихся длительному хранению перед активной эксплуатацией, постепенное изменение свойств и характеристик элементов при хранении может иметь решающее значение. Влияние факторов, действующих при активной эксплуатации, зависит от режима эксплуатации – является ли он непрерывным, циклическим, случайным, повторно-прерывистым или одноразовым, установившимся или переходным.

По частоте отказов можно различать отказы единичные и отказы, повторяющиеся  $N$  раз за определенный период наработки. Последние могут являться следствием причин, присущих данной модели и условиям ее использования.

С точки зрения возможности восстановления работоспособности объекта можно различать отказы, устраняемые в эксплуатационных условиях или в стационарных условиях. Такое деление является условным и определяется возможностями служб ремонта, приспособленностью машины к ремонту,

По взаимосвязям между отказами существуют первичные отказы, происшедшие по любым причинам, помимо действия другого отказа, и вторичные (зависимые), вызванные действиями другого отказа (повышенный износ элементов вследствие отказа в системе смазки, повреждение деталей редуктора осколком зуба шестерни и т. п.).

По условиям возникновения различают отказы, возникшие при хранении, транспортировании, на холостом пробеге, при выполнении объектом основных функций.

По уровню внешних воздействий бывают отказы, возникающие при нормальных и ненормальных условиях эксплуатации. К последним относятся отклонение от правил техобслуживания и управления машиной, использование при недопустимых нагрузках и климатических условиях и пр.

По возможности прогнозирования выделяют: - прогнозируемые отказы, возникновение которых зависит от возраста модели или наработки; - прогнозируемые отказы, обусловленные изменением параметра изделия; - непрогнозируемые отказы.

Прогнозирование отказов первого вида осуществляется расчетным путем на основании параметров закона их распределения. В настоящее время все большее распространение находят методы прогнозирования отказов, обусловленных постепенными изменениями параметров изделия, с помощью диагностических приборов. При этом сопоставляют мгновенные, замеренные значения параметров с предельными и полученной ранее закономерностью изменения их во времени.

По характеру изменения параметров изделия различают внезапные и постепенные отказы.

*Внезапный отказ* изделия возникает в результате внезапной полной потери работоспособности (поломки от чрезмерной нагрузки, усталости и др.); постепенный отказ изделия появляется в результате возрастающей потери работоспособности его элементов (износ сочленений, рабочих органов и пр.).

По системам и агрегатам машины следует выделять отказы несущей системы (конструкции), трансмиссии, ходовой части, рабочего оборудования, электрооборудования, гидро- или, пневмосистемы, системы управления и др. Классификация по данному признаку позволяет выявить наиболее слабое место машины и наметить пути повышения ее надежности. Приведенная классификация отказов транспортных и технологических машин не является исчерпывающей.

### Контрольные вопросы

1. Какие процессы влияют на уменьшение работоспособности транспортных и технологических машин (ТТМ)?
2. Как различаются отказы в зависимости от причин возникновения?
3. По каким признакам классифицируются отказы, дайте им краткую характеристику?
4. В чем отличие понятий «отказ», «повреждение»?
5. Какое влияние оказывают факторы, возникающие при эксплуатации ТТМ на отказ?
6. Дайте характеристику физической сущности явлений, приводящих к отказу элементов ТТМ.
7. Перечислите и охарактеризуйте основные признаки отказа.
8. Каковы могут быть последствия отказов?
9. Каковы различия по характеру изменения параметров изделия внезапные и постепенные отказы?
10. Какие существуют отказы по взаимосвязям между отказами?
11. Чем обычно обуславливается возникновение отказа?
12. Перечислите перечень отказов транспортных и технологических машин и технических средств.
13. Какие виды отказов относятся к легким, средним и тяжелым отказам?
14. Что такое деградиционный отказ?
15. Что такое постепенный и внезапный отказ?

## Глава 6. Показатели и нормирование надежности

### 6.1. Виды показателей надежности

*Показатель надежности* – количественная характеристика одного или нескольких свойств, составляющих надежность объекта.

*Единичный показатель надежности* – показатель надежности, характеризующий одно из свойств, составляющих надежность объекта.

*Комплексный показатель надежности* – показатель надежности, характеризующий несколько свойств, составляющих надежность объекта.

*Расчетный показатель надежности* – показатель надежности, значение которого определяются расчетным путем.

*Экспериментальный показатель надежности* – показатель надежности, точечная или интервальная оценка которого определяется по данным испытаний.

*Эксплуатационный показатель надежности* – показатель надежности, точечная или интервальная оценка которого определяется по данным эксплуатации.

*Нормирование надежности* – установление в нормативно-технической и (или) конструкторской документации количественных и качественных требований к надежности.

*Нормируемый показатель надежности* – показатель надежности, значение которого регламентировано нормативно-технической и конструкторской документацией на объект.

### 6.2. Оценочные показатели надежности

Надежность сельскохозяйственных транспортных и технологических машин характеризуется 4-мя показателями:

1. Безотказность;
2. Долговечность;
3. Ремонтопригодность;
4. Сохраняемость.

По ГОСТ 27.002 "Надежность в технике" надежность объекта оценивается техническими параметрами. Однако испытатели и эксплуатационники транс-

портных и технологических машин вводят дополнительные технико-экономические или только экономические параметры оценки свойств надежности данных машин.

На основании единичных оценок надежности машины и ее элементов заводы-изготовители и ремонтные предприятия повышают качество изделия. Исходя из комплексных оценок надежности, предприятие-потребитель конкретной машины оценивает целесообразность ее приобретения, планирует ее загрузку, затраты труда и средств на техническое обслуживание и ремонт.

Число оценочных показателей надежности машины и ее элементов зависит от конструктивных особенностей машины, условий ее эксплуатации и других факторов. Поэтому их число для различных машин может меняться. Но основными оценочными показателями надежности сельскохозяйственных транспортных и технологических машин приняты:

1) *оценочные показатели безотказности:*

- вероятность безотказной работы –  $P(H)$ ;
- средняя наработка на отказ –  $H_{\text{ср}}^{\text{от}}$ ;
- интенсивность отказа –  $\omega$ ;
- параметр потока отказов –  $\omega_0$ ;
- средние удельные затраты времени –  $B_6$ , труда –  $T_6$  и денежных средств

$D_6$  на устранение отказов.

2) *оценочные показатели долговечности:*

- средний ресурс –  $T_{\text{ср}}^p$ ;
- гамма-процентный ресурс –  $T_{(\gamma\%)}^p$ ;
- средний срок службы –  $T_{\text{ср}}^{\text{с.с}}$ ;
- средние удельные затраты времени –  $B_d$ , затраты труда –  $T_d$  и денежных средств –  $D_d$  на устранение эксплуатационных и ресурсных отказов.

3) *оценочные показатели ремонтпригодности:*

- вероятность восстановления объекта в заданное время –  $P(\tau)$ ;
- среднее время восстановления объекта –  $\tau_{\text{ср}}$ ;
- средняя трудоемкость восстановления объекта после отказа –  $S_{\text{ср}}^B$ .

- средние удельные затраты времени –  $V_{\text{рем}}$ , труда –  $T_{\text{рем}}$  и денежных средств –  $D_{\text{рем}}$  на проведение технического обслуживания и устранение эксплуатационных и ресурсных отказов.

4) *оценочные показатели сохраняемости:*

- средний срок сохраняемости  $C^{\text{ср}}$ ;
- гамма-процентный срок сохраняемости –  $C_{(\gamma\%)}$ ;

5) *комплексные показатели надежности:*

- коэффициент технического использования –  $K_{\text{ти}}$ ;
- коэффициент готовности –  $K_{\text{г}}$ .

Данный коэффициент определяется как отношение времени пребывания объекта в работоспособном состоянии за некоторый период эксплуатации к суммарному времени пребывания объекта в работоспособном состоянии и простоев, за счет проведения технических обслуживаний и ремонтов.

$$K_{\text{ти}} = \left( \frac{T_{\text{раб. состоян}}}{T_{\text{раб. состоян}} + T_{\text{простоя}}} \right) \quad (6.1)$$

Данный коэффициент – это вероятность того, что объект окажется в работоспособном состоянии в произвольный момент времени, кроме планируемых периодов, в течении которых применение объекта по назначению не предусмотрено.

Для определения конкретных значений показателей надежности производится сбор и обработка информации о них.

#### Контрольные вопросы.

1. Перечислите виды показателей надежности.
2. Виды эксплуатационный показатель надежности
3. Перечислите оценочные показатели надежности
4. Что означает нормирование надежности?
5. Что означает нормируемый показатель надежности?
6. Что означает единичный и комплексный показатель надежности?
7. Какие есть оценочные показатели безотказности и долговечности?
8. Какие есть ремонтпригодности и сохраняемости?
9. Что такое коэффициент технического использования?

## **Глава 7. Система сбора информации о надежности технических средств и транспортно-технологических машин в период эксплуатации**

### **7.1. Цель и задачи сбора информации**

Сбор информации о надежности сельскохозяйственных транспортных и технологических машин и их элементов (агрегатов, узлов, деталей) осуществляется для:

- а) усовершенствования конструкции, технологии изготовления, сборки и испытания машин, обеспечивающих повышение надежности;
- б) разработка мероприятий по совершенствованию диагностирования, технического обслуживания и ремонтов;
- в) повышению качества ремонтов и снижению затрат на их проведение;
- г) оптимизации расхода запасных частей.

Условия эксплуатации определяются характером местности, климатическими и грунтовыми условиями, характером выполняемых работ, принятой системой технического обслуживания и ремонтов.

Для сбора информации о надежности объекта предусмотрены журналы учета наработок, неисправностей и отказов машин.

Система сбора информации о надежности объектов в период их эксплуатации должна обеспечить получение полных и объективных данных.

Сбор информации должен проводиться специалистами, которые хорошо знакомы с основами теории надежности и математической статистики, конструкцией и технологией изготовления машин, а также правилами их технической эксплуатации.

Основными задачами системы сбора и обработки информации являются:

- нахождения причин возникновения отказов и неисправностей;
- определение оценочных показателей надежности машины и ее элементов;
- выявления конструктивных и технологических машин, приводящих к снижению их надежности;

- выявление деталей и сборочных единиц, лимитирующих надежность машин в целом;
- изучение закономерностей возникновения неисправностей и отказов;
- установления влияния условий и режимов эксплуатации на надежность машин;
- корректировка нормируемых оценочных показателей надежности;
- обоснование норм расхода запасных частей, структуры ремонтного цикла и периодичности проведения технического обслуживания и ремонтов машин;
- определение эффективности мероприятий по повышению надежности машин и их элементов.

Информация о надежности транспортных и технологических машин поступает из различных источников – лабораторий, проводящих стендовые испытания опытных образцов, с заводов, полигонов, машиноиспытательных станций, хозяйств, где машины проходят опытную эксплуатацию. Важным источником о надежности машин в гарантийный период эксплуатации являются рекламации.

Сбор информации о надежности регламентированы РД 50-204-87 и ГОСТ 27.502. Выбор метода получения информации зависят от характера поставленных задач и условий эксплуатации, под которыми подразумеваются совокупность факторов, действующих на машину в процессе работы.

К условиям эксплуатации относят квалификацию обслуживающего персонала, обеспеченность горюче-смазочными материалами и запасными частями, а самое главное, климатические и почвенные условия. Влияние условий эксплуатации на надежность машин очень существенно.

Основными методами сбора информации о надежности машин являются инструментальный метод, метод хронометража, метод периодических наблюдений, метод, основанный на анализе данных эксплуатационной и ремонтной документации.

Наиболее полную и объективную информацию позволяет получить *инструментальный метод*.

Для сбора информации используют контрольно-измерительную аппаратуру и самопишущие приборы, устанавливаемые на контрольную машину. Однако, данный метод имеет ряд недостатков:

- необходимость оснащения машины дорогостоящей аппаратурой;
- ограниченный объем выборки наблюдаемых машин;
- организационные трудности, связанные с установкой аппаратуры и поддержанием ее в исправном состоянии;
- высокая стоимость исследований.

При хронометражном наблюдении определяется чистое время работы элементов машины и оценка интенсивности использования машины в течении смены, а также определение таких показателей как наработка на отказ, средняя наработка до отказа, продолжительность проведения технических обслуживаний и ремонтов. При сборе информации этот метод достаточно широко применяется совместно с другими методами.

Метод периодических наблюдений применяется в тех случаях, когда установить постоянное наблюдение за машиной или группой машин не представляется возможным из-за удаленности объекта (объектов). Информация собирается на основании опроса машинистов и результатов периодической технической экспертизы машины. Основным недостатком данного метода является низкая достоверность получаемых результатов.

Достаточно широко применяется метод сбора информации, основанный на анализе данных эксплуатационной и ремонтной документации. На основании данных нарядов можно получить объективную информацию о наработке, о ресурсе или сроке службы до текущего или капитального ремонта машины.

## **7. 2. Методика проведения экспертного опроса**

Сущность метода экспертных оценок заключается в проведении экспертами интуитивно-логического анализа проблемы с количественной оценкой суждений и формальной обработки результатов.

Комплексное использование интуиции, логического мышления и количественных оценок с их формальной обработкой позволяет получить эффектив-

ное решение проблемы. При выполнении своей роли эксперты выполняют следующие основные функции:

- формируют и уточняют основные и частные факторы, определяющие уровень технической эксплуатации сельскохозяйственных машин;
- проводят измерение характеристик факторов.

Не каждый специалист может быть экспертом. Он должен обладать определенными способностями:

- видеть и формулировать насущные проблем и альтернативные пути их решения;
- решать проблемы, метод решения которых полностью или частично неизвестен;
- противопоставлять предубеждениям и массовым мнениям, имеющим определенную инерцию, собственное, независимое;
- видеть проблему с различных точек зрения.

Помимо этого эксперт должен обладать глубокими знаниями и опытом практической деятельности в исследуемой области.

Для выбора экспертов необходимо провести оценку компетентности экспертов, которая оценивается коэффициентом компетентности  $K$ , вычисляемый на основе суждений эксперта о степени своей информированности по решаемой проблеме. Коэффициент компетентности вычисляется по формуле:

$$K = \frac{1}{2}(R_{и} + R_{о}), \quad (7.1)$$

где  $R_{и}$  - коэффициент информированности по проблеме, получаемой на основе самооценки эксперта по 10-ти балльной шкале;

$R_{о}$  - коэффициент аргументации, получаемой в результате суммирования баллов по эталонной таблице 7.1.

При этом: - если  $R_{о} = 1,0$ , то степень влияния всех источников высокая;

- если  $R_{о} = 0,8$  – то средняя; - если  $R_{о} = 0,5$  – то низкая.

Коэффициент компетентности  $0 < R_{о} \leq 1$ .

Таблица 7.1. Определение коэффициента аргументации

Источник аргументации	Степень влияния источника на Ваше мнение		
	Высокое	Среднее	Низкое
Проведенный Вами теоретический анализ	0,3	0,2	0,1
Ваш производственный опыт	0,5	0,4	0,2
Обобщение работ отечественных авторов	0,5	0,5	0,5
Обобщение работ зарубежных авторов	0,5	0,5	0,5
Ваша интуиция	0,5	0,5	0,5

Достоверность экспертизы в значительной мере зависит от числа экспертов, определяемого по формуле:

$$R = \frac{1}{E} \frac{2,8}{L(N - 1)}, \quad (7.2)$$

где E - абсолютная погрешность; L - уровень доверительной вероятности; N - число ранжированных фактов.

Например, при E = 0,05, L = 0,95 и N = 5 число экспертов равно 15 человек.

Для уточнения и определения весомостей обобщенных и частных факторов экспертам дается опросный лист. От экспертов требуется оценить факторы по 10-ти бальной шкале.

В таблице 7.2 представлена оценка в баллах важности обобщающих факторов на повышение уровня технической эксплуатации, полученных от 15 экспертов. Как видно из приведенной таблицы эксперты считают, что на уровень технической эксплуатации машинотракторного парка в основном играют первые три обобщенные факторы и в меньшей степени остальные два фактора.

Показателем обобщенного мнения может служить среднее статистическое значение оценки определенного фактора, определяемого в баллах или в виде коэффициентов весомостей.

Оценка n-го фактора в баллах:

$$P = \sum_{k=1}^K \frac{C_{kn}}{K}, \quad (7.3)$$

где C<sub>kn</sub> - оценка R-м экспертом важности n-го фактора;

K - число экспертов.

Таблица 7.2 Оценка важности обобщающих факторов (баллы)

Основные факторы	Номера экспертов														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Качество проведения ТО	10	9	10	9	10	9	10	10	9	9	10	9	9	10	10
Качество проведения текущего ремонта	7	6	6	8	10	6	7	6	7	6	6	7	6	7	7
Качество применяемых ТСМ	7	7	6	7	6	6	6	7	7	7	6	5	5	6	8
Квалификация машинистов	10	4	8	6	7	5	5	7	6	5	5	4	7	7	7
Качество хранения машин	4	4	8	4	7	4	3	4	5	4	4	3	4	5	5

При известном качественном распределении частных факторов по ранжиру вопрос о нормировании веса частных факторов решается с помощью нормирующей функции. Степень согласованности мнений экспертов по всем обобщающим и частным факторам оценивается следующим коэффициентом:

$$W = \frac{12 \sum_{n=1}^N (S_n - \bar{S})^2}{K^2(N^3 - N) - K \sum_{k=1}^k Tk}, \quad (7.4)$$

где  $S_n = \sum_{k=1}^k Rkn$  – сумма рангов, присвоенных экспертами n-му фактору;

$Rkn$  – ранг n-го фактора, назначенный k-м экспертом;

$\bar{S} = \frac{1}{N} \sum_{N=1}^N S_n$  – среднее значение суммы рангов;

$Tk = \sum_{N=1}^{mk} (t^3_{km} - mk)$  – время совпадений мнений экспертов;

$t_{km}$  – число одинаковых рангов m-го типа в оценках k-го эксперта;

$mk$  – число видов факторов с совпавшими рангами в оценках эксперта.

Данный коэффициент изменяется в пределах от нуля до единицы, причем  $W=1$  соответствует полной согласованности мнений экспертов.

В качестве количественной оценки степени этой случайности используется уровень значимости коэффициента, который оцениваемый по критерию Пирсона  $\chi^2$ .

$$\chi^2 = \frac{12 \sum_{n=1}^N (S_n - \bar{S})^2}{KN(N + 1) - \sum_{k=1}^k \frac{Tk}{N - 1}}. \quad (7.5)$$

Если табличное значение критерия для 5%-ного уровня значимости при числе степеней свободы  $m = N - 1$  меньше расчетного,  $\gamma^2_{расч.}$  то гипотеза о наличии согласия экспертов при ранжировании факторов принимается.

Алгоритм метода экспертных оценок включает следующие основные этапы:

1. Определение нормированных оценок, данных экспертами:

$$B_{kp} = \frac{C_{kp}}{\sum_{n=1}^N C_{kp}}, \quad (7.6)$$

2. Определение средних значений весовых коэффициентов для каждого фактора:

$$B_n = \frac{1}{k} \sum_{k=1}^k B_{kn}, \quad (7.7)$$

3. Определение среднеквадратических отклонений весовых коэффициентов:

$$n = \sum_{k=1}^k (B_{kn} - \overline{B_n})^2 \frac{1}{K}, \quad (7.8)$$

4. Определение коэффициента вариации:

$$W_n = \frac{n}{B_n}, \quad (7.9)$$

5. Переход от таблицы оценок в баллах к таблице рангов. Процедура перехода состоит в том, что каждому фактору, имеющему наибольшую оценку в баллах, присваивается первый номер (ранг), фактору с наименьшей оценкой - последний. Фактором, имеющим одинаковые оценки, назначается одинаковый ранг.

6. Определение суммы совпавших рангов для каждого эксперта:

$$T_k = \sum_{m=1}^{Mk} (t_{km}^3 - t_{km}), \quad (7.10)$$

7. Определение общей суммы совпавших рангов:

$$\sum_{k=1}^k T_k \quad (7.11)$$

8. Определение суммы рангов для каждого фактора:

$$S_n = \sum_{k=1}^k R_k, \quad (7.12)$$

9. Определение средних значений сумм рангов по всем факторам:

$$\bar{S} = \sum_{n=1}^N \frac{Sn}{N}, \quad (7.13)$$

10. Вычисление квадратических отклонений сумм рангов от и среднего значения:

$$\bar{B} = (Sn - \bar{S})^2, \quad (7.14)$$

11. Определение суммы квадратических отклонений:

$$\sum_{n=1}^N B = \sum_{n=1}^N (Sn - \bar{S})^2, \quad (7.15)$$

12. Определение величины  $\chi^2_{\text{расч.}}$  критерия Пирсона по формуле (7.5).

13. Определение числа степеней свободы:

$$m = N - 1 \quad (7.16)$$

14. Определение табличного значения критерия Пирсона  $\chi^2_{\text{т.}}$  для заданного числа степеней свободы  $m$  и 5%-го уровня значимости и сравнение  $\chi^2_{\text{т.}}$  с расчетным  $\chi^2_{\text{расч.}}$ .

#### Вопросы для самоконтроля

1. Перечислите основные цели сбора информации о надежности машин.
2. Назовите источники информации о надежности машин.
3. Назовите формы учетной документации для сбора информации о надежности машин.
4. В чем особенности инструментального метода сбора информации.
5. В каких случаях используют метод хронометража при сборе информации о надежности машин.
6. Когда применяется метод периодических наблюдений.
7. В чем особенность метода сбора информации о надежности машин, основанного на анализе данных эксплуатационной и ремонтной документации.
8. В чем сущность методики экспертного опроса.
9. Как определяется количество экспертов?

## Глава 8. Методы обработки информации о надежности

Так как показатели надежности технических систем и транспортно- технологических машин величины случайные, то их рекомендуется рассчитывать методами математической статистики или теориями вероятностей. При этом величину каждого показателя надежности необходимо оценивать не только средним значением, но и по доверительными границами его рассеивания, а также с учетом относительной ошибки переноса результатов расчета на другие однотипные машины, эксплуатируемые в других условиях.

Самым распространенным методом обработки экспериментальных данных полученной информации по результатам испытаний или наблюдений в период эксплуатации машины или ее элементов производится *методом математической статистики*. По опытным данным строят эмпирические кривые и вычисляют численные характеристики эмпирического распределения изучаемых параметров показателя надежности. Но данный метод имеет один существенный недостаток. Полученные численные характеристики эмпирического распределения изучаемых параметров показателя надежности, действительны и отражают закономерности изменения изучаемого параметра показателя надежности только для конкретной группы испытуемых или наблюдаемых объектов (машин). И нельзя переносить полученные закономерности изменения изучаемого параметра показателя надежности на другие однотипные объекты, испытываемые и наблюдаемые в других условиях или местах.

Для обобщения и переноса полученных эмпирических зависимостей изучаемого параметра показателя надежности на имеющиеся однотипные объекты (машины) обработку полученных данных испытаний или наблюдений производят *вероятностным методом*. Используя данные обработки имеющейся информации методом математической статистики, выдвигают одну или несколько гипотез о функции плотности случайной величины исследуемого параметра показателя надежности, исходя из внешнего вида экспериментальных кривых и численных значений их характеристик распределения.

Эмпирическая кривая выравнивается по одной или последовательно по нескольким принятым теоретическим кривым (законам) и сравнивают их по одному из критериев согласия.

При достаточно большом объеме информации закономерности, свойственные конкретному параметру показателя надежности, будут выявляться очень точно.

На практике же всегда приходится иметь дело с ограниченным объемом информации. В связи с этим результаты обработки ограниченного объема информации всегда содержат больший или меньший элемент случайности. Необходимо определить, какие изменения изучаемого параметра показателя надежности относятся к постоянным, устойчивым и действительно присуще данному показателю, а какие изменения изучаемого параметра являются случайными, только за счет ограниченного объема информации. Естественно, к методике обработки данных при ограниченной информации предъявляются такие требования, чтобы она, по возможности, сохраняла типичные, характерные изменения изучаемого параметра и отбрасывала все несущественное, второстепенное, связанное с недостаточным объемом представленного материала.

Теоретические законы распределения изучаемых параметров надежности машин позволяют производить расчеты характеристик показателей надежности применительно к всему парку машин или ее элементов конкретных конструкций (марок), а следовательно, и к любому частному объему данных машин.

Часто при обработке данных представленной информации об изменении изучаемого параметра показателя надежности не возникает вопрос об определении теоретического закона изменения данного параметра надежности. Характер закона уже известен по различным причинам (из теоретических расчетов или от подобию проводимых испытаний и т.д.). Возникает более узкая задача обработки данных испытаний или наблюдений – определить параметры (или коэффициенты), характеризующие выбранный закон, и числовые характеристики в любом интервале принятого закона.

Замена опытных закономерностей, выявленных на основании данных информации методом математической статистики теоретическим законом, в теории вероятности называется процессом выравнивания (сглаживания) статистической информации.

В теории надежности для транспортных и технологических машин и технических средств, для выравнивания опытной статистической информации используются большое количество различных законов распределения.

Чаще всего эмпирические закономерности заменяются такими законами распределения как нормальный (Гаусса), логарифмически-нормальный, экспоненциальный, гамма-распределения, Пуассона, Вейбулла, Стьюдента и др. В подавляющем большинстве случаев для сельскохозяйственных транспортных и технологических машин используют законы нормального распределения (ЗНР), распределения Вейбулла (ЗРВ).

*Закон нормального распределения* рекомендуется применять:

- при изучении износа деталей и других постепенных отказах;
- при определении времени восстановления ремонтируемых изделий.

*Закон распределения Вейбулла:*

- при усталостном разрушении металла деталей;
- для сложных изделий с большим количеством разнообразных элементов;
- при определении наработки до отказа невосстанавливаемых изделий.

Каждый закон определяется двумя функциями – дифференциальной (плотность вероятностей) и интегральной (функция распределения). Он имеет свою область применения, свои параметры и расчетные уравнения, свои заранее составленные таблицы, упрощающие расчеты.

### **8.1. Понятие о статистической совокупности, генеральной совокупности и выборке**

Как известно, в математической статистике данные информации представляют собой случайные величины. Случайной величиной называют величину, которая в результате испытаний или наблюдений в процессе эксплуатации изделия может принимать различные значения. Случайные величины, которые

принимают лишь определенные значения, называются дискретными. А случайные величины, принимающие любые значения в некотором интервале, называются непрерывными.

*Пример.* Для определения содержания углерода были отобраны 10 отливок. Получен следующий ряд значений содержания углерода в отливках в % в порядке возрастания его содержания: 0,5; 1,8; 1,9; 2,0; 2,0; 2,2; 2,4; 2,6; 2,7.

В данном примере случайной дискретной величиной является процент содержания углерода. Они образуют, так называемую, совокупность объема  $N = 10$ .

*Совокупность* – это множество изучаемых объектов (машин), связанных общими характерными чертами, общими существенными признаками. В математической статистике принято оперировать понятиями:

- статистическая совокупность (чаще ее называют "частная совокупность") – когда число информации о изучаемом факторе, например, о каком-то свойстве надежности машины, невелико и все данные информации участвуют в математической обработке.

- генеральная совокупность – когда число информации очень и очень велико и для обработки данной информации производится выборка из этой информации небольшого числа данных информации и в математической обработке участвует только данная выборочная совокупность.

Другими словами, совокупность однородных объектов, которая изучается выборочным методом, называется генеральной совокупностью. А выборкой называется совокупность случайно отобранных объектов из генеральной совокупности.

Для получения надежных результатов при расчетах выборочная совокупность должна иметь достаточно большой объем изучаемых объектов. Например, если из 1000 деталей отобрано для обработки 100 деталей, то объем генеральной совокупности  $N = 1000$ , а объем выборки (выборочная совокупность)  $n = 100$ .

### Контрольные вопросы

1. Назовите методы обработки экспериментальных данных.
2. Какие требования применяются к обработке экспериментальных данных при ограниченной информации?
3. Что подразумевается под процессом выравнивания опытной статистической информации?
4. Назовите основные теоретические законы, используемые при обработке экспериментальных данных для с/х машин.
5. Какими функциями определяются теоретические законы.
6. Что такое «статистическая совокупность»?
7. В чем отличие статистической совокупности от генеральной?
8. В каких случаях рекомендуется применять закон нормального распределения?
9. В каких случаях рекомендуется применять закон распределения Стьюдента?
10. В каких случаях рекомендуется применять закон распределения Вейбулла?

## Глава 9. Испытания технических систем и транспортно-технологических машин на надежность

### 9.1 Цели и задачи испытаний

Основная цель испытаний транспортных и технологических машин и их элементов (агрегатов, узлов, деталей) на надежность – определить уровень надежности машины и оценить его числовыми показателями. Знание уровня надежности машины и его зависимости от основных факторов при изготовлении и эксплуатации машины позволяет решать такие вопросы, как выявление слабых узлов и агрегатов, охарактеризовать применяемую схему проведения технического обслуживания и ремонта, оценить качество технологического процесса изготовления машины и т. д.

Результаты испытания дают сведения о надежности машины с большей или меньшей полнотой степени достоверности. В ряде случаев из-за сложности и продолжительности испытаний невозможно оценить уровень надежности в абсолютных значениях, а лишь сравнить его в относительных показателях применительно к прототипу. Испытание может дать ответ во сколько раз, например, возрастает безотказность или долговечность новой машины, работающей в аналогичных условиях, что и прототип, не решая вопроса о действительном уровне надежности.

Информация о надежности машины и ее элементов может быть получена не только в результате испытаний, но и по данным эксплуатации машины или ее составляющих. Для этих случаев введен термин "наблюдение".

Испытания на *надежность* подразделяются на *исследовательские*, проводимыми для изучения факторов, влияющих на надежность и *контрольные*, цель которых - оценка уровня надежности конкретной машины. По месту проведения испытаний они могут быть стендовыми, полигонными и эксплуатационными. При проведении контрольных испытаний на надежность рекомендуют подразделять их на испытания на безотказность, ремонтпригодность, долговечность и сохраняемость.

Испытания *на безотказность* сводятся к контролю вероятности безотказной работы машины, агрегата, узла за *установленное время или заданную наработку*.

Испытания *на ремонтпригодность* обычно проводятся для определения *среднего времени восстановления* или *вероятности восстановления работоспособности* машины или ее элементов также за *установленное время или наработку*.

Испытания *на долговечность* предназначаются для *контроля среднего* или *гамма-процентного ресурса*.

Испытания *на сохраняемость* предусматриваются для контроля *вероятности сохранения* машины при соответствующей технологии ее консервации в *течение заданного срока*.

*Стендовые* испытания обеспечивают *постоянное* наблюдение за процессом потери работоспособности машиной, агрегатом, узлом или сопряжением.

При разработке методики стендовых испытаний стремятся к тому, чтобы режимы и условия испытаний в наибольшей степени соответствовали эксплуатационным. Стендовые испытания продолжаются обычно до тех пор, пока не возникнет отказ или пока машина, агрегат, узел или сопряжение не проработают заданного срока без отказа.

*Полигонные* испытания предназначены для получения данных о надежности машины при длительных наиболее тяжелых условиях эксплуатации. Такие испытания относятся к категории ускоренных испытаний, что приводит к значительной экономии материальных и денежных средств при проведении испытаний.

*Эксплуатационные* испытания позволяют выявить недолговечные элементы машины, правильность взаимодействия узлов и механизмов и их работоспособность в реальных условиях использования машины.

*Объектом испытаний могут быть:* - образцы, если испытываются свойства материалов, определяющие долговечность машины (испытания на износостойкость, усталостную прочность, коррозионную стойкость и т.д.);

- детали, сопряжения и кинематические пары – для учета влияния конструктивных и технологических факторов на срок службы данных сопряжений (испытания подшипников, зубчатых колес, шарниров и др.);

- изделие (машина, агрегат) в целом, когда учитывается взаимодействие всех механизмов и узлов, условия его эксплуатации и режимы работы.

Испытания машины в целом производится:

а) при приемо-сдаточном контроле на заводе-изготовителе;

б) периодически с целью проверки правильности выполнения технологического процесса изготовления машины и условия ее эксплуатации;

в) после внесения изменений в конструкцию или технологию изготовления для проверки эффективности внесенных изменений;

г) сравнения качества машин, выпущенных в разное время.

В таблице 9.1 представлены виды испытаний, проводимых при контроле показателей надежности.

Таблица 9.1. Виды испытаний, проводимых при контроле показателей надежности.

Показатели надежности	Испытания				
	предварительные	приемочные	квалификационные	приемо-сдаточные	периодические
Безотказность	Н, У	Н, У	Н, У	Н	Н, У
Ремонтопригодность	У	У	У	--	У
Долговечность	Н, У	Н, У	--	--	Н, У
Сохраняемость	Н, У	Н, У	--	--	Н, У

*Примечание.* Н – нормальные; У – ускоренные; -- не проводят

## 9.2. Планы испытаний на надежность машин

Для того, чтобы была единая методика испытаний ГОСТом 17504 предусмотрены различные планы испытаний изделий (машины, агрегата, узла, детали) на надежность.

Каждый план имеет свою символику, которая состоит из следующих 3-х букв, при этом буква N входит в символику любого плана:

N – число изделий, поставленных под наблюдение;

T – установленная наработка или календарное время продолжительности

наблюдений;

*Например*, изделию установлено выработать 800 моточасов или отработать 100 дней. Изделие будет снято с испытаний после выработки установленной наработки или установленного количества дней, хотя у нее может и *не произойти отказ*.

$r$  – заранее заданное число отказов у каждого испытываемого изделия или заранее установленное число отказавших изделий, до достижения которых испытания прекращаются;

$U$  – отказавшие изделия снимаются с испытаний (наблюдений);

$R$  – отказавшие изделия или отдельные узлы изделия *заменяются новыми* и испытания продолжаются;

$M$  – отказавшие изделия или отдельные узлы восстанавливаются и вновь испытываются.

В таблице 9.2. приводятся варианты планов испытания на надежность.

Таблица 9.2. Варианты планов испытания на надежность.

Условия прекращения испытания	Планы испытаний на надежность		
	Объекты $U$ не заменяются	Объекты $R$ заменяются	Объекты $M$ восстанавливаются
$T$	$N, U, T$	$N, R, T$	$N, M, T$
$r$	$N, U, r$	$N, R, r$	$N, M, r$
$r$ или $T$	$N, U, (r, T)$	$N, R, (r, T)$	$N, M, (r, T)$

*Примеры расшифровки планов.*

1.  $N U T$  – при испытании заранее задается величина наработки или календарное время продолжительности испытаний ( $T$ ), которую должны выработать  $N$  изделий.

Изделия, не достигшие заданной величины наработки или не проработавшие установленное время из-за *первого* отказа, снимаются с испытания (исключаются из наблюдения в период эксплуатации) и *не заменяются новыми* ( $U$ ). При таком плане испытаний или наблюдений неработоспособное состояние будет зарегистрировано только у части изделий. Полученная при таком плане испытаний (наблюдений) информация называется *усеченной*.

При использовании плана N U T возможны случаи преждевременного снятия с наблюдения некоторых исправных изделий, наработка которых не достигла заданных значений, например, передача изделий в другие организации, аварии с отдельными изделиями. В этом случае информация будет не только усеченной, но и с, так называемыми, "выпадающими точками".

Такая информация называется *многократно-усеченной*, а преждевременно снятые с наблюдения исправные изделия – *приостановленными*.

2. N R r - при испытании (наблюдении) заранее устанавливается *число отказов* у каждого испытуемого изделия или заранее устанавливается *число отказавших изделий* R. При достижении либо заранее принятого числа отказов у каждого изделия, либо заранее принятого числа отказавших изделий, испытания (наблюдения) прекращаются. Изделия, которые имели отказы до достижения заданного числа r, заменяются новыми и испытания (наблюдения) продолжаются R.

3. N M T – при испытании (наблюдении) заранее задается величина наработки или календарное время продолжительности испытания (наблюдения) (T), которую должны выработать N изделий,. Отказавшие изделия восстанавливаются и вновь испытываются (M).

4. N U N – испытания (наблюдения) продолжаются до тех пор пока не откажет последнее изделие.

Данный план используют главным образом при сборе информации о технических ресурсах и сроках службы изделия (элементов) относительно небольшой долговечности. При таком плане наблюдений можно получить наиболее точную информацию, которая называется *полной*.

5. N U r – отказавшие изделия не заменяются новыми или отремонтированными (U). Испытания прекращаются по достижении заданного количества отказов или заданного количества отказавших изделий R.

Выбор планов испытаний (наблюдений) осуществляется в зависимости от типа изделия, условий его эксплуатации с учетом экономической целесообразности и технической необходимости. Но самым главным условием выбора типа

плана испытаний или наблюдений является выбор оценочных показателей надежности изучаемых изделий:

- безотказности изделия,
- долговечности изделия.

Оценочные показатели *безотказности* транспортных и технологических машин определяются в большинстве случаев по планам N R T или N R r, при которых у всех испытуемых (наблюдаемых) машин производят многократное устранение всех отказов, не снимая при этом машины с испытаний (наблюдений). При таких планах на всем этапе испытаний (наблюдений) количество машин остается постоянным.

Оценочные показатели *долговечности* (доремонтной или межремонтной) транспортных и технологических машин или их элементов определяются, как правило, при испытаниях (наблюдениях) по планам N U N, N U T, N U r.

Наиболее полную информацию о надежности изделия дают испытания (наблюдения) по плану N U N. Но недостатком этого плана является неизвестная длительность, что затрудняет планирование затрат рабочей силы и использования испытательного и иного оборудования. Этим же недостатком страдают и планы с символом - r.

Преимуществом испытаний по планам типа T является заранее известная их длительность. Это позволяет до начала испытаний установить потребность в рабочей силе и необходимом оборудовании.

### **9.3. Методика планирования испытаний по плану N U T**

В практике применения планов испытаний чаще используют план типа N U T, потому что потребитель (заказчик) заранее обговаривает с конструктором (исполнителем) длительность эксплуатации изделия либо через определенную величину наработки данным изделием, либо календарным временем эксплуатации этого изделия.

Испытания по плану N U T с фиксированным T позволяют выявить показатели надежности изделия за заданное значение T. При оценке продолжительности работы каждого испытуемого изделия за период T ( $T_{\text{задан}}$ ) в общем случае мо-

гут быть три типа случайных значений выработанной наработки или календарного времени работы изделия:

- *условная* реализация изделия;
- *неполная* реализация изделия;
- *полная* реализация изделия.

*Условная* реализация изделия своей надежности – это когда изделие выработало заданное планом значение наработки или установленный планом календарный срок, а потери работоспособности изделия не произошло. Здесь о сроке службы (наработке) данного изделия известно, что его надежность превышает надежность, установленную значением  $T_{\text{задан}}$ .

*Неполная* реализация изделия своей надежности – это когда изделие снимается по каким-то причинам с испытаний (наблюдений).

*Полная* реализация изделия своей надежности – это когда изделие выработала какую-то наработку или проработало какое-то время, потеряв работоспособность (произошел отказ изделия) до установленного значения  $T_{\text{задан}}$ .

При анализе планов испытаний (наблюдений) и статистической обработке данных информации удобно применять графическое изображение результатов испытаний (наблюдений).

Из графика (рис.9.1) видно, что из 15 машин, испытания которых проведены по плану N U T при длительности испытаний  $T_{\text{задан}}$ , пять машин (4, 6, 7, 10 и 13) проработали без отказа за весь период испытаний. Для этих 5-ти машин принято считать условную реализацию изучаемого показателя их надежности. Три машины (рис. 9.1) были сняты с испытания по каким-то причинам до их отказа – для них считается неполная реализация изучаемого показателя надежности. А остальные машины проработали до отказа различные сроки – считается, что они показали свою величину изучаемого показателя надежности, т.е. реализовались полностью (полная реализация).

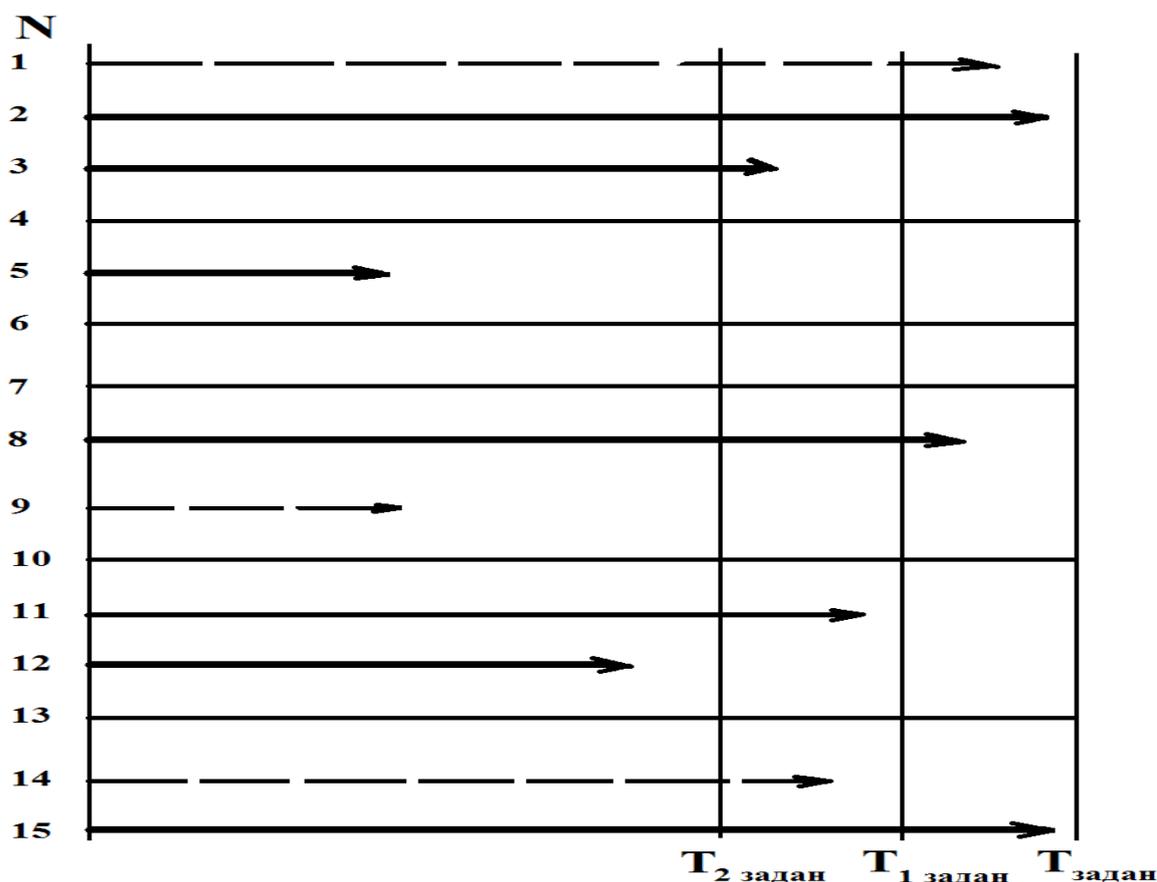


Рис. 9.1. График испытания машин

где:  полная реализация,  
 неполная реализация,  
 условная реализация,

$T_{p1}$  - первоначально установленный ресурс изделия,

$T_{p2}$  - уменьшенный ресурс изделия,

$T_{набл}$  - установленная наработка,

$N$  - число изделий.

В расчетах по определению изучаемого показателя надежности машин учитываются данные машин, имевших только *полную и условную* реализацию при выбранном значении  $T$ .

Так, при расчете по определению изучаемого показателя надежности при  $T_{задан}$  результаты испытаний (наблюдений) будут учитываться только 12 машин, и не будут учитываться результаты по 1, 9 и 14 машинам, так как они были сняты с испытаний (наблюдений) по каким-то причинам и их надежность не была выявлена.

При определении значения изучаемых показателей надежности для 15 машин при установленном для них  $T_{1\text{ задан}}$  используются данные 13 машин, так как исключаются из расчета те неполные реализации, величина которых меньше

$T_{1\text{ задан}}$  – 9-я и 14-я машины. 1-я же машина входила в число машин с неполной реализацией (была снята с испытаний) для  $T_{\text{задан}}$ , а для  $T_{1\text{ задан}}$  она будет считаться как машина с условной реализацией.

Для  $T_{2\text{ задан}}$  в расчетах будут участвовать данные по 14 машинам кроме 9-й (с неполной реализацией).

Число потерявших работоспособность машин принимается равным числу *полных реализаций*, находящихся слева от заданного  $T$ .

Таким образом, при  $T_{\text{задан}}$  таких машин будет 7 (2, 3, 5, 8, 11, 12, 15), при

$T_{1\text{ задан}}$  – 4 машины (3, 5, 11, 12) и при  $T_{2\text{ задан}}$  – 2 машины (5, 12).

Например, если производилась при испытании этих 15 машин оценка вероятности их безотказной работы для различных значений наработки  $T_{\text{задан}}$ ,

$T_{1\text{ задан}}$ ,  $T_{2\text{ задан}}$ , то, определяя  $P(H)$  методом математической статистикой, получатся следующие значения:

при  $T_{\text{задан}}$

$$P(H) = \frac{N-n}{N} = \frac{15-7}{15} = 0,53 \quad (9.1)$$

при  $T_{1\text{ задан}}$

$$P(H_1) = \frac{N-n}{N} = \frac{15-4}{15} = 0,73 \quad (9.2)$$

при  $T_{2\text{ задан}}$

$$P(H_2) = \frac{N-n}{N} = \frac{15-2}{15} = 0,87 \quad (9.3)$$

Данные расчеты показывают, что чем меньше времени на проведение испытаний ( $T_{\text{задан}}$ ), тем безотказность работы испытываемой группы машин выше.

#### **9.4. Методика планирования испытаний ограниченной продолжительности**

Ниже представлена методика планирования испытаний *ограниченной продолжительности* в соответствии с планом  $N, R, T$ . Исходными данными при планировании испытаний являются следующие величины:

-  $\alpha$  – риск поставщика – значение, которое характеризует возможность выбраковки годного изделия;

-  $\beta$  – риск заказчика – значение, которое характеризует принятие негодного изделия;

-  $T_0$  – приемочная величина наработки на отказ;

-  $T_1$  – браковочная величина наработки на отказ.

Значения  $\alpha$  и  $\beta$  выбирается в зависимости от особенности функционирования изделия, а также требования заказчика. В зависимости от значений  $\alpha$  и  $\beta$  выбирают продолжительность испытаний. Чем меньше эти величины, тем больший объем испытаний необходимо провести.

На продолжительность испытаний влияет также и приемочная величина наработки на отказ. Чем ближе значение  $T_0$  к браковочной величине  $T_1$ , тем больше продолжительность испытаний. Следовательно, для уменьшения продолжительности испытаний необходимо брать  $T_0$  значительно больше  $T_1$ .

Испытания на надежность ограниченной продолжительности прекращается в заранее установленное время  $T$ . Данное значение устанавливается в зависимости от числа изделий, поставленных на испытания.

Методика испытаний ограниченной продолжительности следующая:

- по принятым значениям  $T_0$  и  $T_1$  определяется их отношение  $T_0/T_1$ .

- по таблицам, разработанным Б.В. Гнеденко и Н.В. Смирновым для принятых величин  $\alpha$  и  $\beta$  находят число, ближайшее к числу отношения  $T_0/T_1$  и определяется значения  $r_{пр}$  и  $T_{\Sigma}/T_0$  (таблица 3.9).

- определяется число изделий, необходимое для проведения испытаний по формуле:

$$N = \frac{T_{\Sigma}}{T_0} / \frac{T}{T_0} \quad (9.4)$$

- принимают решение о соответствии партии изделий установленным требованиям, если при принятой наработке  $T$  число отказов меньше  $r_{пр}$ .

В качестве примера приняты следующие значения величин:

$$\alpha = 0,30; \quad \beta = 0,20; \quad T_0 = 3000 \text{ ч.}; \quad T_1 = 1500 \text{ ч.}; \quad T = 800 \text{ ч.}$$

*Решение:* 1. Определяется отношение  $T_o / T_1 = 2,0$ .

2. По таблице 9.3 для данных  $\alpha$  и  $\beta$  находится число, ближайшее числу 2,0.

3. Из таблицы получаем 1,99. Следовательно, число отказов  $r_{пр}$  будет равно 4, а отношение  $T_{\Sigma} / T_o$  будет равно 2,76.

4. Число изделий, необходимых для проведения испытаний согласно формуле 9.1 будет равно 10,22 или 10.

5. Если за время 800 часов испытаний 10 изделий произойдет не более 3-х отказов, то вся партия изделий (например 2000 шт.) принимается. Партию бракуют если четвертый отказ произойдет за время меньшее 800 часов.

Таблица 9.3. Данные значений  $\alpha$  и  $\beta$

Число отказов $r_{пр}$	$T_o / T_1$ при $\alpha = 0,30$ и различных значениях $\beta$				
	0,05	0,10	0,20	0,30	$T_{\Sigma} / T_o$
2	4,33	3,55	2,73	2,22	1,10
4	2,81	2,42	1,99	1,72	2,76
6	2,32	2,05	1,75	1,55	4,52
8	2,08	1,86	1,62	1,46	6,31
10	1,93	1,75	1,54	1,40	8,13
12	1,83	1,66	1,48	1,36	9,97

### 9. 5. Ускоренные испытания на надежность

Сокращение времени на проведение испытаний на надежность является одним из основных факторов с точки зрения экономии средств, идущих на испытания и для сокращения сроков освоения новых изделий. При ускоренных испытаниях изделий применяются такие методы и условия их проведения, которые обеспечивают получение необходимой информации в более короткий срок.

Различают *форсированные* испытания, основанные на увеличении скоростей, нагрузок, температур, а также применение агрессивных сред, абразивных частиц и т.п. и *сокращенные* испытания без интенсификации этих режимов и условий. При разработке методики проведения ускоренных испытаний необходимо учитывать следующее:

- проведение испытаний в форсированном режиме может привести к искажению результатов испытаний, поскольку характер приработки сопряжений,

характер трения, условия смазки и другие факторы будут не типичными для нормальных условий эксплуатации изделия;

- при планировании режимов испытаний необходимо знать интервал эксплуатационных нагрузок и его вероятностные характеристики;

- сокращение длительности испытаний без интенсификации режимов и способов повышения интенсивности износа осуществляется, как правило, за счет уплотнения испытаний по времени – сокращение холостых ходов и простоев, в круглосуточной непрерывной работе изделия, в своевременном и качественном техническом обслуживании и ремонте испытуемых изделий.

При проведении ускоренных испытаний совсем необязательно подвергать испытаниям все узлы изделия или изделие в целом. Достаточно подвергнуть ускоренным испытаниям только те узлы или детали, которые имеют наименьший срок службы или наименьшую надежность, т.е. дают наиболее частые отказы, чем лимитируют технический ресурс изделия, ухудшают количественные и качественные показатели надежности изделия.

#### Контрольные вопросы

1. На какие два типа подразделяют испытания на надежность машин?
2. С какой целью проводят испытания машин на долговечность?
3. Для чего предназначены полигонные испытания машин?
4. Назовите наиболее часто используемые планы проведения испытаний.
5. Приведите примеры расшифровки планов испытаний.
6. В чем отличие в плане испытаний понятие объект R и объект M?
7. Что такое «условная реализация» изделия при испытаниях по плану NUT?
8. В чем сущность метода испытаний ограниченной продолжительности?
9. Каково назначение и разновидности контрольных испытаний?
10. В каких случаях применяют ускоренные испытания?

## **Глава 10. Обработка данных информации о показателях надежности объекта методом математической статистикой**

Обработки данных информации при изучении конкретного показателя надежности объекта методом математической статистикой состоит из 3-х этапов:

- 1) Составляется таблица информации в порядке возрастания. Представленная информация дается чаще всего в виде значений наработки в мото-часах или машино-часах или (реже) сроков службы (месяц, год);
- 2) Составляется статистический ряд и определяются числовые характеристики статистического распределения информации;
- 3) Дается графическая иллюстрация либо изменения изучаемого параметра надежности, либо числа объектов.

### **10.1. Последовательность действий обработки данных информации**

1. Информация сортируется и записывается в порядке возрастания числовых значений представленных результатов.

2. При большом числе данных результатов (информации) простая статистическая совокупность перестает быть удобной формой записи статистического материала – она становится слишком громоздкой и мало наглядной. Для придания большей компактности и наглядности статистический материал подвергается дополнительной обработке – строится, так называемый, "статистический ряд". Статистический ряд составляется, если число информации более 25.

Статистический ряд – это таблица, в которой указывается:

*а) число интервалов группировки данных информации –  $n$ .*

Число интервалов, на которые следует группировать статистический материал (информацию), не должно быть слишком большим, так как в этом случае изучаемые данные могут иметь незакономерные колебания. С другой стороны, число интервалов не должно быть и слишком малым – при малом числе интервалов закономерности изменения изучаемых данных описываются слишком грубо. Число интервалов  $n$  определяется по формуле:

$$n = \sqrt{N} + 1 \quad (10.1)$$

где:  $N$  – число информации.

Полученный результат округляется до целого числа в сторону увеличения. Если окажется, что последние результаты информации не укладываются в последний интервал, то число интервалов увеличивают и в дальнейших расчетах применяют фактическое число интервалов.

*б) протяженность интервала  $A$*

Протяженность интервала  $A$  определяется по формуле:

$$A = \frac{t_{max} \cdot t_{max}}{N} \quad (10.2)$$

где:  $t_{max}$ ,  $t_{min}$  – наибольшее и наименьшее значение представленных результатов из данных информации.

*в) численные значения начала и конца каждого интервала.*

За начало 1-го интервала принимается *наименьшее* значение информации -  $t_{min}$ . Конец 1-го интервала равен значению суммы начала интервала плюс его протяженность  $A$ :  $t_{min} + A$ . Начало второго интервала равно значению конца первого интервала. Значение конца второго интервала равно значению начала второго интервала +  $A$ , и т.д. Значение конца последнего интервала должно быть равно наибольшему значению из данных информации -  $t_{max}$ .

*г) частота данных информации  $m$ , укладываемых в каждый интервал*

Частота данных информации в интервале обозначается цифрой, которая показывает сколько значений информации целиком укладывается в пределах протяженности рассматриваемого интервала. При группировке информационных данных по интервалам возникает вопрос о том, к какому интервалу отнести значение, находящееся на границе двух интервалов. Если значение информации попадает на границу интервалов, то в предыдущем и последующем интервалах вносится по 0,5. Если же на границу интервалов попадает несколько значений информации, то *каждое значение* оценивается по 0,5. Поэтому в интервалах могут быть дробные числа.

Проверка правильности распределения значений информации по интервалам:

- сумма частот  $m$  всех интервалов должна быть равна числу данных информации  $N$ .

д) относительная частота данных информации  $P_i$ , укладывающихся в каждый интервал.

Относительная частота данных информации  $P_i$  в каждом интервале определяется по формуле:

$$P_i = m / N \quad (10.3)$$

Численное значение  $P_i$  можно определять с точностью до 2-го знака. Проверка правильности определения значений  $P_i$  в каждом интервале:

- сумма всех  $P_i$  должна быть равна 1.

В общем случае величина  $P_i$  характеризует *вероятность* появления в рассматриваемом интервале конкретных данных информации. Если умножить величину  $P_i$  на 100%, то полученное значение будет характеризовать %%% попадания конкретных данных информации в соответствующий интервал.

е) накопленная вероятность в каждом интервале  $\Sigma P_i$ .

Значение накопленной вероятности каждого интервала находится как сумма величины накопленной вероятности рассматриваемого интервала плюс значения вероятности предыдущего интервала. Естественно, что величина накопленной вероятности 1-го интервала будет равна значению вероятности этого интервала.

Величина накопленной вероятности последнего интервала должна быть равна 1. Таким образом, статистическая таблица представленной информации, разбитой на 7 интервалов должна иметь следующий вид таблица 10.1:

Таблица 10.1. Интервалы

Границы интервала	$t_1 \dots t_{x1}$	$t_{x1} \dots t_{x2}$	$t_{x2} \dots t_{x3}$	$t_{x3} \dots t_{x4}$	$t_{x4} \dots t_{x5}$	$t_{x5} \dots t_{x6}$	$t_{x6} \dots t_{x7}$
Частота данных $m$	$m_1$	$m_2$	$m_3$	$m_4$	$m_5$	$m_6$	$m_7$
Относительная частота $P_i$	$P_{i1}$	$P_{i2}$	$P_{i3}$	$P_{i4}$	$P_{i5}$	$P_{i6}$	$P_{i7}$
Накоплен. вероятность $\Sigma P_i$	$P_{i1}$	$\Sigma P_2$	$\Sigma P_3$	$\Sigma P_4$	$\Sigma P_5$	$\Sigma P_6$	1

3. Дается графическое отображение данных статистического ряда в виде *гистограммы* или *полигона*, либо *кривой накопленной вероятности*. Гистограмма (рис.10.1) представляет *интервальное* распределение относительной частоты статистического ряда. Поэтому, ее строят, откладывая по оси абсцисс значения интервалов, а по оси ординат – относительную частоту  $P_i$ .

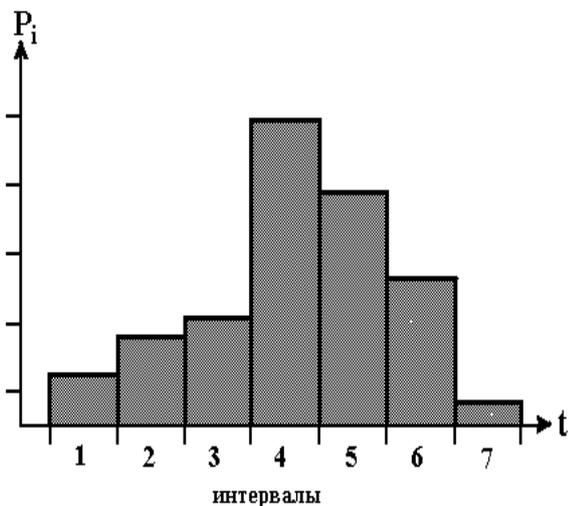


Рис. 10.1. Гистограмма

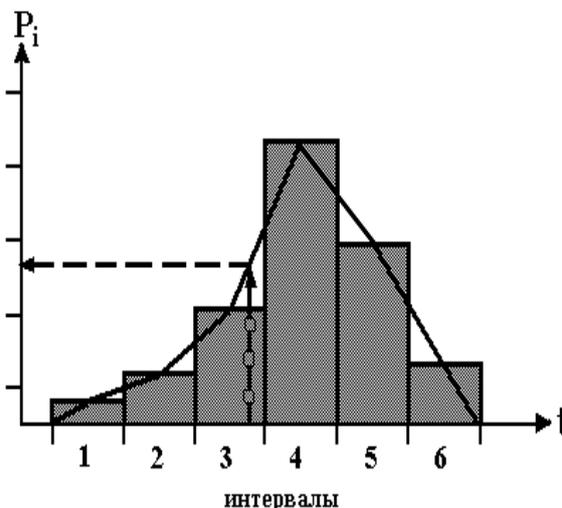


Рис. 10.2. Полигон распределения

Недостатком графического отображения показателей надежности *гистограммой* в том, что у гистограммы внутри интервала (от начала и до конца интервала) значение  $P_i$  остается постоянной независимо от изменения единицы измерения изучаемого параметра надежности в рассматриваемом интервале, что приводит к недостаточно объективным выводам. Пример, определялся до-ремонтный ресурс у 24 тракторов. Полученные данные по наработке до ремонта для обработки были разделены на 6 интервалов. На вопрос, сколько тракторов необходимо отправить в ремонт при наработках, указанных, например, в третьем интервале, будет дано одно и тоже число тракторов, независимо от того, что наработка в этом интервале изменялась и, естественно, изменялось число тракторов, требующих ремонта.

Поэтому для получения более конкретного числа экскаваторов, требующих ремонта при любой величине наработки, гистограмму заменяют *полигоном распределения* изучаемого параметра надежности (рис. 10.2). При построении полигона распределения по осям абсцисс и ординат откладывают те же значения, что и при построении гистограммы. Точки полигона распределения образуются

пересечением ординаты и абсциссы, равной *середине* интервала. За начальную и конечную точки полигона распределения берут значения начала первого и конец последнего интервалов. Точки полигона распределения соединяются ломанной линией.

С помощью полигона распределения можно определять конкретное значение изучаемого параметра надежности или конкретное число объектов с изучаемыми параметрами надежности при любом изменении значения единицы их измерения (наработки, срока службы), используя выражение:

$$K = N \cdot P_{i(x)} \quad (10.4)$$

где  $N$  – число данных информации,  $P_{i(x)}$  – величина относительной вероятности изучаемого показателя надежности.

Поднимаясь от оси абсцисс при заданном значении единицы измерения показателя надежности вверх до ломанной кривой и, перемещаясь затем до оси ординат, определяют значение  $P_{i(x)}$ . При решении некоторых задач удобнее пользоваться накопленными вероятностями - кривой накопленной вероятности -  $\Sigma P_i$  (рис. 10.3). По оси абсцисс у данного графика откладываются значения конца интервалов, а по оси ординат – накопленная вероятность  $\Sigma P_i$ . Наносимые точки на графике соединяются линиями. За исходную (первую) точку берут значение начала первого интервала.

С помощью кривой накопленной вероятности можно определять суммирующее значение изучаемого параметра надежности или суммирующее число объектов при *любом значении* единицы измерения изучаемого параметра надежности ( $H_x$ ) или в *любом* интервале ее значения ( $H_{i1} \dots H_{i2}$ ), согласно выражения:

$$K = N \cdot \sum P_{i(x)} \quad (10.5)$$

$$K = N \cdot (\sum P_{i(2)} - \sum P_{i(1)}) \quad (10.6)$$

По углу наклона отрезков данной кривой ( $\alpha_0, \alpha_1 \dots \alpha_x$ ) к оси абсцисс можно судить об интенсивности изменения изучаемого параметра надежности или числа объектов с изучаемыми свойствами надежности.

Чем круче кривая, тем более интенсивно происходит изменение изучаемого параметра

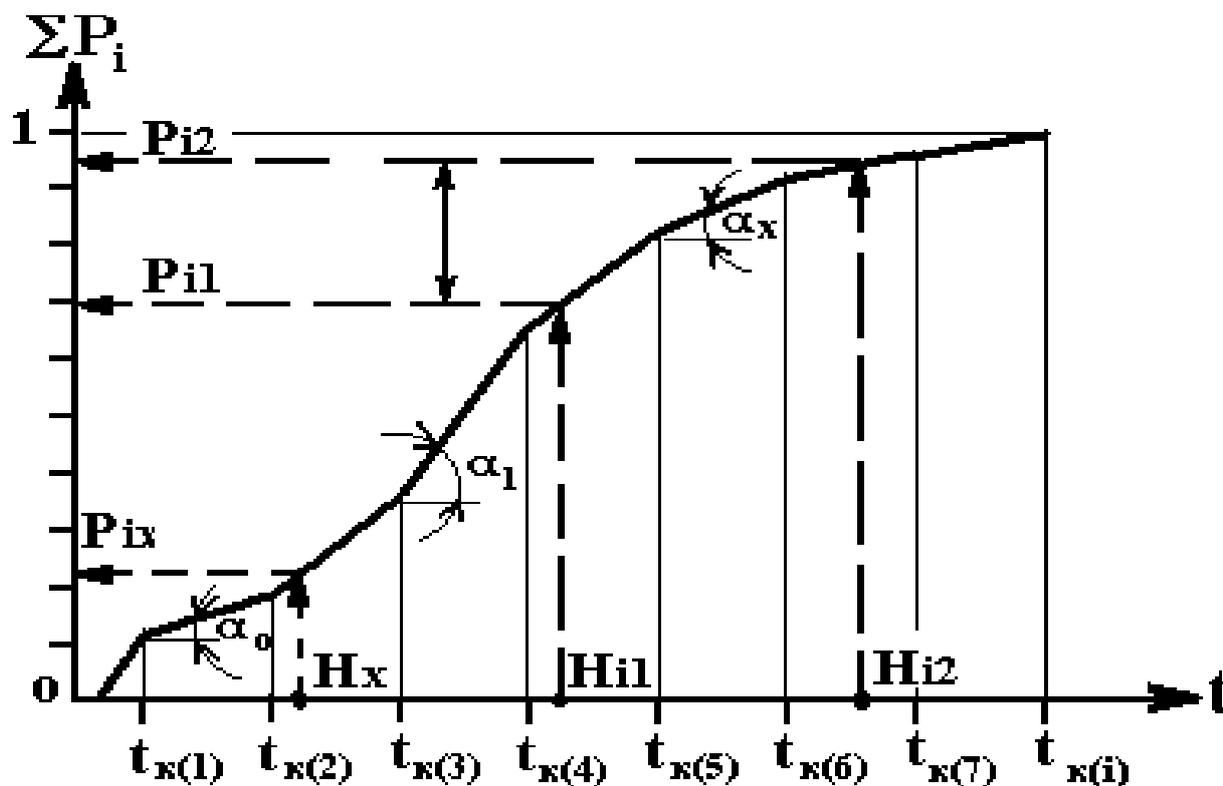


Рис. 10.3. Кривая накопленной вероятности

$t_{ki}$  - значение конца  $i$ -го интервала параметра,  $H_i$  – численное значение величины информации.

### 10.2. Пример определения изменения параметра надежности (наработки на отказ) тракторов Т-402.01 математической статистикой

Дана информации в порядке возрастания величин наработки на отказ (в моточасах) тракторов Т-402.01

353	360	362	363	364	367
356	360	363	363	366	367
358	361	363	363	366	368
358	361	363	363	366	370
359	362	363	363	367	374

Здесь число информации или число рассматриваемых объектов (экскаваторов)  $N$  равно 30

Так как число информации более 25, то для дальнейшей обработки целесообразно составить статистический ряд.

1. Определяется число интервалов:

$$n = \sqrt{N} + 1 = \sqrt{30} = 5,48 + 1 = 6,48 = 7$$

2. Определяется протяженность интервала:

$$A = (H_{30} - H_1) / n = (374 - 353) / 7 = 3 \text{ м.ч.}$$

3. Определяются границы интервалов:

- а) за начало первого интервала принимается первое значение информации  $-H_1$ ,
- б) конец первого интервала = началу значения интервала + A,
- в) начало второго интервала = концу первого интервала,
- г) конец второго интервала = началу значения второго интервала + A, и т.д.

Результаты заносятся в статистическую таблицу 10.2.

Границы интервалов	353... 356	356... 359	359... 362	362... 365	365... 368	368... 371	371... 374
--------------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------

4. Определяется частота данных  $m$ , укладывающихся в каждый интервал.

Если точка информации попадает на границу интервалов, то в предыдущем и последующем интервалах вносится по 0,5 точки.

Если же на границу интервалов попадает несколько значений информации, то *каждое значение* оценивается по 0,5. Поэтому в интервалах могут быть дробные числа. Проверка правильности распределения значений информации по интервалам: *сумма частот  $m$  всех интервалов должна быть равна числу данных информации  $N$*

Результаты заносятся в статистическую таблицу 10.3.

Границы интервалов	353... 356	356... 359	359... 362	362... 365	365... 368	368... 371	371... 374
Значение $m$	1,5	3	5,5	11	6,5	1,5	1

$$\sum m = N = 30$$

5. Определяется вероятность попадания значения представленной информации в каждый интервал  $P_i$ .

$$P_i = m / N$$

$$P_1 = 0,05 \quad P_2 = 0,10 \quad P_3 = 0,18 \quad P_4 = 0,37$$

$$P_5 = 0,22 \quad P_6 = 0,05 \quad P_7 = 0,03$$

Результаты заносятся в статистическую таблицу 10.4

Границы интервалов	353... 356	356... 359	359... 362	362... 365	365... 368	368... 371	371... 374
Значение m	1,5	3	5,5	11	6,5	1,5	1
Значение P <sub>i</sub>	0,05	0,10	0,18	0,37	0,22	0,05	0,03

Проверка правильности нахождения значений P<sub>i</sub>: *сумма P<sub>i</sub> всех интервалов должна равняться 1*

6. *Определяется накопленная вероятность  $\Sigma P_i$  в каждом интервале*

В каждом интервале указывается величина *суммы* значения вероятности интервала и значения вероятности предыдущего интервала. Естественно, что величина накопленной вероятности 1-го интервала, равна величине вероятности этого интервала. Значение величины накопленной вероятности последнего интервала должно равняться 1.

Результаты заносятся в статистическую таблицу 10.5.

Границы интервалов	353... 356	356... 359	359... 362	362... 365	365... 368	368... 371	371... 374
Значение m	1,5	3	5,5	11	6,5	1,5	1
Значение P <sub>i</sub>	0,05	0,10	0,18	0,37	0,22	0,05	0,03
Значение $\Sigma P_i$	0,05	0,15	0,33	0,7	0,92	0,97	1

7. *Строится гистограмма (рис. 10.4) и полигон рассеивания (рис. 10.5) значений наработки на отказ тракторов.*

По гистограмме (рис. 10.4) можно определить количество тракторов, имевших наработку на отказ, при выполнении наработки, указанной в заданном интервале. Например, в 4-м интервале вероятность таких тракторов составило 0,37, а количество тракторов, определяемое по формуле:

$$K = N \cdot P_{i4} \quad K = 30 \cdot 0,37 = 11,1 \quad \text{и составит 11 трактора}$$

Но гистограмма не говорит о том, сколько тракторов имели наработку на отказ, например, в начале или в конце или в любой точке интервала, т.е. при любой наработке в данном интервале. Для определения числа тракторов, имевших наработку на отказ, при любой наработке, используется полигон распределения (ломанная кривая).

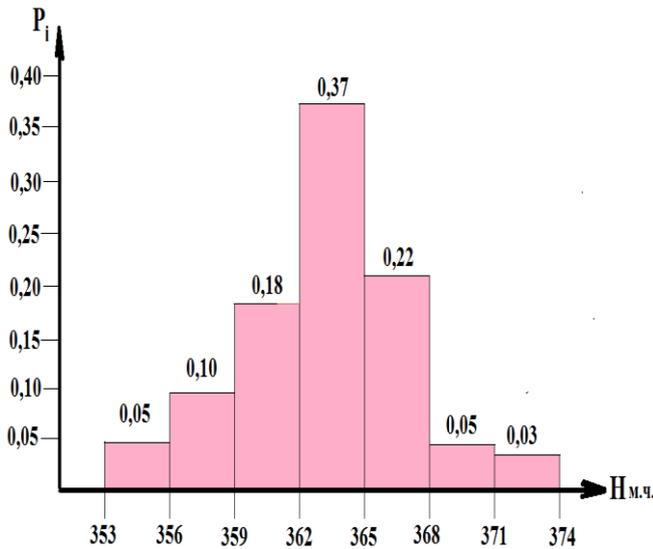


Рис.10.4. Гистограмма

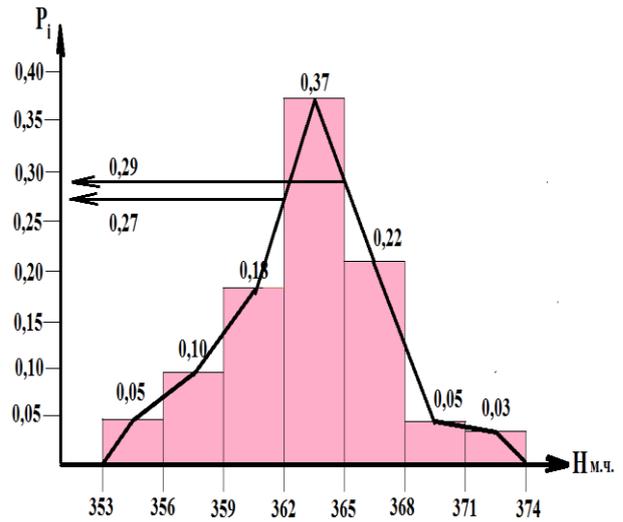


Рис. 10.5. Полигон рассеивания

В начале 4-го интервала вероятность числа тракторов, имевших наработку на отказ 0,27, а в конце интервала – 0,29. Это составило соответственно 8 и 9 экскаваторов.

8. Строится "кривая накопленных вероятностей" распределения значений наработки на отказ тракторов.

Если необходимо определить общее число тракторов с наработкой на отказ при любом значении наработки или в интервале заданных наработок, то строится кривая *накопленных вероятностей* (рис 10.6).

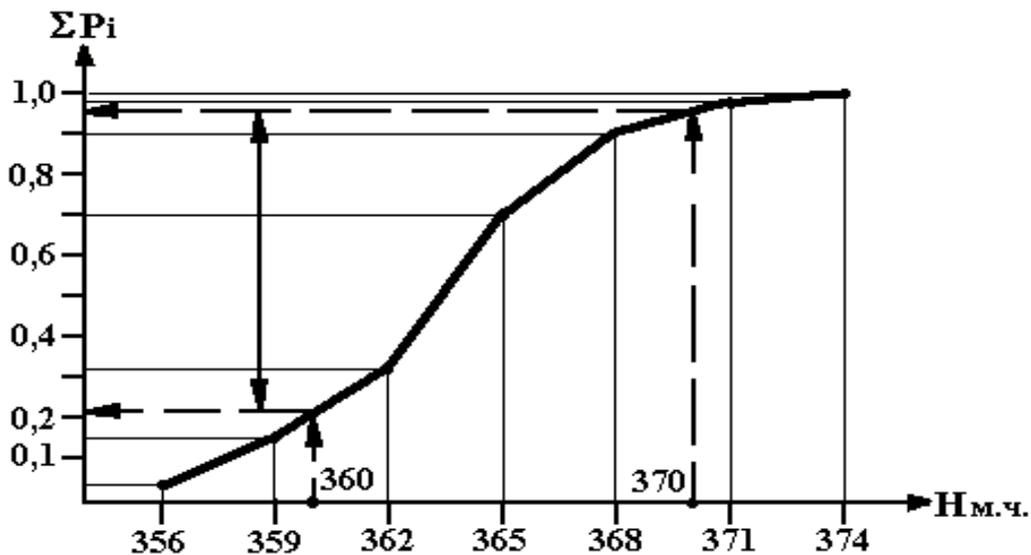


Рис. 10.6. Кривая накопленных вероятностей

По значениям накопленной вероятности  $\Sigma P_i$  каждого интервала строится данная кривая. По оси абсцисс откладываются значения *концов* интервалов, а

по оси ординат значение  $\Sigma P_i$  каждого интервала. Полученные точки соединяются *ломанной* кривой.

По данной кривой можно определять количество тракторов при любой наработке на отказ или в интервале интересующих наработок на отказ. Так, например, по графику можно определить число тракторов, имевших наработку на отказ, 360 м.ч. или в интервале наработок на отказ, например, от 360 до 370 м.ч. В первом случае их число составит 7 машин, а во втором случае 22 трактора. Определяется это согласно выражениям:

$$K = N \cdot \Sigma P_i_{(360)} = 30 \cdot 0,22 = 7 \text{ тракторов}$$

$$K = N \cdot [ \Sigma P_i_{(370)} - \Sigma P_i_{(360)} ] = 30 \cdot (0,95 - 0,22) = 22 \text{ трактора.}$$

#### Контрольные вопросы

1. Что такое статистический ряд?
2. Что подразумевается под понятием «относительная частота данных информации»?
3. Как графически изображается «полигон» и как он строится?
4. Назовите основной недостаток гистограммы.
5. Что характеризует «кривая накопленной вероятности»?
6. Как строится "кривая накопленных вероятностей" распределения значений наработки на отказ тракторов?
7. Для чего строится гистограмма и полигон рассеивания значений наработки на отказ тракторов?
8. Как определяется частота данных  $m$ , укладывающихся в каждый интервал?
9. Как определяется протяженность и границы интервалов?
10. Как определяется число интервалов?

## Глава 11. Определение показателей надежности вероятностным методом

### 11.1. Применение теоретических законов

Показатели надежности сельскохозяйственных транспортных и технологических машин или их элементов (агрегатов, узлов, сопряжений, деталей) определяются при различных испытаниях или наблюдениях в процессе эксплуатации. Оценочные показатели надежности рассчитываются как для одной машины или ее элементов, как для одной группы однотипных машин или их элементов, так и для нескольких групп одно марочных машин. Полученные значения показателей надежности могут быть перенесены:

- на полную (генеральную) совокупность данной марки машин, в результате чего разрабатываются мероприятия по повышению качества их изготовления и ремонта;

- на отдельные частные совокупности (для отдельных организаций) с целью разработки и планирования режимов их технического обслуживания и ремонта в условиях этих конкретных организаций.

Перенос показателей надежности на различные совокупности правомочен только в случае большого числа достоверной первичной информации. Однако, испытания и особенно наблюдения в период эксплуатации транспортных и технологических машин связаны с большими организационно-техническими трудностями и большими материальными затратами, что ограничивает как количество испытываемых машин, так и длительность их испытаний или наблюдения. Кроме того, на результаты проводимых испытаний или наблюдений влияют достаточно большое количество объективных факторов: квалификация испытателей, качество учета наблюдения в период эксплуатации, различные почвенно-климатические условия, качество запасных частей и т.д.

Поэтому *прямой* перенос полученных оценок показателей надежности без соответствующих корректировок на различные совокупности машин может привести к большим погрешностям.

Для минимизации погрешностей переноса данных первичной информации на различные совокупности определяют теоретические законы распределения показателей надежности для полной совокупности машин. Теоретический закон выражает общий характер изменения изучаемого показателя надежности и исключает частные отклонения, связанные с недостатками первичной информации.

Процесс замены *опытных* закономерностей *теоретическими* в теории вероятностей называется процессом выравнивания статистической информации. Теоретический закон распределения изучаемого показателя надежности позволяет определять характеристику показателя надежности применительно к полной совокупности машин данной марки (типа), а, следовательно, и к любой их частной совокупности.

При определении надежности машин или их элементов используются различные теоретические законы: закон нормального распределения (ЗНР), логарифмически-нормальный, экспоненциальный, биномиальный, гамма распределения, Пуассона, Вейбулла, Релея и ряд других. Каждый закон имеет свою область применения, свои параметры и расчетные уравнения, а также таблицы, упрощающие проведение расчетов.

Для определения показателей надежности сельскохозяйственных транспортных и технологических машин и их элементов наиболее широко используются усеченный закон нормального распределения (ЗНР) и закон распределения Вейбулла (ЗРВ). Экспоненциальный закон распределения и закон распределения Релея представляют частные случаи закона Вейбулла.

Каждый закон распределения изучаемого показателя надежности характеризуется двумя функциями:

- 1) дифференциальной функцией или функцией плотности вероятностей  $f(t)$  (рис. 11.1);
- 2) интегральной функцией или функцией распределения  $F(t)$  (рис. 11.2).

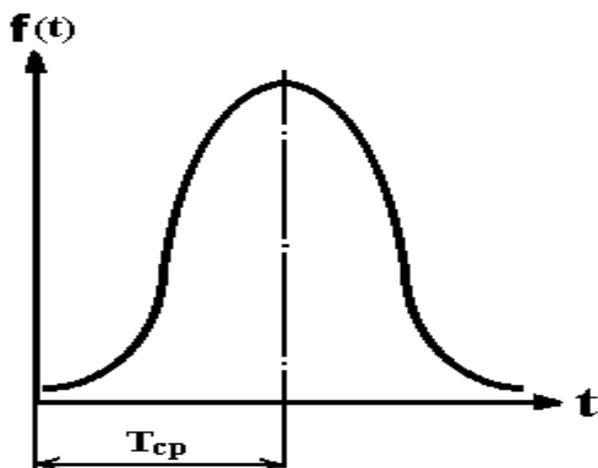


Рис. 11.1 Дифференциальная функция

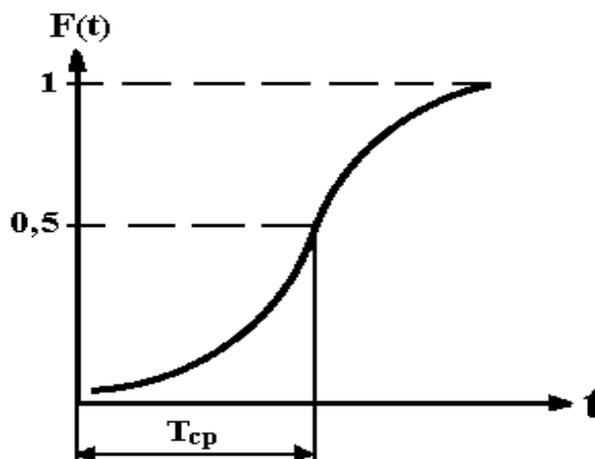


Рис. 11.2. Интегральная функция

где  $t$  – изучаемый параметр надежности,

$T_{cp}$  – среднее значение изучаемого параметра надежности.

Кривая дифференциальной функции является заменителем полигона распределения опытных данных при обработке их математической статистикой, а кривая интегральной функции заменяет кривую накопленных опытных вероятностей.

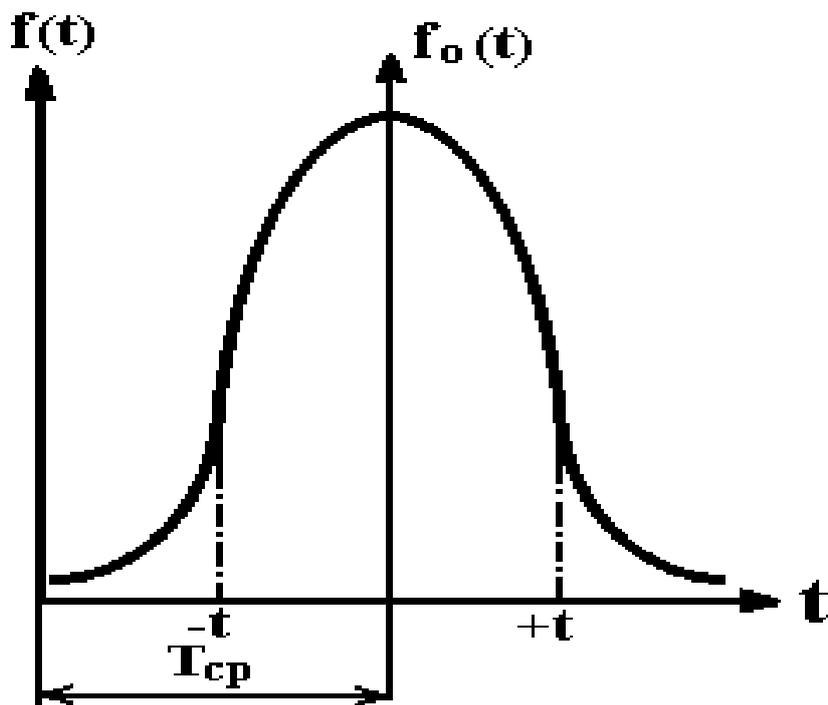
## 11.2. Закон нормального распределения (ЗНР)

Данный закон рекомендуется применять при изучении износа деталей и постепенных отказов, а также при определении времени восстановления ремонтируемых объектов. Как было отмечено выше, закон нормального распределения характеризуется дифференциальной  $f(t)$  и интегральной  $F(t)$  функциями. Отличительной особенностью этих функций является симметричное рассеивание частных значений показателей надежности относительно его среднего значения. Дифференциальную функцию или плотность вероятности нормального распределения определяют по формуле:

$$f(t) = \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(t-T_{cp})^2}{2\sigma^2}} \quad (11.1)$$

где  $T_{cp}$  - среднее значение изучаемого показателя надежности,  $\sigma$  – среднее квадратическое отклонение случайной величины изучаемого показателя надежности,  $e$  - основание натурального логарифма, равное 2,7183.

При практических расчетах пользуются не выше приведенной функцией  $f(t)$ , а, так называемой центрированной функцией  $f_0(t)$  (рис. 11.3). Связь между



функцией  $f(t)$  и функцией  $f_0(t)$  выражается соотношением:

$$f(t) = \frac{A}{\sigma} f_0\left(\frac{t_i^{\text{ср}} - T_{\text{ср}}}{\sigma}\right) \quad (11.2)$$

где  $A$  – протяженность интервала,  
 $t_i^{\text{ср}}$  – значение середины  $i$ -го интервала

Рис. 11.3 Центрированная функция.

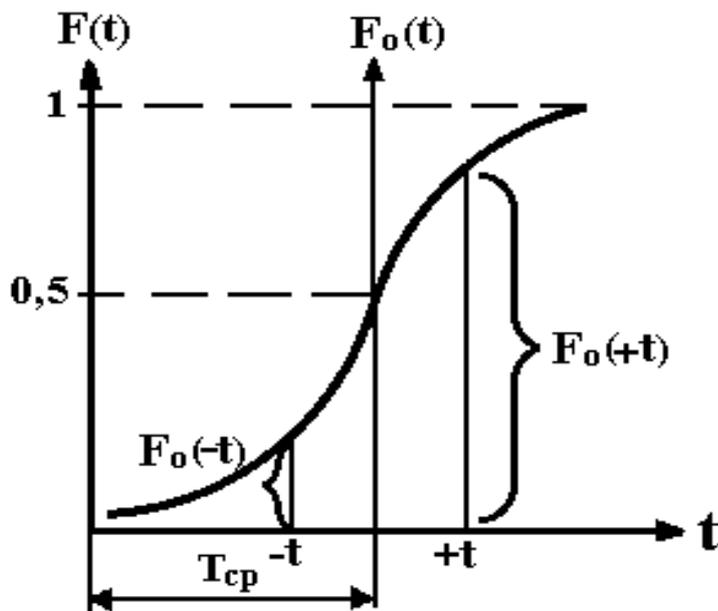
Значение  $f_0\left(\frac{t_i^{\text{ср}} - T_{\text{ср}}}{\sigma}\right)$  просчитаны и даны в специальных таблицах (см. приложение). Так как дифференциальная функция симметрична, то

$$f_0(-t) = f_0(+t) \quad (11.3)$$

График дифференциальной функции определяется по данным значений  $f(t)$ . Строится данная функция на интервальной основе (обрабатываемые данные информации группируются в интервалы). По оси абсцисс откладываются значения *середины* каждого интервала, а по оси ординат значения функции  $f(t)$ .

Проверка правильности нахождения значений функции  $f(t)$ : *сумма всех значений данной функции должна быть близка к 1 (не менее 0,97)*

Интегральную функцию  $F(t)$  определяют интегрированием дифференциальной функции. Также как и при определении дифференциальной функции в практических расчетах используют центрированную и нормированную интегральную функцию  $F_0(t)$  (рис. 11.4).



Уравнение, связывающее  $F(t)$  и  $F_0(t)$ , имеет вид:

$$F(t) = F_0((t_k^{нн} - T_{cp}) / \sigma) \quad (11.4)$$

где  $t_k^{нн}$  – заданное значение показателя надежности или значение конца рассматриваемого интервала статистического ряда.

Так как интегральная функция симметрична, то

$$F_0(-t) = 1 - F_0(+t) \quad (11.5)$$

Рис. 11.4 Нормированная интегральная функция.

Значение  $F_0((t_k^{нн} - T_{cp}) / \sigma)$  также просчитаны и даны в специальных таблицах (см. приложение)

### 11.3. Закон распределения Вейбулла (ЗРВ)

Закон распределения Вейбулла (ЗРВ) применяют:

- при усталостном разрушении металла деталей;
- для сложных изделий с большим количеством разнообразных элементов;
- при определении наработки до отказа невосстанавливаемых изделий;
- для определения характеристик рассеивания наработок между эксплуатационными отказами.

Отличительной особенностью закона Вейбулла является правосторонняя асимметрия дифференциальной функции.

Для использования закона Вейбулла необходимо предварительно определить один из его параметров, а именно параметр "b".

Данный параметр определяется из специальной таблицы, при использовании которой, необходимо знать величину коэффициента вариации  $V$ , который более удобен при выборе и оценке теоретического закона распределения, чем среднее квадратическое отклонение  $\sigma$ .

Коэффициент вариации  $V$  является относительной (безразмерной) характеристикой рассеивания изучаемого показателя надежности и равен отношению

среднего квадратического отклонения к среднему значению изучаемой величины:

$$V = \sigma / T_{cp} \quad (11.6)$$

Как известно, зона рассеивания величины изучаемого показателя надежности может начинаться от нулевого (или достаточно близкого к нему) значения или с учетом смещения от нулевого значения. Например, при определении значения безотказности электролампочек фар автомобиля отказ ряда лампочек может происходить сразу же после их включения, т.е. рассеивание значений величин безотказности может начинаться с нуля. В целом же для сельскохозяйственных транспортных и технологических машин отказ, как правило, не происходит с начала их эксплуатации, а с некоторой наработки или срока службы.

Величина наработки (срока службы) от начала эксплуатации машины до первого отказа при определении параметров надежности вероятностным методом называется *смещение* и обозначается буквой *C*, так как практически значение рассеивания показателей надежности, используемые для оценки работоспособности транспортных и технологических машин не начинаются с нулевого значения, а имеют достаточно большую величину смещения, то коэффициент вариации *V* определяется из выражения:

$$V = \sigma / (T_{cp} - C) \quad (11.7)$$

Следует обратить внимание, что смещение *C* влияет только на величину коэффициента *V*, а величина среднего квадратического отклонения  $\sigma$  не зависит от того, есть или нет смещение зоны рассеивания показателя надежности.

Закон распределения Вейбулла применяется в тех случаях, когда коэффициент вариации  $V > 0,5$ . При  $V < 0,3$  используется закон нормального распределения, а при *V* в интервале от 0,3 до 0,5 может быть применен любой из этих двух законов.

Закон распределения Вейбулла характеризуется также двумя функциями: - дифференциальной *f(t)* (плотность вероятности); - и интегральной функцией *F(t)*. Также как и для закона ЗНР в практических расчетах используют центрированные значения данных функций.

Для построения графика дифференциальной функции (дифференциальной кривой) определение исходных данных производят по формуле (связь между дифференциальной функцией  $f(t)$  и нормированной функцией  $f_0(t)$ ):

$$f(t) = \frac{A}{1,11 \cdot (T_{cp} - C)} \cdot f_0 \left( \frac{0,9 \cdot (t^{cp} - C)}{T_{cp} - C} \right) \quad (11.8)$$

где:  $A$  – величина протяженности интервала;

$t_i^{cp}$  – значение середины  $i$  – го интервала.

Значение  $f_0 \left( \frac{0,9 \cdot (t^{cp} - C)}{T_{cp} - C} \right)$  также просчитаны и даны в специальных таблицах.

Построение кривой интегральной функции  $F(t)$  производится по данным, рассчитанным по формуле:

$$F(t) = F_0 \left( \frac{0,9 \cdot (t_{кн}^{ин} - C)}{T_{cp} - C} \right) \quad (11.9)$$

где  $t_{кн}^{ин}$  – заданное значение показателя надежности или значение конца рассматриваемого интервала статистического ряда.

#### **11.4. Критерии согласия опытных и теоретических распределений показателей надежности**

При выборе теоретического закона распределения изучаемого параметра надежности для выравнивания (сглаживания) опытных данных стремятся к максимальному совпадению опытной и теоретической вероятностей. Физический смысл проверки "согласия" опытных и теоретических распределений показателя надежности заключается в том, чтобы определить *степень их расхождения*. При выборе одного теоретического закона из нескольких необходимо подобрать тот закон распределения изучаемого параметра надежности, совпадение у которого с опытными данными будет с наименьшими величинами расхождения. В теории вероятностей известны ряд критериев согласия.

Применительно к показателям надежности сельскохозяйственных транспортных и технологических машин и их элементов чаще всего используют критерий согласия Пирсона  $\chi^2$  (хи-квадрат).

### 11.4.1. Определение критерия согласия Пирсона $\chi^2$

Критерий согласия Пирсона  $\chi^2$  оценивает как далеко отстоят друг от друга точки интегральной кривой выбранного теоретического закона от точек опытной кривой накопленной вероятности  $\Sigma P_i$  статистического ряда.

При выборе оптимального теоретического закона из нескольких, считается, что тот теоретический закон точнее описывает опытные данные информации, у которого значение  $\chi^2$  меньше.

Для определения  $\chi^2$  каждого рассматриваемого теоретического закона необходимо:

1. Укрупнить статистический ряд. Правило построения данного ряда:

а) объединить ряд последовательных интервалов между собой, если в них значение частоты  $m$  меньше 4. Количество интервалов должно быть не меньше 4-х и не более 6...8

б) сложить значения частоты  $m$  объединяемых интервалов. В каждом объединенном интервале значение частоты  $m_i$  должна быть не менее 5.

2. В каждый укрупненный интервал записать значение интегральной функции  $F(t)$ , равное значению последнего интервала, объединенных между собой.

3. Определить теоретическую частоту  $m_T$  каждого укрупненного интервала.

Значение  $m_T$  определяется по формуле:

$$m_T = N [F(t_i) - F(t_{i-1})] \quad (11.10)$$

где  $F(t_i)$  – значение интегральной функции  $i$ -го интервала,

$F(t_{i-1})$  – значение интегральной функции предшествующего интервала,

$N$  – общее число информации.

4. Определить численное значение  $\chi^2$

$$\chi^2 = \sum \cdot \frac{(m_i - m_{Ti})^2}{m_{Ti}} \quad (11.11)$$

где  $m_i$  – опытная укрупненная частота данных информации,

$m_{Ti}$  – теоретическая укрупненная частота данных информации.

Сравнив численные значения критерия Пирсона  $\chi^2$  для выбираемых теоретических законов, принимают тот закон, у которого значение  $\chi^2$  меньше.

Для определения степени совпадения (в процентах) опытных данных информации с выбранным теоретическим законом по специальной таблице, которая называется "Вероятность совпадения  $P(\%)$  теоретического закона по критерию согласия  $\chi^2$ ", необходимо:

Таблица 11.1. Вероятности совпадения  $P(\%)$  теоретического закона по критерию согласия  $\chi^2$ .

№ строки	$P(\%)$	95	90	80	70	50	30	20	10
1		0,00	0,02	0,06	0,15	0,45	1,07	1,64	2,71
2	$\chi^2_{\text{теор}}$	0,10	0,21	0,45	0,71	1,39	2,41	3,22	4,60
3		0,35	0,58	1,00	1,42	2,37	3,66	4,64	6,25

1. Определить порядковый № строки в данной таблице:

$$\text{№} = n_{\text{укр}} - r \quad (11.12)$$

где  $n_{\text{укр}}$  – число укрупненных интервалов,

$r$  – число параметров, определяющих закон.

Так как для законов ЗНР и ЗРВ число  $r$  равно 3 (2 параметра распределения  $T_{\text{ср}}$ ,  $\sigma$  и третий параметр  $\sum P = 1$  для закона ЗНР и  $a$ ,  $b$  и  $\sum P = 1$  для закона ЗРВ), то:

$$\text{№} = n_{\text{укр}} - 3 \quad (11.13)$$

2. По выбранной строке таблицы найти ближайшее значение  $\chi^2_{\text{теор}}$ , близкое к полученной величине расчетной величине  $\chi^2$  и определить величину  $P(\%)$ . Чем выше значения вероятности  $P(\%)$  рассматриваемого теоретического закона, тем более он применим для выравнивания опытных статистических данных информации.

Критической вероятностью совпадения значений выбранного теоретического закона с опытными данными принято считать  $P = 10\%$ . Если  $P < 10\%$ , выбранный для выравнивания теоретический закон распределения следует считать непригодным.

## 11.5. Доверительные границы рассеивания значений показателя надежности

### 11.5.1. Определение доверительного интервала

В результате обработки собранной информации во время испытаний или наблюдений в процессе эксплуатации над группой однотипных изделий (машин, агрегатов, узлов, деталей) определяется ряд основных *количественных* характеристик показателей надежности, например, как:

- среднее значение изучаемого параметра надежности  $T_{cp}$ ;
- среднее квадратическое отклонение величины изучаемого параметра  $\sigma$ ;
- коэффициент вариации  $V$  и др.

Однако важно не только найти численное значение искомого параметра надежности, но и оценить степень достоверности полученного значения. Такая вероятностная оценка становится возможной, если указать некоторый интервал, в котором с заданной вероятностью находится искомый параметр надежности.

В качестве *центра* такого интервала принимается найденная величина определяемого параметра надежности, а нахождение пределов интервала зависит от ошибки  $\varepsilon$  при нахождении величины этого параметра и принятой вероятности, что искомая величина параметра надежности является истинной. *Та* вероятность, при которой событие практически может считаться осуществимым, называется доверительной вероятностью и обозначается  $\beta$ .

Задача формулируется следующим образом: с учетом вероятности  $\beta$  нужно указать такое предельное значение ошибки  $\varepsilon$ , прибавив и отняв которое от найденной (рассчитанной) величины параметра надежности, определить интервал, в котором с вероятностью  $\beta$ , будет содержаться действительные значения определяемого параметра надежности.

Таким образом, длина интервала, назовем ее "доверительным интервалом  $J_\beta$ ", определяется как:

$$J_\beta = T_{расч.} \pm \varepsilon \quad (11.14)$$

На практике, вместо  $T_{расч.}$  используют значение  $T_{среднее}$  ( $T_{cp}$ ).

тогда: 
$$J_{\beta} = T_{cp} \pm \varepsilon \quad (11.15)$$

где  $x$  – любая численная величина, кроме нуля,  
 $\sigma$  – среднее квадратическое отклонение,

В разных теоретических законах ошибка  $\varepsilon$  заменяется соответствующими параметрами данного закона. Так, у закона нормального распределения значение  $\varepsilon$  заменяется значением  $x$ ,  $\sigma$ , а у закона распределения Вейбулла - параметром "а"

Рассмотрим, как определяются доверительные интервалы  $J_{\beta}$  для закона нормального распределения и закона распределения Вейбулла.

### 11.5.2. При законе нормального распределения

Если известно, что количественные характеристики изучаемого параметра надежности при испытании или наблюдении изменяются по закону нормального распределения, то максимальное *рассеивание* изучаемого параметра надежности *в расчетах* принимают в пределах  $\pm 3\sigma$  от полученного среднего значения этого показателя  $T_{cp}$ . (рис. 11.5).

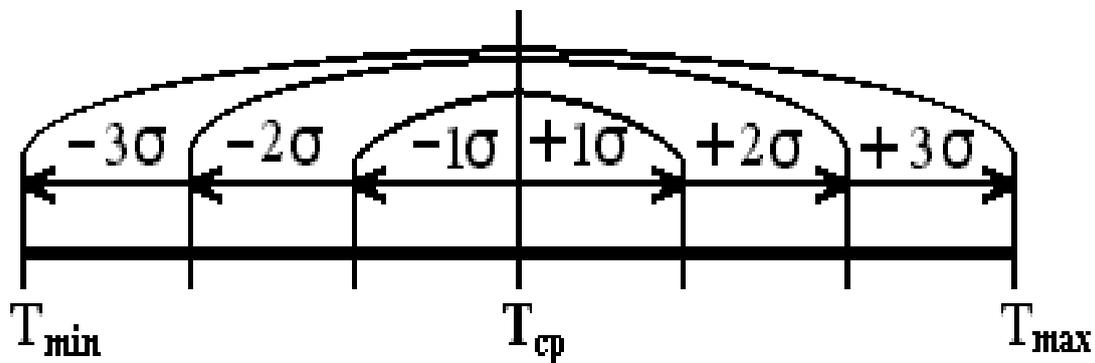


Рис. 11.5. Рассеивание изучаемого параметра

Как показывают расчеты, тогда в интервале от  $T_{min}$  до  $T_{max}$ , ограниченным 6-ю  $\sigma$ , будут находиться 99,73% значений изучаемого параметра. И вероятность  $\beta$  того, что любое значение изучаемого параметра надежности попадет в этот интервал, составит 0,9973.

Другими словами, интервал значений изучаемого параметра надежности в пределах  $\pm 3\sigma$  обеспечивает появления события с вероятностью  $\beta$ , равной 0,9973. Можно сказать и так: с вероятностью  $\beta$ , равной 0,9973, 99,73% значе-

ний изучаемого параметра будут находиться в доверительном интервале  $J_\beta$ , ограниченным  $\pm 3\sigma$ .

Такая высокая *степень доверия расчету* является в подавляющем большинстве случаев при определении показателей надежности сельскохозяйственных транспортных и технологических машин не обязательной. При практических расчетах показателей надежности машин *степень доверия* расчету снижают и принимают появления события с вероятностью  $\beta$ , равной 0,95, 0,90 и 0,80 (ГОСТ 17510).

Но, принимая одно из рекомендованных значений доверительной вероятности  $\beta$ , необходимо знать *количество* ( $x$ ) средних квадратических отклонений  $\sigma$  (обозначим это количество через  $t_k$ ), которое надо отложить влево и вправо от среднего значения изучаемого параметра надежности  $T_{cp}$ .

Для  $\beta = 0,9973$  *количество* средних квадратических отклонений  $\sigma$ , т.е.  $t_k$  равно 3 (рис.11.5). Значение величины  $t_\beta$  зависит не только от выбранного или назначенного значения доверительной вероятности  $\beta$ , но и от количества информации при испытании или наблюдении для определения значения показателя надежности  $K$ .

Чаще всего для определения значения  $t_\beta$  используется закон распределения Стьюдента с числом информации от 1 и до бесконечности (таблица 11.2)

Таблица 11.2. Значение коэффициента Стьюдента

Число информации $K$	Доверительная вероятность $\beta$					
	0,7	0,8	0,9	0,95	0,98	0,99
	Коэффициент Стьюдента $t_\beta$					
30	1,055	1,310	1,697	2,04	2,46	2,75
40	1,050	1,303	1,684	2,02	2,42	2,70
50	1,048	1,294	1,676	2,01	2,40	2,68
60	1,046	1,296	1,671	2,00	2,39	2,66
80	1,045	1,290	1,660	1,98	2,38	2,65
100	1,044	1,284	1,657	1,97	2,36	2,64

Доверительный интервал имеет верхнюю  $T^B$  и нижнюю  $T^H$  доверительные границы.

Но прежде чем привести формулы для определения данных границ, необходимо четко различать два фактора проведения испытаний или наблюдений при эксплуатации.

Первый фактор: - испытания (наблюдения) проводятся над одной *единственной* группой изделий (машин, агрегатов, узлов, деталей) в количестве  $N$  штук. Полученные количественные параметры надежности этой группы машин носят название – *одиночные значения*.

Второй фактор: - производится испытания (наблюдения) *n* *одинаковых* по численности групп изделий. В каждой группе определяются, например, среднее значение изучаемого показателя надежности  $T_{cp}^i$ . Естественно, что эти средние значения каждой группы будут отличаться друг от друга по величине, рассеиваясь вокруг истинного математического ожидания. Рассеивание средних значений  $T_{cp}^i$  будет тем больше, чем меньше число изделий  $N$  участвовало при каждом испытании или наблюдении в каждой группе.

Однако даже при самых малых значениях  $N$  среднее квадратическое отклонение  $\sigma_{cp}$  средних значений  $\sigma^i$  каждой группы будет меньше среднего квадратического отклонения одиночного показателя надежности  $\sigma^i$ . Связь между  $\sigma_{cp}$  и  $\sigma^i$  в теории вероятностей определена как:

$$\sigma_{cp} = \sigma^i / \sqrt{N} \quad (11.16)$$

Полученные параметры показателей надежности при испытании (наблюдении)  $n$  групп изделий носят название *средние значения* показателей надежности.

Таким образом:

*а) для одиночных значений:*

- значение нижней доверительной границы:

$$T^H = T_{cp} - t_{\beta} \cdot \sigma \quad (11.17)$$

- значение верхней доверительной границы:

$$T^B = T_{cp} + t_{\beta} \cdot \sigma \quad (11.18)$$

*б) для средних значений:*

- значение нижней доверительной границы:

$$T^H = T_{cp} - t_{\beta} (\sigma / \sqrt{K}) \quad (11.19)$$

- значение верхней доверительной границы:

$$T^B = T_{cp} + t_{\beta} (\sigma / \sqrt{K}) \quad (11.20)$$

где  $K$  - общее число изделий, для которых определяются доверительные границы интервала.

Таким образом, доверительный интервал  $J_{\beta}$ , в котором будут находиться значения изучаемого параметра надежности при выбранном значении доверительной вероятности  $\beta$ , можно определить как:

а) для одиночных значений:

$$J_{\beta} = (T_{cp} + t_{\beta} \cdot \sigma) - (T_{cp} - t_{\beta} \cdot \sigma) = 2 t_{\beta} \cdot \sigma \quad (11.21)$$

б) для средних значений:

$$J_{\beta} = [T_{cp} + t_{\beta}(\sigma / \sqrt{K})] - [T_{cp} - t_{\beta}(\sigma / \sqrt{K})] = 2 t_{\beta}(\sigma / \sqrt{K}) \quad (11.22)$$

Возвращаясь еще раз к понятию доверительной вероятности  $\beta$ , необходимо подчеркнуть, что значение  $\beta$  выражает % количества значений определяемого показателя надежности от общего числа данных показателей  $K$ . Другими словами, если была принята доверительная вероятность  $\beta$ , равная 0,9, то для числа значений определяемого параметра надежности  $K$ , 90% от числа  $K$  попадет доверительный интервал  $J_{\beta}$ .

### **11.5. 3. При законе распределения Вейбулла**

Границы доверительного интервала  $J_{\beta}$  при распределении определяемых показателей надежности по закону Вейбулла находятся по следующим формулам:

а) для одиночных значений:

- значение нижней доверительной границы:

$$T^H = H_K^B \left( \frac{1-\beta}{2} \right) \cdot a + C \quad (11.23)$$

- значение верхней доверительной границы:

$$T^B = H_K^B \left( \frac{1+\beta}{2} \right) \cdot a + C \quad (11.24)$$

где  $H_K^B$  - квантиль закона распределения Вейбулла, определяется по специальным таблицам согласно параметра закона "b",

a - параметр закона Вейбулла;  $a = 1,11(T_{cp} - C)$ ,

C - сдвиг начала рассеивания определяемого параметра надежности.

б) для средних значений:

- значение нижней доверительной границы:

$$T^H = (T_{cp} - C) \cdot \sqrt[b]{r_1} + C \quad (11.25)$$

- значение верхней доверительной границы:

$$T^B = (T_{cp} - C) \cdot \sqrt[b]{r_3} + C \quad (11.26)$$

Значение коэффициентов  $r_1$  и  $r_3$  определяют по специальной таблице в зависимости от значения  $\beta$  и количества информации  $K$ .

В практике часто приходится определять *односторонние* доверительные границы: верхнюю или нижнюю. Так, например, в технических условиях на новую или отремонтированную машину (агрегат, узел) указывают, что средний доремонтный (межремонтный) ресурс должен превышать заданный гарантийный ресурс при указанной доверительной вероятности  $\beta$ . Считается, что заданный гарантийный ресурс является нижней доверительной границей среднего доремонтного или межремонтного ресурса (в этом случае верхняя граница не указывается).

При определении *односторонних* доверительных границ следует пользоваться теми же уравнениями, что и при определении двусторонних доверительных границ. Только необходимо соблюсти одно условие: значение доверительной вероятности и коэффициенты  $r_1$  и  $r_3$  необходимо брать на один уровень ниже. То есть, если задана (выбрана) доверительная вероятность  $\beta = 0,9$ , то значения  $T^H$  и  $T^B$ ,  $r_1$  и  $r_3$  необходимо выбирать при  $\beta = 0,8$ .

### **11.6. Примеры определения доверительной вероятности и доверительного интервала рассеивания значений изучаемого**

#### **показателя надежности**

В результате обработки собранной информации во время испытаний или наблюдений в процессе эксплуатации над группой однотипных изделий в большинстве случаев определяются законы распределения (рассеивания) числовых значений изучаемых показателей надежности.

Определение границ рассеивания числовых показателей изучаемых параметров надежности является одной из главных задач теории надежности.

Рассмотрим эту задачу применительно к усеченному закону нормального распределения и закону распределения Вейбулла.

***При Законе нормального распределения.***

*Пример.* При нахождении величины наработки на отказ при эксплуатации группы сеялок в количестве 12 штук было определено, что среднее значение наработки на отказ  $T_{cp}$  составило 218 (м.ч./отказ) и среднее квадратическое отклонение величины наработки на отказ  $\sigma = 42$  (м.ч./отказ).

Необходимо:

1. при доверительной вероятности  $\beta = 0,9973$  определить нижнее и верхнее значение интервала, в котором могут находиться величины изучаемого параметра надежности;
2. численную величину интервала.

*Решение.* Откладывая от величины  $T_{cp}$  вправо три значения сигмы, получим верхнее значение интервала, равное:

$$T_{cp} + 3\sigma = 218 + 3 \cdot 42 = 344 \text{ (м.ч./отказ)}$$

Откладывая в влево три значения сигмы от  $T_{cp}$ , получим нижнее значение интервала, равное:

$$T_{cp} - 3\sigma = 218 - 3 \cdot 42 = 92 \text{ (м.ч./отказ)}$$

Разница между верхним и нижним численными значениями интервала будет являться величиной доверительного интервала.

Таким образом, доверительный интервал (обозначим его как  $J_k$ ), в котором могут находиться значения изучаемого параметра надежности – наработка на отказ - при выбранном значении доверительной вероятности  $\beta = 0,9973$ , будет равен:

$$J_k = 344 - 92 = 252 \text{ (м.ч./отказ)}$$

Чтобы определить численное значение интервала  $J_k$ , в котором могут находиться значения изучаемого параметра надежности при *любой* выбранной или заданной доверительной вероятности  $\beta$  и числа  $K$  испытываемых или наблюда-

емых изделий (машин, агрегатов, узлов, деталей), необходимо воспользоваться коэффициентом распределения Стьюдента –  $t_{\beta}$ . В таблице 11.3 приведены выборочные данные значений коэффициента  $t_{\beta}$  для различного числа изделий (число информации) и при разной доверительной вероятности  $\beta$ .

Таблица 11.3. Выборочные данные значений коэффициента  $t_{\beta}$  для различного числа изделий и при разной доверительной вероятности  $\beta$ .

Число информации	Доверительная вероятность $\beta$					
	0,7	0,8	0,9	0,95	0,98	0,99
Коэффициент Стьюдента $t_{\beta}$						
3	1,336	1,886	2,920	4,30	6,96	9,92
5	1,190	1,533	2,130	2,77	3,75	4,60
8	1,119	1,415	1,895	2,36	3,00	3,50
10	1,100	1,383	1,833	2,26	2,82	3,25
12	1,088	1,363	1,796	2,20	2,72	3,11
15	1,076	1,345	1,761	2,14	2,62	2,98
20	1,066	1,328	1,729	2,09	2,54	2,86
25	1,059	1,318	1,711	2,06	2,49	2,80
30	1,055	1,310	1,697	2,04	2,46	2,75
40	1,050	1,303	1,684	2,02	2,42	2,70
50	1,048	1,294	1,676	2,01	2,40	2,68
60	1,046	1,296	1,671	2,00	2,39	2,66
100	1,044	1,284	1,657	1,97	2,36	2,64

Если в выше приведенном примере необходимо было бы определить интервал величины наработки на отказ 12 сеялок при доверительной вероятности  $\beta$ , например, равной 0,8, то от среднего значения наработки на отказ  $T_{cp}$  необходимо было бы откладывать  $\pm 1,363 \sigma$  и значение доверительного интервала тогда составило бы:

$$J_k = (T_{cp} + 1,363 \cdot 42) - (T_{cp} - 1,363 \cdot 42) = 114 \text{ (м.ч./отказ)}$$

Таким образом, величина интервала, обозначенного как  $J_k$ , в котором могут находиться значения изучаемого параметра надежности при выбранном или заданном значении доверительной вероятности  $\beta$  и числе изделий  $K$  определяется по формуле как:

$$J_k = (T_{cp} + t_{\beta} \cdot \sigma) - (T_{cp} - t_{\beta} \cdot \sigma) = 2 t_{\beta} \cdot \sigma \quad (11.27)$$

где  $t_{\beta}$  – значение коэффициента Стьюдента, зависящий от выбранной или

назначенной величины доверительной вероятности  $\beta$  и числа испытываемых или наблюдаемых изделий (число информации).

Возвращаясь еще раз к понятию доверительной вероятности  $\beta$ , необходимо подчеркнуть, что значение  $\beta$  выражает % числа значений изучаемого показателя надежности от общего числа данных этого показателя  $K$ , которые попадают в интервал. Другими словами, если была принята доверительная вероятность  $\beta$ , равная 0,9, при числе значений изучаемого параметра надежности  $K$ , то 90% от числа  $K$  попадет интервал  $J_K$ .

Интервал, в который при заданной доверительной вероятности  $\beta$  попадают 100 $\beta$  % случаев от  $K$  (числа значений изучаемого параметра надежности представленных в информации), принято называть *доверительным интервалом*  $J_K$ . Таким образом, если, например, число испытываемых агрегатов было 55 шт., то при выбранной для расчетов доверительная вероятность  $\beta$ , равная 0,8, будет свидетельствовать, что значения определяемого при испытании показателя надежности у 80% агрегатов или у 44 агрегатов, будут находиться в пределах доверительного интервала.

Рассмотрим 2 примера.

*Пример 1.* В результате обработки данных о доремонтном ресурсе 40 трактора МТЗ - было выявлено, что величина среднего доремонтного ресурса у них составила 1940 м.ч., среднее квадратическое отклонение равно 160 м.ч. и рассеивание опытных данных подчиняется закону нормального распределения.

Определить доверительные границы и значение доверительного интервала рассеивания опытных данных при заданной доверительной вероятности  $\beta = 0,9$ .

*Решение.* По таблице Стьюдента определяем значение коэффициента Стьюдента  $t_\beta$  по параметрам  $K = 40$  (число информации опытных данных) и  $\beta = 0,9$ .  $t_\beta = 1,684$ . Определяем значения нижней и верхней доверительных границ.

- значение нижней доверительной границы:

$$T^H = T_{cp} - t_\beta \cdot \sigma = 1940 - 1,684 \cdot 160 = 1670 \text{ м.ч.}$$

- значение верхней доверительной границы:

$$T^B = T_{cp} + t_\beta \cdot \sigma = 1940 + 1,684 \cdot 160 = 2210 \text{ м.ч.}$$

- определяем значение доверительного интервала:

$$J_k = 2 t_\beta \cdot \sigma = 2 \cdot 1,684 \cdot 160 = 540 \text{ м.ч.}$$

*Пример 2.* Для тех же исходных данных определить значение доверительных границ и доверительного интервала при  $\beta = 0,98$ .

*Решение.* По таблице определяем значение коэффициента  $t_\beta = 2,42$

- значение нижней доверительной границы:

$$T^H = T_{cp} - t_\beta \cdot \sigma = 1940 - 2,42 \cdot 160 = 1553 \text{ м.ч.}$$

- значение верхней доверительной границы:

$$T^B = T_{cp} + t_\beta \cdot \sigma = 1940 + 2,42 \cdot 160 = 2327 \text{ м.ч.}$$

- определяем значение доверительного интервала:

$$J_k = 2 t_\beta \cdot \sigma = 2 \cdot 2,42 \cdot 160 = 774 \text{ м.ч.}$$

Вывод по данным примерам: чем больше величина доверительной вероятности  $\beta$ , тем поле доверительного интервала шире, т.е. тем точнее указываются значения доремонтного ресурса у наблюдаемых тракторов.

#### ***При законе распределения Вейбулла.***

В случае распределения изучаемого показателя надежности по закону Вейбулла определение доверительных границ производится по той же методике, что и при законе нормального распределения. Но в отличие от закона нормального распределения доверительные границы при распределении Вейбулла асимметричны среднему значению показателей надежности  $T_{cp}$ . Верхняя граница распределения отличается от среднего значения на большую величину, чем нижняя.

Границы доверительного интервала определяются по следующим формулам:

а) верхняя доверительная граница:

$$T^B = H_k^B \cdot \left( \frac{1+\beta}{2} \right) \cdot a + C \quad (11.28)$$

б) нижняя доверительная граница:

$$T^H = H_k^B \cdot \left( \frac{1-\beta}{2} \right) \cdot a + C \quad (11.29)$$

где  $H_k^B$  - квантиль закона распределения Вейбулла, определяется по специальным таблицам,

$\beta$  - величина выбранной или заданной доверительной вероятности,

$a$  - параметр закона Вейбулла;  $a = 1,11(T_{cp} - C)$ ,

$C$  - сдвиг начала рассеивания изучаемого параметра надежности.

Величина доверительного интервала определяется как:

$$J_k = T^B - T^H \quad (11.30)$$

*Пример.* При обработке данных наработки в мото-часах до капитального ремонта комбайнов в количестве 52 шт. было определено, что:

1. среднее значение наработки составило 2100 м.ч.,  $T_{cp} = 2100$  м.ч.;

2. среднее квадратическое отклонение величины наработки до капитального ремонта экскаваторов составило 370 м.ч.,  $\sigma = 370$  м.ч.

3. рассеивание наработки до капитального ремонта экскаваторов подчиняется закону распределения Вейбулла с параметром  $b = 2,7$  и величиной сдвига  $C = 900$  м.ч.

*Решение.* Принимаем доверительную вероятность равной  $\beta = 0,9$

Значение верхней доверительной границы определяется по формуле 11.28 как:

$$T^e = H_k^e \cdot \left(\frac{1+\beta}{2}\right) \cdot a + C \quad (11.31)$$

1. определяем значение в скобках, обозначив данное выражение как  $F(t)$ :

$F(t) = (1 + 0,9) / 2 = 0,95$ . В таблице 11.4 приведены значения квантилей распределения закона Вейбулла

Таблица 11.4. Значения квантилей распределения закона Вейбулла

F(t)	Параметр $b$										
	2,0	2,2	2,4	2,5	2,7	2,8	2,9	3,0	3,1	3,2	3,3
0,01	0,10	0,12	0,14	1,16	0,18	0,19	0,20	0,22	0,23	0,24	0,25
0,03	0,18	0,20	0,22	0,25	0,26	0,28	0,29	0,31	0,33	0,34	0,35
0,05	0,23	0,26	0,28	0,31	0,33	0,35	0,36	0,37	0,39	0,41	0,42
0,10	0,33	0,35	0,38	0,41	0,43	0,45	0,46	0,47	0,49	0,51	0,52
0,90	1,52	1,47	1,42	1,40	1,37	1,35	1,34	1,32	1,31	1,30	1,29
0,95	1,73	1,66	1,58	1,55	1,51	1,48	1,46	1,44	1,43	1,41	1,39
0,97	1,87	1,78	1,69	1,65	1,61	1,58	1,55	1,52	1,50	1,48	1,46
0,98	1,98	1,84	1,77	1,73	1,68	1,63	1,60	1,57	1,54	1,51	1,49
0,99	2,15	2,02	1,88	1,84	1,77	1,73	1,70	1,66	1,64	1,62	1,60

2. определяем значение выражения  $H_k^b F(t)$  с учетом параметра  $b = 2,7$  по таблице 11.4:  $H_k^b F(t) = 1,51$ .

3. определяем значение  $a$ :  $a = 1,11(T_{cp} - C) = 1,11(2100 - 900) = 1332$  м.ч.

4. определяем значение верхней доверительной границы:

$$T^b = 1,51 \cdot 1332 + 900 = 2911 \text{ м.ч.}$$

Значение нижней доверительной границы определяется по формуле 11.29 как:

$$T^h = H_k^b \cdot \left(\frac{1-\beta}{2}\right) \cdot a + C \quad (11.32)$$

1. определяем значение в скобках, обозначив данное выражение как  $F(t)$ :

$$F(t) = (1 - 0,9) / 2 = 0,05$$

2. определяем значение выражения  $H_k^b F(t)$  с учетом параметра  $b = 2,7$  по таблице 11.4:  $H_k^b F(t) = 0,33$

3. определяем значение нижней доверительной границы:

$$T^h = 0,33 \cdot 1332 + 900 = 1340 \text{ м.ч.}$$

Величина доверительного интервала определяется как:

$$J_k = T^b - T^h = 2911 - 1340 = 1571 \text{ м.ч.}$$

### **11.7. Определение относительной ошибки переноса характеристик показателя надежности на другие объекты**

Возвращаясь к вопросу о доверительных границах рассеивания значений показателей надежности, ставится вопрос: могут ли количественные характеристики изучаемого какого-то параметра надежности, полученные при испытании (наблюдении), одной группы изделий или  $n$  групп изделий в количестве  $N$  штук быть действительными для группы тех же однотипных машин в количестве  $K$  штук, эксплуатируемых в других условиях? Естественно предполагать, что изменение и количество машин в новой группе, и условия их эксплуатации вызовут изменение и количественных характеристик изучаемого параметра надежности. *Определение границ рассеивания количественных характеристик показателей надежности, а, следовательно, и определение возможной ошибки их переноса из одних условий в другие* являются одними из главных задач теории надежности.

При расчетах показателей надежности и переносе их характеристик на другие однотипные группы изделий (машин, агрегатов, узлов, деталей) необходимо оценивать наибольшую, возможную ошибку такого переноса. Ошибку переноса выражают в *относительных* единицах и для удобства расчетов определяют в процентах от *среднего значения* определяемого показателя надежности  $T_{cp}$ , независимо от выбранного теоретического закона распределения. Относительную ошибку переноса всегда определяют при *односторонней* доверительной вероятности  $\beta$ .

Так как формула для определения относительной ошибки одна и та же для любых законов, то в ней учитывается значение верхней доверительной границы, потому, что правые ветви ряда законов отличаются друг от друга. Например, правая ветвь закона Вейбулла более вытянута по сравнению с правой ветвью закона нормального распределения

Относительная ошибка переноса определяется из выражения:

$$\delta = \frac{T^B - T_{cp}}{T_{cp} - C} \cdot 100\% \quad (11.33)$$

Значение  $T^B$  берется при односторонней доверительной вероятности на уровень ниже заданной (выбранной). Полученные расчеты считаются удовлетворительными, если  $\delta$  составляет не более 20 %.

### **11.8. Определение теоретического закона при анализе статистических данных показателей надежности**

При оценке показателей надежности сельскохозяйственных транспортных и технологических машин по результатам испытаний или наблюдений в период эксплуатации этих машин или их элементов (агрегатов, узлов, сопряжений, деталей) чаще всего используют известный теоретический закон изменения изучаемых показателей надежности.

Методика выбора теоретического закона представлена ниже.

#### ***Последовательность действий:***

1) Записать данные информации о испытаниях или наблюдениях в порядке возрастания результатов;

- 2) Составить статистический ряд;
- 3) Определить ряд числовых характеристик статистического ряда;
- 4) Подобрать теоретический закон изменения изучаемого параметра надежности.

***Порядок составления статистического ряда.***

*Статистический ряд составляется, если число информации более 25*

Статистический ряд - это таблица, в которой указывается:

- а) *число интервалов группировки представленных данных - n*

Число интервалов, на которые следует группировать данные информации, не должно быть слишком большим (тогда изучаемые данные могут иметь незакономерные колебания). С другой стороны, оно не должно быть слишком малым - при малом числе интервалов закономерности изменения изучаемых параметров описываются слишком грубо. Число интервалов  $n$  определяется по формуле:

$$n = \sqrt{N} + 1 \quad (11.34)$$

где  $N$  - число данных информации.

Полученный результат округляется до целого числа в сторону увеличения.

- б) *длина интервала - A*

Длина интервала  $A$  определяется по формуле:

$$A = \frac{t_{max} - t_{min}}{n} \quad (11.35)$$

где  $t_{min}$  - наименьшее значение из данных информации,

$t_{max}$  - наибольшее значение из данных информации.

- в) *численные значение начала и конца каждого интервала*

За начало границы 1-го интервала принимается *наименьшее* значение информации -  $t_{min}$ . Конец границы 1-го интервала равен сумме начала границы плюс длина интервала  $A$  ( $t_{min} + A$ ). Начало границы второго интервала равно значению конца первого интервала. Значение конца второго интервала равно значению начала второго интервала  $+A$ , и т.д. Значение конца границы послед-

него интервала должно быть равно наибольшему значению из данных информации -  $t_{\max}$ .

г) частота ( $m$ ) данных представленной информации, укладываемых в каждый интервал

При группировке данных информации по интервалам возникает вопрос о том, к какому интервалу отнести значение, находящееся на границе двух интервалов. При попадании значения информации на границу интервалов в предыдущий и последующий интервалы вносится по 0,5. Если же на границу интервалов попадает несколько значений информации, то *каждое значение* оценивается по 0,5. Поэтому в интервалах могут быть дробные числа. Проверка правильности распределения данных информации по интервалам:

*сумма частот  $m$  интервалов должна быть равна числу данных информации  $N$ .*

д) относительная частота данных информации  $P_i$ , укладываемых в каждый интервал

Относительная частота данных информации  $P_i$  в каждом интервале определяется по формуле:

$$P_i = m / N \quad (11.36)$$

Численное значение  $P_i$  можно определять с точностью до 2-го знака. Проверка правильности определения значений  $P_i$  в каждом интервале:

*сумма всех  $P_i$  должна быть равна 1.*

В общем случае величина  $P_i$  характеризует "вероятность" появления в рассматриваемом интервале конкретных данных информации.

Если умножить величину  $P_i$  на 100%, то полученное значение будет характеризовать %% попадания в соответствующий интервал конкретных данных информации.

е) накопленная вероятность в каждом интервале  $\Sigma P_i$ .

Значение накопленной вероятности каждого интервала находится как сумма величины накопленной вероятности предыдущего интервала и значения "вероятности" рассматриваемого интервала. Естественно, что величина накопленной вероятности 1-го интервала будет равна значению "вероятности" этого интер-

вала. Величина накопленной вероятности последнего интервала должна быть равна 1. Таким образом, статистическая таблица должна иметь следующий вид:

Таблица 11.5. Статистическая таблица.

Границы интервала	$t_1 \dots t_{x1}$	$t_{x1} \dots t_{x2}$	$t_{x2} \dots t_{x3}$	$t_{x3} \dots t_{x4}$	$t_{x4} \dots t_{x5}$	$t_{x5} \dots t_{x6}$
Частота данных $m$	$m_1$	$m_2$	$m_3$	$M_4$	$m_5$	$m_6$
Относительная частота $P_i$	$P_{i1}$	$P_{i2}$	$P_{i3}$	$P_{i4}$	$P_{i5}$	$P_{i6}$
Накоплен. вероятность $\Sigma P_i$	$P_{i1}$	$\Sigma P_2$	$\Sigma P_3$	$\Sigma P_4$	$\Sigma P_5$	$\Sigma P_6$

### **11.8.1 Определение числовых значений (характеристик) статистического ряда**

1. *Определение среднего значения каждого интервала  $t_{cp_{ин}}$*

Среднее значение интервала определяется как *полусумма* значений начала и конца интервала.

2. *Определение среднего значения изучаемого параметра  $T_{cp}$*

$$T_{cp} = \sum (t_{cp_{ин}} \times P_i) \quad (11.37)$$

3. *Определение характеристики распределения изучаемого параметра (среднее квадратическое отклонение)  $\sigma$*

$$\sigma = \sqrt{\sum [(T_{ин}^{cp} - T_{cp})]^2 \cdot P_i} \quad (11.38)$$

### **11.8.2 Определение теоретического закона распределения изучаемого параметра надежности (ТЗР)**

Для решения задач по надежности машин и механизмов наибольшие применение получили следующие законы:

1) усеченный закон нормального распределения (ЗНР);

2) закон Вейбулла (ЗРВ);

а) усеченный закон нормального распределения рекомендуется применять при:

- изучение износа деталей и других постепенных отказов;
- определение времени восстановления ремонтируемых изделий.

б) закон Вейбулла:

- при усталостном разрушении металла деталей;

- для сложных изделий с большим количеством разнообразных элементов;
- при определении наработки до отказа невосстанавливаемых изделий.

Закон нормального распределения, как известно, имеет симметричные ветви относительно среднего значения изучаемого параметра  $t_{cp}$ . Закон Вейбулла имеет оттянутую правую ветвь.

*Для определения конкретного теоретического закона при определении оценочных параметров показателей надежности транспортных и технологических машин и механизмов необходимо предварительно определить значения интегральных функций каждого закона, а затем с помощью критерия Пирсона  $\chi^2$  выбрать теоретический закон изменения изучаемого параметра показателя надежности.*

Для определения значений интегральных функций законов ЗНР и ЗРВ необходимо оценить достоверность данных представленной информации.

### **11.8.3 Определение наличия "выпадающих точек" информации**

Чтобы найти конкретный теоретический закон распределения изучаемой величины, нужно располагать достаточно большим по объему статистическим материалом, порядка несколько сотен наблюдений. Однако на практике часто приходится иметь дело с ограниченным объемом статистического материала.

Поэтому должна быть твердая уверенность, что представленные значения информации для математической обработки должны быть достоверны. С этой целью определяется, так называемый, "доверительный интервал" представленных значений. Так как таблица наблюдений построена по возрастающей, то необходимо выявить, с какого начального и по какое конечное значений представленных данных можно доверять (доверительный интервал).

Те значения, которые предшествуют началу доверительного интервала, и те значения, которые имеются после последнего значения доверительного интервала, необходимо отбросить. Это, так называемые, "выпадающие точки".

Существуют много методов определения доверительного интервала, но при испытаниях и эксплуатации транспортных и технологических машин используют критерий Ирвина (коэффициент Ирвина  $\lambda$ ).

Проверяются крайние минимальные и максимальные значения информации по следующей зависимости:

если  $\lambda_{\text{расч}} < \lambda_{\text{табл}}$ , то значение информации достоверно;

если  $\lambda_{\text{расч}} > \lambda_{\text{табл}}$ , то значение информации ложное.

Величину  $\lambda_{\text{расч}}$  находят по формуле:

$$\lambda_{\text{расч}} = \frac{t_{i+1} - t_i}{\sigma} \quad (11.39)$$

где  $t_i$  и  $t_{i+1}$  смежные данные информации.

Проверяются первые два минимальных данных и два максимальных данных информации. Табличные значения  $\lambda_{\text{табл}}$  (коэффициент Ирвина) приведены в таблице 11.6.

Таблица 11.6. Значения коэффициент Ирвина,  $\lambda_{\text{табл}}$

Число информации	25	30	40	50	75	100
Коэффициент $\lambda_{\text{табл}}$	1,25	1,2	1,15	1,1	1,05	1

В тех случаях, когда после проверки исключаются "выпадающие точки" информации, необходимо заново перестроить статистический ряд и пересчитать среднее значение  $T_{\text{ср}}$  и среднее квадратическое отклонение изучаемого показателя надежности  $\sigma$ .

#### **11.8.4. Определение значения дифференциальной функции закона нормального распределения $f_i$**

Определение значения дифференциальной функции  $f_i$  для каждого интервала производятся по формуле:

$$f_i = (A / \sigma) \cdot f_0 [(t_i^{\text{ср}} - T_{\text{ср}}) / \sigma] \quad (11.40)$$

при этом функция  $f(-i) = f(+i)$ , значение  $f_0 [(t_i^{\text{ср}} - T_{\text{ср}}) / \sigma]$  просчитаны и представлены в таблице 1 приложения.

#### **11.8.5. Определение интегральной функции закона нормального распределения**

Интегральная функция  $F(t)$  для практических расчетов выражается уравнением:

$$F(t) = F_0 \left( \frac{t_{k(i)} - T_{\text{ср}}}{\sigma} \right) \quad (11.41)$$

где  $t_{k(i)}$  - значение конца  $i$  - го интервала статистического ряда.

Значение  $F_0\left(\frac{t_{k(i)}-T_{cp}}{\sigma}\right)$  определяют таблице 2 приложения.

При получении отрицательного значения аргумента необходимо воспользоваться следующим уравнением:  $F_0(t) = 1 - F_0(+t)$ . (1.42)

### **11.8.6. Определение интегральной функции закона распределения Вейбулла.**

Интегральная функция  $F(t)$  закона распределения Вейбулла для практических расчетов выражается уравнением:

$$F(t) = F_T\left(\frac{0,9(t_{ki}-C)}{T_{cp}-C}\right) \quad (11.43)$$

где  $C$  – величина сдвига начала распределения изучаемого параметра.

$$C = t_{\min} - 0,5 A \quad (A - \text{длина интервала}) \quad (11.44)$$

Значение  $F_T\left(\frac{0,9(t_{ki}-C)}{T_{cp}-C}\right)$  определяют по таблице 4 приложения.

### **11.8.7. Определение критерия согласия Пирсона $\chi^2$ (хи-квадрат)**

Критерий согласия оценивает как далеко отстоят друг от друга точки интегральной кривой выбранного теоретического закона от точек опытной кривой накопленной вероятности  $\Sigma P_i$  статистического ряда.

При выборе оптимального теоретического закона из нескольких, считается, что тот теоретический закон точнее описывает опытные данные информации, у которого значение  $\chi^2$  меньше.

Для определения  $\chi^2$  каждого рассматриваемого теоретического закона необходимо:

1. *Укрупнить статистический ряд.* Правило построения данного ряда:

а) объединить ряд последовательных интервалов между собой, если в них значение частоты  $m$  меньше 4. Количество интервалов должно быть не меньше 4-х и не более 6...8

б) сложить значения частоты  $m$  объединяемых интервалов. В каждом объединенном интервале значение частоты  $m$  должна быть не менее 4.

2. *В каждый укрупненный интервал записать значение интегральной функции  $F(t)$ , равное значению последнего интервала, объединенных между собой.*

3. *Определить теоретическую частоту  $m_T$  каждого укрупненного интервала.*

Значение  $m_T$  определяется по формуле:

$$m_T = N [F(t_i) - F(t_{i-1})] \quad (11.45)$$

где  $F(t_i)$  - значение интегральной функции  $i$  - го интервала,

$F(t_{i-1})$  - значение интегральной функции предшествующего интервала,

$N$ - общее число информации.

4. *Определить численное значение  $\chi^2$*

$$\chi^2 = \sum \cdot \frac{(m_i - m_{Ti})^2}{m_{Ti}} \quad (11.46)$$

где  $m_i$  - опытная укрупненная частота данных информации,

$m_{Ti}$  - теоретическая укрупненная частота данных информации.

Сравнив численные значения критерия Пирсона  $\chi^2$  для выбираемых теоретических законов, принимают тот закон, у которого значение  $\chi^2$  меньше.

Для определения степени совпадения (в процентах) опытных данных информации с выбранным теоретическим законом по специальной таблице, которая называется "Вероятность совпадения  $P\%$  теоретического закона по критерию согласия  $\chi^2$ ", необходимо:

5. *Определить порядковый № строки:*

$$№ = n_{\text{укр}} - r \quad (11.47)$$

где  $n_{\text{укр}}$  - число укрупненных интервалов,

$r$  - число параметров, определяющих закон.

Так как для законов ЗНР и ЗРВ число  $r$  равно 3, то:

$$№ = n_{\text{укр}} - 3$$

6. *По выбранной строке выбрать ближайшее значение  $\chi^2_{\text{теор}}$ , близкое к полученной величине расчетной величине  $\chi^2$  и определить величину  $P\%$ . Чем выше значения вероятности  $P\%$  рассматриваемого теоретического закона, тем более он применим для выравнивания опытных статистических данных информации.*

Критической вероятностью совпадения значений выбранного теоретического закона с опытными данными принято считать  $P\% = 10$ . Если  $P\% < 10\%$ , вы-

бранный для выравнивания теоретический закон распределения следует считать непригодным. Ниже дана выдержка из этой таблицы, таблица 11.7.

Таблица 11.7. Критическая вероятность совпадения значений выбранного теоретического закона с опытными данными

№ строки	P %	95	90	80	70	50	30	20	10
1		0,00	0,02	0,06	0,15	0,45	1,07	1,64	2,71
2	$\chi^2_{\text{теор}}$	0,10	0,21	0,45	0,71	1,39	2,41	3,22	4,60
3		0,35	0,58	1,00	1,42	2,37	3,66	4,64	6,25

### 11.8.8. Определение доверительных границ рассеивания среднего значения изучаемого параметра надежности

#### а) Для закона нормального распределения (ЗНР)

При испытании (наблюдении) одиночной машины:

а) верхняя доверительная граница:  $t_{\alpha}^B = \bar{t} + t_{\alpha} \cdot \sigma$

б) нижняя доверительная граница:  $t_{\alpha}^B = \bar{t} - t_{\alpha} \cdot \sigma$

где  $t_{\alpha}$  - коэффициент Стьюдента;  $\alpha$  - доверительная вероятность

Значение коэффициента Стьюдента в зависимости от различных значений доверительной вероятности  $\alpha$  даны в специальной таблице

#### 2. При испытании (наблюдении) группы машин:

а) верхняя доверительная граница:  $t_{\alpha}^B = \bar{t} + t_{\alpha} \cdot \frac{\sigma}{\sqrt{N}}$

б) нижняя доверительная граница:  $t_{\alpha}^B = \bar{t} - t_{\alpha} \cdot \frac{\sigma}{\sqrt{N}}$

#### б) Для закона распределения Вейбулла (ЗРВ)

##### 1. При испытании (наблюдении) одиночной машины:

а) верхняя доверительная граница:  $t_{\alpha}^B = H_K^B \cdot \frac{(1+\alpha)}{2} \cdot a + C$

б) нижняя доверительная граница:  $t_{\alpha}^B = H_K^B \cdot \frac{(1-\alpha)}{2} \cdot a + C$

где  $H_K^B$  - квантиль закона распределения Вейбулла,

$\alpha$  - доверительная вероятность,

$a$  - параметр закона Вейбулла,

$C$  - сдвиг начала рассеивания изучаемого параметра надежности.

Квантиль  $H_K^B$  и параметр  $a$  закона распределения Вейбулла даны в специальных таблицах.

2. При испытании (наблюдении) группы машин:

а) верхняя доверительная граница:  $t_\alpha^B = (\bar{t} + C) \cdot \sqrt[b]{r_1 + C}$

б) нижняя доверительная граница:  $t_\alpha^B = (\bar{t} - C) \cdot \sqrt[b]{r_1 + C}$

Значение коэффициентов  $r_1$  и  $r_3$  определяют по специальной таблице.

### **11.9. Определение относительной ошибки несовпадения опытных данных (данных информации) и значений, получаемых в соответствии с выбранным теоретическим законом**

При расчетах показателей надежности и переносе их характеристик на другие группы машин (агрегатов, узлов, сопряжений, деталей) той же марки необходимо оценивать наибольшую, возможную ошибку такого переноса.

Ошибку переноса выражают в относительных единицах и для удобства расчетов определяют в процентах от среднего значения определяемого показателя надежности  $t$ , независимо от выбранного теоретического закона распределения.

Относительная ошибка переноса полученных результатов расчетов на другие группы машин и ее элементов определяется по формуле:

$$\delta = \frac{t_\alpha^B - \bar{t}}{\bar{t} - C} \cdot 100\% \quad (11.48)$$

Полученные расчеты считаются удовлетворительными, если  $\delta$  составляет не более 10...15 %.

Контрольные вопросы.

1. Чем характеризуется каждый закон распределения изучаемого показателя надежности?
2. Когда рекомендуется применять закон нормального распределения?
3. Когда применяют закон распределения Вейбулла?
4. Как определяется числовое значение статистического ряда?
5. Как определяется верхняя доверительная граница?
6. Как определяется нижняя доверительная граница?

## Глава 12. Использование теоретических законов при практических расчетах

### 12.1. Применение усеченного закона нормального распределения (ЗНР)

При определении изучаемого показателя надежности для группы однотипных машин собирают информацию о данном показателе надежности и обрабатывают ее математической статистикой, получая в виде гистограммы, полигона и кривой накопленной вероятности, изменение данного показателя в зависимости от наработки или срока службы для данной *конкретной* группы машин.

Для оценки изучаемого показателя надежности тех же машин, но эксплуатируемых *в других условиях и в другом количестве*, подбирается такой теоретический закон, который *наиболее точно* описывает изменение изучаемого показателя надежности на основе полученных опытных данных (информации). Количественные параметры выбранного закона можно распространять на любые отдельные частные совокупности (для отдельных организаций) с целью разработки и планирования режимов технического обслуживания и ремонта рассматриваемых машин в условиях этих конкретных организаций.

*Пример.* Собрана информация о наработке на отказ тракторов МТЗ- во время наблюдения за 45 машинами. По результатам обработки математической статистикой получены данные, которые сведены в таблицу 12.1 и определены количественные показатели опытных данных:  $T_{cp} = 80$  м.ч;  $\sigma = 9$  м.ч.

Таблица 12.1. Получены данные математической статистикой.

Границы интервалов	58 -64	64 -70	70 -76	76 -82	82 -88	88 -94	94 -100
Значение m	2	4	9	13	8	5	3
Значение $P_i$	0,04	0,09	0,20	0,29	0,18	0,11	0,07
Значение $\sum P_i$	0,04	0,13	0,33	0,62	0,80	0,91	0,98
Значение $t_i^{cp}$	61	67	73	79	85	91	97

Для оценки изменения наработки на отказ тракторов МТЗ- для различных условий эксплуатации и различного их числа в разных организациях решено использовать закон нормального распределения (ЗНР).

В связи с этим возникают 2 вопроса:

1) какова вероятность в % совпадения характеристик выбранного ЗНР и опытных данных,

2) какова относительная ошибка (в %) переноса количественных характеристик выбранного ЗНР на различные совокупности (число машин) в разных организациях.

Для ответа на 1-й вопрос необходимо:

а) укрупнить интервалы по величине  $m$ . Объединяем первые два интервала и получаем интервал с границами 58...70 и  $m_{\text{укр}}$ , равным 6. 3-й интервал не укрупняем, так как у него  $m$  равно 9, т.е. больше 4. Также не укрупняем 4-й, 5-й и 6-й интервалы, так как у них  $m$  равно 13, 8 и 5 т.е. больше 4. Далее объединяем два последних интервала с границами 94...106 и числом  $m$ , равным 4.

Таблица 12.2. Объединенные границы интервалов.

Границы интервалов	58- 70	70 - 76	76 - 82	82 - 88	88 - 94	94 - 106
Количество $m_{\text{укр}}$	6	9	13	8	5	4

б) определить значения интегральной функции для укрупненных 6-ти интервалов. Значение интегральной функции каждого интервала определяется согласно выражению

$$F_o \frac{t_k^{\text{ин}} - T_{\text{ср}}}{\sum t} \quad (12.1)$$

Так как интегральная функция симметрична, то

$$F_o(-t) = 1 - F_o(+t)$$

Используем ниже приведенную таблицу 12.1 - специально просчитанная таблица интегральной функции закона нормального распределения (таблица 2 приложения).

Таблица 12.1. Интегральные функции ЗНР

F <sub>o</sub>	Сотые доли									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0,0	0,50	50	51	51	52	52	52	53	53	54
0,1	0,54	54	55	55	56	56	56	57	57	58
0,2	0,58	58	59	59	60	60	60	61	61	61
0,3	0,62	62	63	63	63	64	64	64	65	65
0,4	0,66	66	66	67	67	67	68	68	68	69
0,5	0,69	70	70	71	71	71	71	72	72	72
0,6	0,73	73	73	74	74	74	75	75	75	75
0,7	0,76	76	76	77	77	77	78	78	78	79
0,8	0,79	79	79	80	80	80	81	81	81	81
0,9	0,82	82	82	82	83	83	83	83	84	84
1,0	0,84	84	85	85	85	85	86	86	86	86
1,1	0,86	87	87	87	87	88	88	88	88	88
1,2	0,89	89	89	89	89	89	90	90	90	90
1,3	0,90	91	91	91	91	91	91	92	92	92
1,4	0,92	92	92	92	93	93	93	93	93	93
1,5	0,93	93	94	94	94	94	94	94	94	94
1,6	0,95	95	95	95	95	95	95	95	95	96
1,7	0,96	96	96	96	96	96	96	96	96	96
1,8	0,96	97	97	97	97	97	97	97	97	97
1,9	0,97	97	97	97	97	97	98	98	98	98
2,0	0,98	98	98	98	98	98	98	98	98	98
2,1	0,98	98	98	98	98	98	98	99	99	99
2,2	0,99	99	99	99	99	99	99	99	99	99
2,3	0,99	99	99	99	99	99	99	99	99	99
2,4	0,99	99	99	99	99	99	99	99	99	99
2,5	0,99	99	99	99	99	99	1,00	1,00	1,00	1,00
2,6	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
2,7	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
2,8	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
2,9	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00

- 1)  $F_1(t) = F_o [(70 - 80) / 9] = F_o (- 1, 1) = 1 - F_o (1,1) = 1 - 0,86 = 0,14$
- 2)  $F_2(t) = F_o [(76 - 80) / 9] = F_o (- 0,44) = 1 - F_o (0,44) = 1 - 0,67 = 0,33$
- 3)  $F_3(t) = F_o [(82 - 80) / 9] = F_o ( 0,22) = 0,59$
- 4)  $F_4(t) = F_o [(88 - 80) / 9] = F_o (0,89) = 0,81$
- 5)  $F_5(t) = F_o [(94 - 80) / 9] = F_o (1,56) = 0,94$
- 6)  $F_6(t) = F_o [(106 - 80) / 9] = F_o (2,9) = 1,00$

Записываем полученные значения F(t) в таблицу 12.2.

Границы интервалов	58-70	70-76	76-82	82-88	88-94	94-106
Кол - во т <sub>укр</sub>	6	9	13	8	5	4
Значение F(t)	0,14	0,33	0,59	0,81	0,94	1,00

в) определить теоретическую частоту  $m_T$  каждого укрупненного интервала согласно выражению:

$$m_T = N [F(t_i) - F(t_{i-1})] \quad (12.2)$$

где  $F(t_i)$  – значение интегральной функции  $i$  - го интервала,

$F(t_{i-1})$  - значение интегральной функции предшествующего интервала;

$N$  - общее число информации.

Первое значение интегральной функции предшествующего интервала всегда равно 0 (так как его нет)

$$m_{T1} = 45 (0,14 - 0) = 6,3 \quad m_{T4} = 45 (0,81 - 0,59) = 9,9$$

$$m_{T2} = 45 (0,33 - 0,14) = 8,6 \quad m_{T5} = 45 (0,94 - 0,81) = 5,9$$

$$m_{T3} = 45 (0,59 - 0,33) = 11,7 \quad m_{T6} = 45 (1,00 - 0,94) = 2,7$$

Данные заносятся в таблицу 12.3.

Границы интервалов	58-70	70-76	76-82	82-88	88-94	94-106
Кол - во $m_{укр}$	6	9	13	8	5	4
Значение $m_T$	6,3	8,6	11,7	9,9	5,9	2,7

Далее определяется критерий согласия Пирсона  $\chi^2$  согласно выражения:

$$\chi^2 = \frac{(m_{укр} - m_{Ti})^2}{m_{Ti}} \quad (12.3)$$

где  $m_{укр}$  – опытная укрупненная частота данных информации,

$m_{Ti}$  – теоретическая укрупненная частота интервала.

$$\chi^2 = \frac{(6-6,3)^2}{6,3} + \frac{(9-8,6)^2}{8,6} + \frac{(13-11,7)^2}{11,7} + \frac{(8-9,9)^2}{9,9} + \frac{(4-2,7)^2}{2,7} + \frac{(6-6,3)^2}{6,3} = 0,01 + 0,02 + 0,14 + 0,36 + 0,14 + 0,63 = 1,3$$

Для определения степени совпадения (в процентах) опытных данных информации с выбранным теоретическим законом используется специальная таблица, которая называется "Вероятность совпадения  $P(\%)$  теоретического закона по критерию согласия  $\chi^2$ ".

Таблица 12.4. Вероятности совпадения P(%) теоретического закона по критерию согласия  $\chi^2$ .

№ строки	P(%)	95	90	80	70	50	30	20	10
1		0,00	0,02	0,06	0,15	0,45	1,07	1,64	2,71
2	$\chi^2_{\text{теор}}$	0,10	0,21	0,45	0,71	1,39	2,41	3,22	4,60
3		0,35	0,58	1,00	1,42	2,37	3,66	4,64	6,25

Чтобы воспользоваться данной таблицей необходимо определить № строки, численные значения которых будет сравниваться с полученным значением  $\chi^2_{\text{расч}}$

Номер строки определяется из выражения:

$$\text{№} = n_{\text{укр}} - 3 \quad (12.4)$$

где  $n_{\text{укр}}$  – число укрупненных интервалов.

$$\text{№} = 6 - 3 = 3$$

В 3-й строчке находится число, близкое по своему значению расчетному значению  $\chi^2_{\text{расч}}$ . Таким числом в 3-й строчке будет число 1,42. Данное число характеризует, что P(%) соответствует 70% совпадения опытных данных информации с принятым теоретическим законом нормального распределения.

Критической вероятностью совпадения значений выбранного теоретического закона с опытными данными принято считать  $P = 10\%$ . Если  $P < 10\%$ , выбранный для выравнивания теоретический закон распределения следует считать непригодным.

Таким образом, можно считать, что закон нормального распределения очень хорошо описывает опытные данные приведенного примера и можно сделать вывод, что наработка на отказ тракторов МТЗ- в зависимости от эксплуатационной наработки подчиняется закону нормального распределения.

Для ответа на 2-й вопрос какова относительная ошибка (в %) переноса количественных характеристик выбранного ЗНР на различные совокупности (число машин) в разных организациях необходимо:

- а) задаться значением вероятности  $\beta$ .

Для транспортно-технологических машин значение вероятности при расчетах

обычно принимают равной от 0,8 до 0,95. Задаем  $\beta = 0,9$ .

Определяется значение односторонней верхней доверительной границы изучаемого параметра надежности (наработка на отказ).

Так как наблюдение осуществлялось за одной группой машин, то полученные количественные параметры надежности для этой группы машин носят название – *одиочные значения*.

значение верхней доверительной границы:

$$T^B = T_{cp} + t_{\beta} \cdot \sigma \quad (12.5)$$

значение нижней доверительной границы:

$$T^H = T_{cp} - t_{\beta} \cdot \sigma \quad (12.6)$$

значение коэффициента  $t_{\beta}$  выбирается из ниже приведенной таблицы коэффициентов Стьюдента и оно равно

$$1,68 [(1,684 - \text{при } K = 40 + 1,676 - \text{при } K = 50) / 2]$$

$$T^B = 80 + 1,68 \cdot 9 = 95 \text{ м.ч.}$$

$$T^H = 80 - 1,68 \cdot 9 = 65 \text{ м.ч.}$$

Таким образом, достоверные значения наработки на отказ у тракторов МТЗ- при вероятности 0,9 могут колебаться от 65 до 95 мото-час.

Таблица 10.5. Значения коэффициентов Стьюдента

Число информации	Доверительная вероятность $\beta$					
	0,7	0,8	0,9	0,95	0,98	0,99
	Коэффициент Стьюдента $t_{\beta}$					
30	1,055	1,310	1,697	2,04	2,46	2,75
40	1,050	1,303	1,684	2,02	2,42	2,70
50	1,048	1,294	1,676	2,01	2,40	2,68
60	1,046	1,296	1,671	2,00	2,39	2,66
80	1,045	1,290	1,660	1,98	2,38	2,65
100	1,044	1,284	1,657	1,97	2,36	2,64

б) определяется относительная ошибка переноса количественных показателей ЗНР, полученных при обработке опытных данных при наблюдении за 45 машинами на любое другое количество машин (величина относительной ошибки допускается до 20%):

$$\delta = [(T^B - T_{cp}) / T_{cp}] \cdot 100 \% = [(91,7 - 80) / 80] \cdot 100 \% = 14,6 \%$$

Таким образом, изменение изучаемого показателя надежности у данных тракторов – наработку на отказ – подчиняется закону нормального распределения и те количественные характеристики данного закона полученных при наблюдении за 45 тракторами, могут быть перенесены на любое количество машин в различных организациях.

## 12.2. Применение закона Вейбулла

Закон распределения Вейбулла достаточно широко используется при определении показателей надежности транспортных и технологических машин. Данный закон рекомендуется применять при определении:

- усталостного разрушения металла деталей;
- показателей надежности сложных изделий с большим количеством разнообразных элементов;
- наработки до отказа невосстанавливаемых изделий;
- характеристик рассеивания наработок между эксплуатационными отказами.

Закон распределения Вейбулла характеризуется дифференциальной  $f(t)$  и интегральной  $F(t)$  функциями. Отличительной особенностью данного закона является правосторонняя асимметрия дифференциальной функции (правая ветвь функции более вытянута по сравнению с левой ветвью).

Дифференциальная функция закона заменяет кривую полигона опытных данных, а интегральная функция – кривую накопленных опытных вероятностей (данных). С помощью критерия Пирсона  $\chi^2$  проверяется соответствие выбранного данного закона для сглаживания опытных вероятностей.

Для использования закона Вейбулла необходимо предварительно определить его параметры "b" и "a". Данные параметры определяются:

1) параметр "b" из специальной таблицы (таблица 5 приложения), при использовании которой, необходимо знать величину коэффициента вариации V.

Коэффициент вариации V определяется из выражения:

$$V = \frac{\sigma}{T_{cp} - C} \quad (12.7)$$

где  $\sigma$  – среднее квадратическое отклонение,

$T_{cp}$  – среднее значение изучаемого параметра надежности,

$C$  – смещение рассеивания изучаемого показателя надежности расстояние от начала координат до начала рассеивания случайной величины показателя надежности.

Таблица 12.6. Параметр "b" закона распределения Вейбулла

Значение V	0,68	0,64	0,61	0,58	0,55	0,52	0,50	0,48	0,46	0,44	0,43
Параметр b	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0	2,1	2,2	2,3	2,4	2,5
Значение V	0,41	0,40	0,39	0,38	0,36	0,35	0,34	0,33	0,32	0,31	
Параметр b	2,6	2,7	2,8	2,9	3,0	3,1	3,2	3,3	3,4	3,5	

Величина смещения при наличии статистического ряда ( $N > 25$ ) определяется как:

$$C = t_{\min} - 0,5 A \quad (12.8)$$

где  $t_{\min}$  – начало первого интервала статистического ряда,

$A$  – длина интервала.

При отсутствии статистического ряда ( $N < 25$ ):

$$C = t_1 - (t_3 - t_1) / 2 \quad (12.9)$$

где  $t_1$  и  $t_3$  – значение первой и третьей точек информации в порядке их возрастания.

Закон распределения Вейбулла применяется в тех случаях, когда коэффициент вариации  $V > 0,33$ . При  $V < 0,33$  используется закон нормального распределения.

2) параметр закона "a" определяется из выражения:

$$a = 1,11 (T_{cp} - C) \quad (12.10)$$

В практических расчетах используют центрированное значение дифференциальной функции:

$$f(t) = \frac{0,9 \cdot A}{T_{cp} - C} \cdot f_0\left(\frac{0,9 \cdot (t_{cp}^{ин} - C)}{T_{cp} - C}\right) \quad (12.11)$$

значение  $f_0\left(\frac{0,9 \cdot (t_{cp}^{ин} - C)}{T_{cp} - C}\right)$  даны в специальных таблице 12.7.

График дифференциальной функции определяется по данным значений  $f(t)$ . Строится данная функция на интервальной основе, если обрабатываемые данные информации группируются в интервалы, или по выбранным значениям информации. Так как данная функция заменяет опытную кривую полигона, полученную при обработке информации математической статистикой, то при построении графика функции  $f(t)$  на оси абсцисс указывают средние значения интервалов. Проверка правильности нахождения значений функции  $f(t)$ :

*сумма всех значений данной функции должна быть близка к 1*

Таблица 12.7. Дифференциальная функция закона Вейбулла  $f_0\left(\frac{0,9 \cdot (t_{cp}^{ин} - C)}{T_{cp} - C}\right)$

$f_0$	Значение параметра " b "									
	1,5	1,6	1,8	2,0	2,2	2,4	2,6	2,8	3,0	3,2
0,1	0,46	0,39	0,28	0,20	0,17	0,13	0,10	0,06	0,03	0,01
0,2	0,61	0,57	0,47	0,38	0,33	0,28	0,23	0,17	0,12	0,07
0,3	0,70	0,67	0,61	0,55	0,49	0,43	0,38	0,32	0,26	0,20
0,4	0,74	0,73	0,71	0,68	0,63	0,59	0,54	0,49	0,45	0,40
0,5	0,74	0,76	0,78	0,78	0,77	0,73	0,71	0,68	0,66	0,63
0,6	0,73	0,76	0,80	0,84	0,85	0,85	0,86	0,86	0,87	0,87
0,7	0,70	0,73	0,80	0,86	0,89	0,93	0,97	1,00	1,04	1,08
0,8	0,66	0,70	0,77	0,84	0,90	0,96	1,03	1,09	1,15	1,21
0,9	0,61	0,65	0,72	0,80	0,87	0,95	1,02	1,09	1,17	1,24
1,0	0,54	0,59	0,66	0,74	0,81	0,88	0,96	1,03	1,10	1,17
1,1	0,49	0,53	0,59	0,66	0,72	0,78	0,84	0,90	0,96	1,02
1,2	0,44	0,47	0,52	0,57	0,61	0,65	0,69	0,73	0,77	0,81
1,3	0,39	0,41	0,45	0,48	0,49	0,51	0,53	0,54	0,56	0,58
1,4	0,33	0,35	0,38	0,39	0,39	0,39	0,38	0,38	0,38	0,37
1,5	0,29	0,30	0,31	0,32	0,30	0,28	0,27	0,25	0,23	0,21
1,6	0,25	0,25	0,26	0,25	0,23	0,20	0,18	0,15	0,13	0,11
1,7	0,21	0,21	0,21	0,19	0,16	0,14	0,11	0,09	0,06	0,03
1,8	0,17	0,16	0,16	0,14	0,12	0,10	0,07	0,05	0,03	0,01
1,9	0,15	0,14	0,13	0,10	0,08	0,06	0,05	0,03	0,01	0,00
2,0	0,13	0,12	0,10	0,07	0,06	0,04	0,03	0,01	0,00	
2,1	0,10	0,09	0,07	0,05	0,04	0,03	0,02	0,01	0,00	
2,2	0,09	0,08	0,05	0,04	0,03	0,02	0,01	0,00		
2,3	0,07	0,06	0,04	0,02	0,01	0,00				
2,4	0,06	0,05	0,03	0,02	0,01	0,00				
2,5	0,05	0,04	0,02	0,01	0,00					

*Пример.* Дана информация о наработке в м.ч. на отказ 30 комбайнов в порядке возрастания. Построить график дифференциальной функции рассеивания значений наработки на отказ для данных комбайнов.

230	290	345	375	410	470
245	295	355	375	420	490
270	320	355	390	420	500
285	330	370	400	445	525
290	340	375	400	460	580

Так как число информации  $N > 25$ , то при обработке данной информации используется статистический ряд.

1. Определяется число интервалов:

$$n = \sqrt{N} + 1 \quad (12.12)$$

где  $N$  – число информации.

$$n = \sqrt{30} + 1 = 7$$

2. Определяется длина и границы интервалов:

$$A = (t_{\max} - t_{\min}) / n \quad (12.13)$$

где  $t_{\max}$  – максимальное значение наработки до отказа по информации,

$t_{\min}$  – минимальное значение наработки до отказа по информации.

$$A = (580 - 230) / 7 = 50 \text{ м.ч.}$$

Данные заносятся в таблицу 10.8.

Границы интервала	230	280	330	380	430	480	530
	280	330	380	430	480	530	580

3. Определяется частота значений информации  $m$  в каждом интервале. Если значение информации попадает на границу интервалов, то в предыдущий и последующий интервал заносится величина 0,5. Если же несколько значений информации попадает на границу интервалов, то каждое значение информации в интервале записывается как 0,5.

Данные заносятся в таблицу 12.9.

Границы интервала	230	280	330	380	430	480	530
	280	330	380	430	480	530	580
Значение $m$	3	5,5	8,5	6	3	3	1

4. Определяется вероятность появления информации в каждом интервале  $P_i$ :

$$P_i = m_i / N \quad (12.14)$$

где  $m_i$  – значение частоты информации в интервале.

Данные заносятся в таблицу 12.10.

Границы интервала	230 280	280 330	330 380	380 430	430 480	480 530	530 580
Значение $m$	3	5,5	8,5	6	3	3	1
Значение $P_i$	0,10	0,18	0,28	0,20	0,10	0,10	0,04

5. Определяется среднее значение каждого интервала  $t_{cp}$ :

$$t_{cp} = (t_{нач} + t_{кон}) / 2 \quad (12.15)$$

Данные заносятся в таблицу 12.11.

Границы интервала	230 280	280 330	330 380	380 430	430 480	480 530	530 580
Значение $m$	3	5,5	8,5	6	3	3	1
Значение $P_i$	0,10	0,18	0,28	0,20	0,10	0,10	0,04
Значение $t_{cp}$	255	305	355	405	455	505	555

6. Определяется среднее значение данных информации  $T_{cp}$ :

$$T_{cp} = \sum (t_{cp} \cdot P_i) \quad (12.16)$$

$$1. 255 \cdot 0,1 = 25,5 \quad 4. 405 \cdot 0,20 = 81 \quad 7. 555 \cdot 0,04 = 22,2.$$

$$2. 305 \cdot 0,18 = 54,9 \quad 5. 455 \cdot 0,10 = 45,5$$

$$3. 355 \cdot 0,28 = 99,4 \quad 6. 505 \cdot 0,10 = 50,5$$

$$\sum 379 = 380 \text{ м.ч.} \quad T_{cp} = 380 \text{ м.ч.}$$

7. Определяется среднее квадратическое отклонение  $\sigma$ :

$$\sigma = \sum \cdot [(\sqrt{(t_{cp} - T_{cp})^2} \cdot P_i)] \quad (12.17)$$

$$1. (255 - 380)^2 \cdot 0,10 = 1562,5 \quad 5. (455 - 380)^2 \cdot 0,10 = 562,5$$

$$2. (305 - 380)^2 \cdot 0,18 = 1012,5 \quad 6. (505 - 380)^2 \cdot 0,10 = 1562,5$$

$$3. (355 - 380)^2 \cdot 0,28 = 175,0 \quad 7. (555 - 380)^2 \cdot 0,04 = 1225,0$$

$$4. (405 - 380)^2 \cdot 0,20 = 125 \quad \sum = 6225$$

$$\sigma = \sqrt{6225} = 78,89 = 80 \text{ м.ч.}$$

8. Определяется величина смещения С:

$$\text{Согласно формуле 12.8:} \quad C = 230 - 0,5 \cdot 50 = 205 \text{ м.ч.}$$

9. Определяется величина коэффициента вариации V:

$$V = 80 / (380 - 205) = 0,46$$

10. По таблице параметра "b" определяется значение b согласно значению V.  $b = 2,3$

#### *Определение дифференциальной функции*

11. Определяются точки для построения кривой дифференциальной функции согласно формуле 12.11 и таблице дифференциальной функции законно Вейбулла для параметра b. Так как в этой таблице нет значение функции  $f_0$  при  $b = 2,3$ , то необходимо произвести интерполяцию значений между  $b = 2,2$  и  $b = 2,4$ . Числовое значение от деления округляется в большую сторону при втором знаке после запятой больше 5.

$$\begin{aligned} f(t_1) &= 0,9 \cdot 50 / (380 - 205) f_0[0,9 \cdot (255 - 205) / (380 - 205)] = \\ &= 0,26 f_0(0,3) = 0,26 \cdot 0,46 = 0,12 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} f(t_2) &= 0,9 \cdot 50 / (380 - 205) f_0[0,9 \cdot (305 - 205) / (380 - 205)] = \\ &= 0,26 f_0(0,5) = 0,26 \cdot 0,75 = 0,20 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} f(t_3) &= 0,9 \cdot 50 / (380 - 205) f_0[0,9 \cdot (355 - 205) / (380 - 205)] = \\ &= 0,26 f_0(0,8) = 0,26 \cdot 0,93 = 0,24 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} f(t_4) &= 0,9 \cdot 50 / (380 - 205) f_0[0,9 \cdot (405 - 205) / (380 - 205)] = \\ &= 0,26 f_0(1,0) = 0,26 \cdot 0,84 = 0,22 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} f(t_5) &= 0,9 \cdot 50 / (380 - 205) f_0[0,9 \cdot (455 - 205) / (380 - 205)] = \\ &= 0,26 f_0(1,3) = 0,26 \cdot 0,5) = 0,13 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} f(t_6) &= 0,9 \cdot 50 / (380 - 205) f_0[0,9 \cdot (505 - 205) / (380 - 205)] = \\ &= 0,26 f_0(1,5) = 0,26 \cdot 0,29 = 0,08 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} f(t_7) &= 0,9 \cdot 50 / (380 - 205) f_0[0,9 \cdot (555 - 205) / (380 - 205)] = \\ &= 0,26 f_0(1,8) = 0,26 \cdot 0,11 = 0,03. \end{aligned}$$

12. Строится график данной функции.

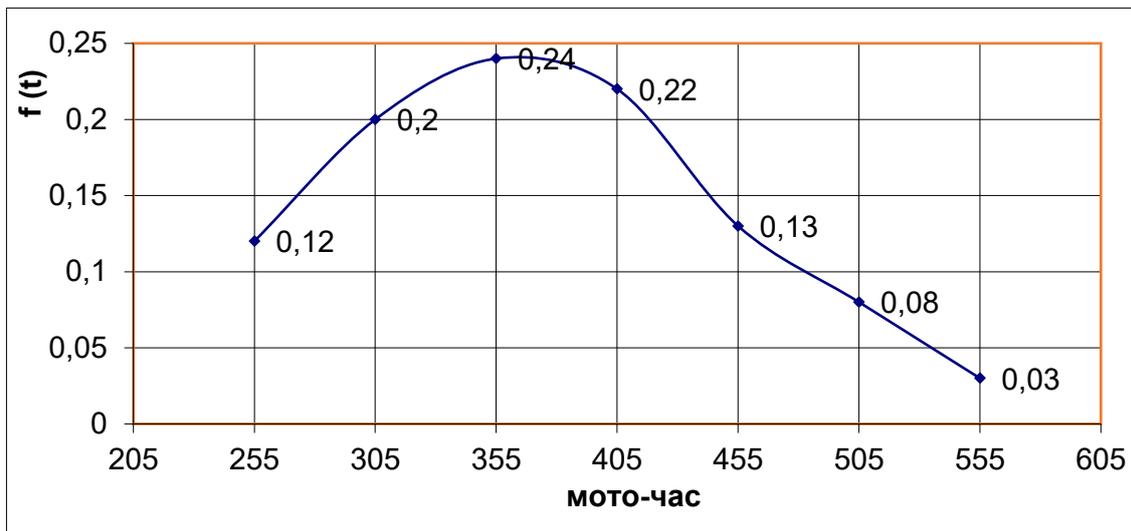


Рис. 12.1. Гистограмма функции  $f(t)$ .

*Определение интегральной функции:*

Интегральную функцию  $F(t)$  определяют интегрированием дифференциальной функции. Также как и при определении дифференциальной функции в практических расчетах используют центрированную и нормированную интегральную функцию  $F_o(t)$ , которая выражается уравнением:

$$F(t) = F_o [0,9(t_{к(i)} - C)] / (T_{ср} - C) \quad (12.18)$$

где  $t_{к(i)}$  - значение конца  $i$ -го интервала

Значение функций  $F_o$  даны в таблице интегральной функции закона Вейбулла.

1. Определяются точки для построения кривой интегральной функции.

Согласно формуле 12.18 и представленной таблице:

$$F(t) = F_o \left( \frac{0,9 \cdot (280 - 205)}{380 - 205} \right) = F_o(0,4) = 0,11$$

Интерполяция:  $F_o(0,4)$  при  $b = 2,2$  будет равен 0,12,  $F_o(0,4)$  при  $b = 2,4$  будет равен 0,10. При  $b = 2,3$   $F_o(0,4)$  будет равен  $(0,12 + 0,10) / 2 = 0,11$

$$F(t_2) = F_o \left( \frac{0,9 \cdot (330 - 205)}{380 - 205} \right) = F_o(0,64) = 0,32$$

$$F(t_3) = F_o \left( \frac{0,9 \cdot (380 - 205)}{380 - 205} \right) = F_o(0,9) = 0,55$$

$$F(t_4) = F_o \left( \frac{0,9 \cdot (430 - 205)}{380 - 205} \right) = F_o(1,2) = 0,79$$

$$(t_5) = F_0\left(\frac{0,9 \cdot (480 - 205)}{380 - 205}\right) = F_0(1,4) = 0,89$$

$$(t_6) = F_0\left(\frac{0,9 \cdot (530 - 205)}{380 - 205}\right) = F_0(1,7) = 0,97$$

$$(t_7) = F_0\left(\frac{0,9 \cdot (580 - 205)}{380 - 205}\right) = F_0(1,9) = 0,99$$

Таблица 12.12. Интегральная функция закона Вейбулла

F(o)	Параметр "b"						
	1,5	1,6	1,8	2,0	2,2	2,4	2,5
0,1	0,03	0,03	0,02	0,01	0,01	0,00	0,00
0,2	0,09	0,07	0,05	0,04	0,03	0,02	0,02
0,3	0,15	0,14	0,11	0,09	0,07	0,05	0,05
0,4	0,22	0,21	0,18	0,15	0,12	0,10	0,10
0,5	0,30	0,28	0,25	0,22	0,20	0,17	0,16
0,6	0,37	0,36	0,33	0,30	0,28	0,25	0,24
0,7	0,44	0,43	0,41	0,39	0,37	0,35	0,34
0,8	0,51	0,50	0,49	0,47	0,45	0,44	0,44
0,9	0,57	0,57	0,56	0,56	0,55	0,54	0,54
1,0	0,63	0,63	0,63	0,63	0,63	0,63	0,63
1,1	0,68	0,69	0,70	0,70	0,71	0,72	0,72
1,2	0,73	0,74	0,75	0,76	0,78	0,79	0,79
1,3	0,77	0,78	0,80	0,82	0,83	0,85	0,85
1,4	0,81	0,82	0,84	0,86	0,88	0,89	0,90
1,5	0,84	0,85	0,87	0,90	0,91	0,93	0,94
1,6	0,87	0,88	0,90	0,92	0,94	0,95	0,96
1,7	0,89	0,90	0,93	0,94	0,96	0,97	0,98
1,8	0,91	0,92	0,94	0,96	0,97	0,98	0,99
1,9	0,93	0,94	0,96	0,97	0,98	0,99	0,99
2,0	0,94	0,95	0,97	0,98	0,99	0,99	1,00
2,1	0,95	0,96	0,98	0,99	0,99	1,00	1,00
2,2	0,96	0,97	0,98	0,99	1,00	1,00	
2,3	0,97	0,98	0,99	1,00	1,00		
2,4	0,98	0,98	0,99	1,00	1,00		
2,5	0,98	0,99	0,99	1,00	1,00		
2,6	0,99	0,99	1,00	1,00			
2,7	0,99	0,99	1,00	1,00			
2,8	0,99	0,99	1,00	1,00			
2,9	0,99	1,00	1,00				
3,0	0,99	1,00	1,00				

2. Строится график данной функции

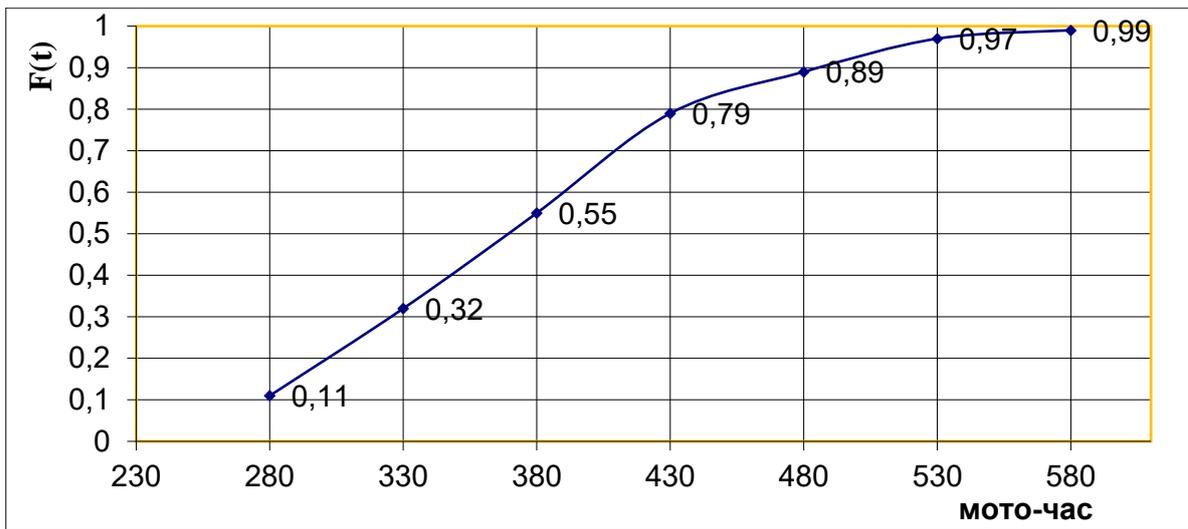


Рис. 12.2. Гистограмма функции F(t).

*Критерий согласия опытных и теоретических распределений показателей надежности*

При применении теоретического закона распределения изучаемого параметра надежности для выравнивания (сглаживания) опытных данных (информации) стремятся к максимальному совпадению опытной и теоретической вероятностей. Физический смысл проверки "согласия" опытных и теоретических распределений показателя надежности заключается в том, чтобы определить *степень их расхождения*. При выборе теоретического закона необходимо стремиться к совпадению теоретических вероятностей с опытными данными с наименьшими величинами расхождения.

#### *Определение критерия согласия Пирсона $\chi^2$*

Критерий согласия оценивает как далеко отстоят друг от друга точки интегральной кривой теоретического закона от точек опытной кривой накопленной вероятности  $\sum P_i$  статистического ряда.

Для определения  $\chi^2$  рассматриваемого теоретического закона необходимо:

1. Укрупнить статистический ряд. Правило построения данного ряда:

а) объединить ряд последовательных интервалов между собой, если в них значение частоты  $m$  меньше 4. Количество интервалов должно быть не меньше 4-х и не более 6...8

б) сложить значения частоты  $m$  объединяемых интервалов. В каждом объединенном интервале значение частоты  $m_i$  должна быть не менее 5.

2. В каждый укрупненный интервал записать значение интегральной функции  $F(t)$ , равное значению последнего интервала, объединенных между собой.

3. Определить теоретическую частоту  $m_T$  каждого укрупненного интервала.

Значение  $m_T$  определяется по формуле:

$$m_T = N [F(t_i) - F(t_{i-1})] \quad (12.19)$$

где  $F(t_i)$  – значение интегральной функции  $i$ -го интервала,

$F(t_{i-1})$  – значение интегральной функции предшествующего интервала,

$N$  – общее число информации.

4. Определить численное значение  $\chi^2$

$$\chi^2 = \sum \frac{(m_i - m_{Ti})^2}{m_{Ti}} \quad (12.20)$$

где  $m_i$  – опытная укрупненная частота данных информации,

$m_{Ti}$  – теоретическая укрупненная частота данных информации

Для определения степени совпадения (в процентах) опытных данных информации с выбранным теоретическим законом по специальной таблице (таблица 7 приложения), которая называется "Вероятность совпадения  $P(\%)$  теоретического закона по критерию согласия  $\chi^2$ ", необходимо:

1. Определить порядковый № строки в данной таблице:

$$№ = n_{\text{укр}} - r \quad (12.21)$$

где  $n_{\text{укр}}$  – число укрупненных интервалов;  $n_{\text{укр}} = 4$ ,

$R$  – число параметров, определяющих закон.

Так как для закона ЗРВ  $r$  равно 3 (2 параметра распределения  $a$  и  $b$  третий параметр  $C$  - смещение), то:  $№ = n_{\text{укр}} - 3$

2. По выбранной строке таблицы найти ближайшее значение  $\chi^2_{\text{теор}}$ , близкое к полученной расчетной величине  $\chi^2$  и определить величину  $P(\%)$ . Чем выше значения вероятности  $P(\%)$  рассматриваемого теоретического закона, тем более он применим для выравнивания опытных статистических данных информации.

Таблица 12.13. Вероятность совпадения P(%) теоретического закона по критерию согласия  $\chi^2$

№ строки	P (%)	95	90	80	70	50	30	20	10
1		0,00	0,02	0,06	0,15	0,45	1,07	1,64	2,71
2	$\chi^2_{\text{теор}}$	0,10	0,21	0,45	0,71	1,39	2,41	3,22	4,60
3		0,35	0,58	1,00	1,42	2,37	3,66	4,64	6,25
4		0,71	1,06	1,65	2,20	3,36	4,88	5,99	7,78
5		1,14	1,61	2,34	3,00	4,35	6,06	7,29	9,24

Критической вероятностью совпадения значений выбранного теоретического закона с опытными данными принято считать  $P = 10\%$ . Если  $P < 10\%$ , выбранный для выравнивания теоретический закон распределения следует считать непригодным.

*Определение значения критерия согласия Пирсона  $\chi^2$*

1. Укрупняется статистический ряд.

а) Таблица 12.14. Исходная таблица статистического ряда

Границы интервала	230	280	330	380	430	480	530
	280	330	380	430	480	530	580
Значение m	3	5,5	8,5	6	3	3	1
Значение F(t)	0,11	0,32	0,55	0,79	0,89	0,97	0,99

б) Таблица 12.15. Укрупненная таблица статистического ряда

Границы интервала	230	330	380	430
	330	380	430	580
Значение m	8,5	8,5	6	7
Значение F(t)	0,32	0,55	0,79	0,99

2. Определяется теоретическая частота  $m_T$  каждого укрупненного интервала.

Согласно формулы 12.19 (результаты округляются до 0,5):

$$m_1 = 30 \cdot (0,32 - 0) = 10 \quad m_3 = 30 \cdot (0,79 - 0,55) = 7$$

$$m_2 = 30 \cdot (0,55 - 0,32) = 7 \quad m_4 = 30 \cdot (0,99 - 0,79) = 6$$

3. Определяется значение  $\chi^2$ . Согласно формуле 12.20:

$$\chi^2 = \frac{(8,5 - 10)^2}{10} + \frac{(8,5 - 7)^2}{7} + \frac{(6 - 7)^2}{7} + \frac{(7 - 6)^2}{6} = 0,23 + 0,32 + 0,14 + 0,17 = 0,86$$

4. Определяется № строки.

Согласно формуле 12.21 номер строки будет равен:

$$n = 4 - 3 = 1$$

5. Определяется величина  $P(\%)$  и сравнивается  $\chi^2_{\text{теор}}$  с расчетным  $\chi^2$ .

Согласно таблице расчетное  $\chi^2$  по первой строчке соответствует (с учетом интерполяции) 37%, что вполне допустимо.

Таким образом, для сглаживания опытных данных, представленных в информации, выбранный теоретический закон - закон распределения Вейбулла может быть использован.

#### Контрольные вопросы.

1. Применение усеченного закона нормального распределения (ЗНР)
2. Как укрупнить интервалы по величине  $m$ ?
3. Как определяются значения интегральной функции для укрупненных интервалов?
4. Как определить теоретическую частоту  $m_T$  каждого укрупненного интервала?
5. Как определяется относительная ошибка переноса количественных показателей ЗНР?
6. Когда используется закон распределения Вейбулла?
7. Как определяется среднее квадратическое отклонение  $\sigma$ ?
8. Как определяют интегральную функцию  $F(t)$ ?
9. Определение критерия согласия Пирсона  $\chi^2$ .
10. Какое соотношение принято считать критической вероятностью совпадения значений выбранного теоретического закона с опытными данными?

## Глава 13. Понятие безотказности технических систем и транспортно-технологических машин

### 13.1. Оценочные показатели безотказности

**Безотказность** – свойство объекта *непрерывно* сохранять работоспособное состояние в течение некоторого времени или наработки (ГОСТ 27.002). Так как практически надежность всех сельскохозяйственных транспортных и технологических машин оцениваются их *наработкой* (Н) в моточасах или машино-часах, то в дальнейшем все технические показатели надежности данных машин будут выражаться в моточасах (м.ч.) или машино-часах (маш-ч).

Безотказность работы данных машин или ее элементов (агрегат, узел, деталь) оценивается *техническими* и *экономическими* показателями. Основными оценочными показателями безотказности работы транспортных и технологических машин являются:

- вероятность безотказной работы –  $P(H)$ ;
- наработка на отказ –  $T_o$ ;
- параметр потока отказов –  $\omega_p$ ;
- средние удельные затраты времени, труда и денежных средств на устранение отказов –  $V_б, T_б, Д_б$ .

#### 13.1.1 Вероятность безотказной работы

**Вероятность безотказной работы** – вероятность того, что в пределах *заданной наработки* отказ объекта не возникнет. Данный показатель является *безразмерным* и при его назначении или определении необходимо указывать наработку или время, в течение которых его значение должно быть не ниже указываемой (определяемой) величины. Для любой сельскохозяйственной транспортной и технологической машины (агрегата, узла) в нормативно-технической документации указывается значение наработки до отказа с начала эксплуатации или с начала возобновления эксплуатации машины (ее элементов) после ремонта. Если рассматриваемая машина или группа однотипных машин выполнит или перевыполнит заданную наработку, то надежность такой машины

(группы машин) считается очень высокой и принимается за 1 (единицу) или 100 %.

Данное определение можно записать в виде выражения:

$$P(H) = 1 \text{ при } H_{\text{эксп.}} > H_{\text{задан}} \quad (13.1)$$

где  $P(H)$  – вероятность безотказной работы рассматриваемой машины (группы машин),

$H_{\text{эксп.}}$  - наработка машины (машин) в период эксплуатации,

$H_{\text{задан}}$  - директивная (заданная) наработка, устанавливаемая в соответствии с нормативно-технической документацией.

При выпуске *большого* количества однотипных объектов слишком дорого иметь их высокую надежность, экономически нецелесообразно стремиться к тому, чтобы все объекты имели 100 % надежность. Только для объектов, отказ которых характеризуется катастрофическими последствиями (летательные аппараты, объекты военной техники, оборудование химического производства и ядерной энергетики и другие), показатель  $P(H)$  доходит до 0,9999.

Отказы технологического оборудования, транспортных и других машин, ряд бытовых приборов приводят, как правило, только к экономическому ущербу (потери производительности, появлению брака и т. д.). Поэтому для них показатель вероятности безотказной работы принимается в пределах 0,9...0,98. Для неответственных узлов и деталей, отказ которых не отражается существенно на работе машины или легко устраним, данный показатель может быть принят менее 0,9, но не ниже 0,8 даже для отремонтированных машин.

Вероятность безотказной работы выражается в долях единицы (или в процентах) и изменяется от единицы до нуля (или от 0 до 100%)

Функция  $P(H)$  монотонно убывает, так как вероятность отказа с увеличением наработки возрастает (рис.13.1). До наработки  $H_1$  вероятность безотказной работы равна 1.

Показатель *вероятность безотказной работы*  $P(H)$  является оценочным показателем надежности: - для группы однотипных объектов;

- для единичного объекта (машины, агрегата, машины узла, детали).

Если же говорить о величине показателя без отказной работы группы типовых объектов, то данный показатель указывает количество объектов (в %), которые выполняют заданную наработку в работоспособном состоянии.

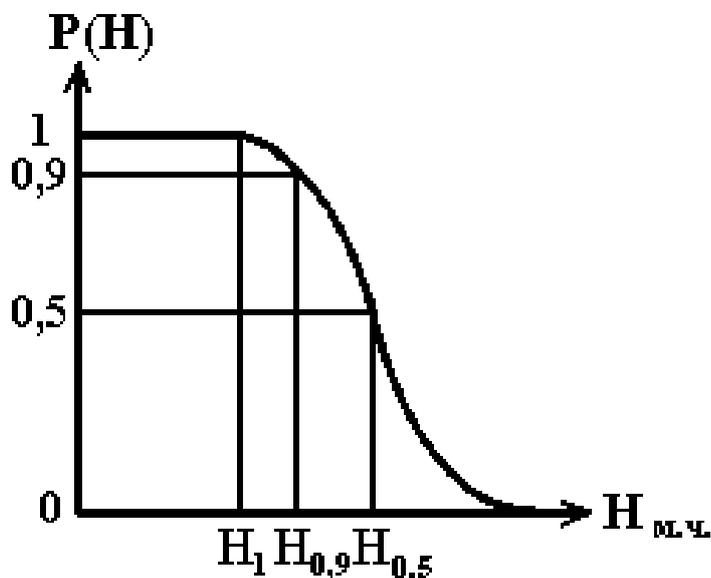


Рис.13.1. Функция безотказности машин.

Например, вероятность безотказной работы для группы одно марочных двигателей с наработкой в  $H = 8000$  м.ч. установлена 0,95. Это означает, что из рассматриваемой группы двигателей 95% от их общего числа выработают установленную для них наработку в 8000 м.ч., а 5

процентов двигателей потеряют свою работоспособность раньше установленной наработки. Назначение величины показателя вероятности безотказной работы для одного объекта говорит о том, что данный объект может отработать заданную наработку без отказа с указанной вероятностью. Например, если вероятность безотказной работы конкретного двигателя указана 0,95, это значит, что гарантируется 95%, что данный двигатель проработает без отказа в пределах установленной наработки.

Значение вероятности безотказной работы  $P(H)$  (использование объекта в зависимости от наработки) определяют различными способами, учитывая количество рассматриваемых объектов: штучные или выборка из генеральной совокупности. Для *конкретного* числа объектов – методом математической статистики, для *выборки* из генеральной совокупности – вероятностным методом.

При определении значения вероятности безотказной работы машин (ее элементов) *методом математической статистики* используют выражение:

$$P(i) = \frac{N-n(i)}{N} \quad (13.2)$$

где  $N$  - число объектов в начале эксплуатации,

$n(i)$ —число отказавших объектов, не выработавшие заданную наработку  $H_{зад}$ .

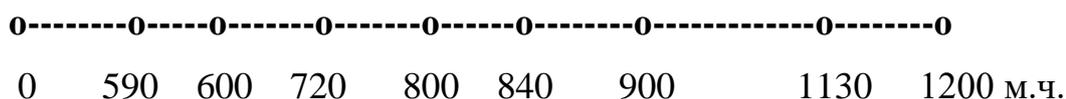
Предположим, наблюдается группа из 27 комбайнов. В процессе эксплуатации будут выходить из строя (отказ) то один, то другой, а то сразу несколько комбайнов. При этом примем условие, что отказавший комбайн будет снят с дальнейшего наблюдения.

Отсюда ясно, что максимальная наработка для данной группы комбайнов будет равна той наработке, которую выполнит до отказа последний комбайн. Предположим, что отказ у первого комбайна произошел при наработке 600 м.ч. У второго и последующих комбайнов отказ произошел при наработке 720 м.ч.. Далее отказы комбайнов произошли при наработке 800, 840, 900, 1130 м.ч., а у последнего комбайна произошел отказ при наработке в 1200 м.ч. Данные по наработке и отказам комбайнов при каждой наработке показаны в таблица 13.1:

Таблица 13.1. Нарботка и отказы комбайнов при каждой наработке.

Нарботка до отказа	600	720	800	840	900	1130	1200
Количество отказавших комбайнов	1	3	5	9	4	4	1

Изобразим общую наработку комбайнов в виде прямой, с указанием точек отказов, добавив точку наработки в 590 м.ч., при которой не было еще ни одного отказавшего комбайна:



Найдем вероятность безотказной работы данной группы комбайнов в каждом интервале наработки от начала эксплуатации до очередного отказа.

Для этого воспользуемся формулой определения вероятности безотказной работы методом математической статистики:

$$P = \frac{N-n}{N} \quad (13.3)$$

где N - число комбайнов в начале работы = 27,

n - число отказавших комбайнов при рассматриваемой наработке.

$$P = \frac{27-0}{27} = 1$$

$$P = \frac{27-18}{27} = 0,33$$

$$P = \frac{27-1}{27} = 0,96$$

$$P = \frac{27-22}{27} = 0,19$$

$$P = \frac{27-4}{27} = 0,85$$

$$P = \frac{27-26}{27} = 0,04$$

$$P = \frac{27-9}{27} = 0,66$$

$$P = \frac{27-27}{27} = 0$$

Отсюда выводы:

1. со 100 % уверенностью можно утверждать, что комбайны не выйдут из строя, если им будет установлена наработка до 600 моточасов;
2. если комбайнам установят директивную наработку в 800 моточасов, то вероятность того, что они не выйдут из строя при выполнении данной наработки составит 0,66 или 66%;
3. если комбайнам установят наработку в 1200 моточасов, то вероятность их работы без поломок равна нулю.

При определении значения вероятности безотказной работы машины (ее элементов) или группы машин *вероятностным методом* для закона нормального распределения используют аналитическое выражение:

$$F_0(H) = F_0\left(\frac{H_{\text{ср}} - H_i}{\sigma}\right) \quad (13.4)$$

где  $H_{\text{ср}}$  – среднее значение наработки,

$H_i$  - рассматриваемое значение наработки,

$\sigma$  - среднее квадратическое отклонение.

*Пример.* При наблюдении за 16 тракторами Т10М было определено, что рассеивание величин наработки у данных тракторов составляет  $H_{\text{ср}} = 2300$  м.ч. и  $\sigma = 425$  м.ч. Требуется определить величину безотказной работы тракторов при наработке 1800 м.ч. Для определения  $P(H)$  воспользуемся значениями квантилей закона нормального распределения  $U_\alpha$  (фрагмент таблицы их значений дан в таблице 13.2).

$$F_0(H) = F_0(U_\alpha) = \alpha \quad (13.5)$$

$$F_0(U_\alpha) = [(2300 - 1800)/425] = 1,176.$$

Из таблицы 13.2 находим, что значение квантиля 1,176 соответствует значе-

нию вероятности безотказной работы 0,88

Таблица 13.2. Значениями квантилей закона нормального распределения

$F_0(H) = \alpha$	0,8	0,82	0,84	0,86	0,88
$U_\alpha$	0,842	0,915	0,994	1,080	1,175
$F_0(H) = \alpha$	0,90	0,92	0,94	0,96	0,98
$U_\alpha$	1,282	1,405	1,555	1,751	2,054

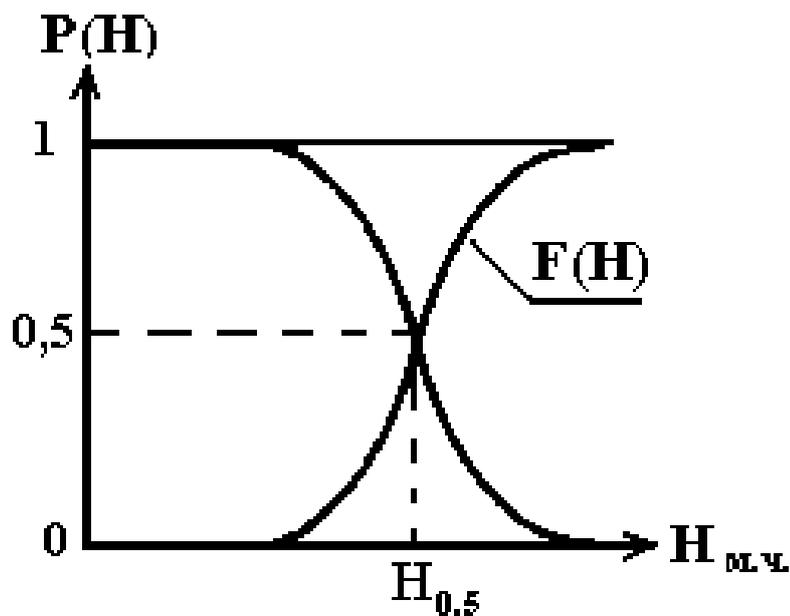
Для закона распределения Вейбулла методика определения значения вероятности безотказной работы вероятностным методом аналогична.

На практике иногда более удобной характеристикой надежности изделия может являться показатель *вероятность отказа*  $F(H)$  (рис. 13.2). *Вероятность отказа* – вероятность того, что при эксплуатации объекта в пределах заданной наработки возникнет хотя бы один отказ.

Так как отказ и безотказная работа являются событиями несовместимыми и противоположными, поэтому, согласно теории вероятности:

$$F(H) = 1 - P(H) \quad (13.6)$$

Рассматривая пример о 27 комбайнах и учитывая формулу 13.2, можно говорить, что: 1) вероятность отказа при наработке экскаваторов до 600 м.ч.



равна нулю;

2) соответственно вероятность отказа для значений наработок в 720 м.ч. составит 15% для наработок 900 м.ч. - 81% и для наработки 1200 м.ч.  $F(H) = 1,0$  (100%).

Определение численного значения вероятности безотказной работы и соответ-

Рис. 13.2. Вероятность отказа машин.

ственно значения вероятности отказа производится при испытаниях новых или модернизированных машин. На практике значение вероятности безотказной работы является *директивной* (за-

ранее установленной) величиной и, как было отмечено выше, ее значение должно быть не менее 0,8 для всех сельскохозяйственных транспортных и технологических машин и их элементов.

Вероятность безотказной работы машины зависит от числа деталей, узлов и агрегатов в машине и их вероятности безотказной работы. Поэтому величина безотказной работы в целом машины есть произведение значения вероятности безотказной работы ее элементов (по теореме умножения вероятностей).

Директивная наработка, значение которой задается исходя из устанавливаемой величины вероятности безотказной работы машины или ее элементов, должна выполняться до первого отказа либо от начала эксплуатации или от возобновления эксплуатации машины (элементов) после ремонта.

Определение численного значения вероятности безотказной работы и соответственно значения вероятности отказа производится при испытаниях новых или модернизированных машин, а также машин после ремонта. То есть, данный показатель надежности изделия характеризует надежность изделия до первого отказа и практически не используется как характеристика надежности изделия между отказами, возникающие в процессе эксплуатации изделия.

Этот же показатель является основным для характеристики надежности *неремонтируемых изделий*, например, подшипники качения и др., так как возникший отказ является первым и последним.

Но за срок эксплуатации машины (ее элементов) до ремонта (или после ремонта) происходят неоднократные отказы. Поэтому длительность работоспособного состояния машины между отказами для оценки безотказности работы ее работы играет большую роль. Для характеристики безотказной работы машины или ее элементов между отказами введен оценочный показатель – *средняя наработка на отказ*.

### **13.2. Средняя наработка на отказ**

Для оценки надежности по безотказности работы одной ли машины или для группы однотипных машин собирают информацию о наработке и количестве отказов за период их эксплуатации и определяют еще один технический пока-

затель безотказности изделия – *среднюю наработку на отказ*  $\hat{H}_{от}$ . Размерность этого показателя: характеристика наработки, деленная на отказ. Например, моточас/отказ; м<sup>3</sup>/отказ; га/отказ и т. п.

Средняя наработка на отказ показывает величину произведенной полезной работы (наработку) машиной между двумя отказами. Естественно, что чем больше величина наработки между отказами, тем надежность машины выше. Данный показатель может оценивать безотказность работы как новой машины, так и отремонтированной. Нарботка на отказ определяется из выражения:

$$\hat{H}_{от} = \frac{\sum H_i}{\sum m_i} \quad (13.7)$$

где  $\hat{H}_{от}$  = единица наработки / отказ,  $H_i$  – наработка  $i$ -ой машины или ее элемента,  $m_i$  - количество отказов машины или ее элемента за планируемую наработку.

*Пример.* Организация эксплуатирует 7 тракторов. В таблице 13.3 дана информация по их эксплуатации до предельного состояния (маш-ч) и количество отказов у каждой машины за период ее эксплуатации до предельного состояния.

Таблица 13.3. Количество отказов у каждой машины за период ее эксплуатации до предельного состояния.

№ машины	1	2	3	4	5	6	7
Нарботка до предельного состояния	790	930	1120	1240	1275	1320	1520
Число отказов	7	8	10	12	13	12	14

Общая наработка всех тракторов составит 8195 маш-ч., общее число отказов – 76. Нарботка на отказ равна  $8195 / 76 = 107,8$  маш-ч.

Данный показатель необходим для:

- 1) сравнения по надежности новой и отремонтированной машины или ее элементов;
- 2) сравнения уровня эксплуатации в разных организациях однотипных машин;
- 3) оценки качества устранения отказов.

### 13.3. Поток отказов

Показатель безотказной работы  $P(H)$  не учитывает характера самих отказов. Часто встречаются случаи, когда  $P(H)$  теряет наглядность, поэтому для оценки безотказности объекта требуются другие показатели. Например, значение  $P(H)$  мало, но в основном преобладают малозначимые и легко устранимые отказы (замена электролампочки, протирка загрязненного стекла, замена свечи двигателя и др.). И там, где показатель безотказности работы не является достаточно объективным показателем надежности, используют такой показатель безотказности как *параметр потока отказов*.

Данный показатель безотказности относится к *восстанавливаемым* машинам, а также к агрегатам и узлам. Для этих объектов, у которых вероятно многократное появление отказа, наблюдается поток отказов. Поток отказов характеризуется *параметром потока отказов*  $\omega_0$  при выполнении *заданной* (планируемой) наработки. По физическому смыслу параметр потока отказов представляет собой скорость появления отказов. *Параметр потока отказов*  $\omega_0$  - это количество отказов на единицу наработки.

$$\omega_{\Pi} = \sum_{i=1}^n \frac{m_i}{H_i} \quad (13.8)$$

$\omega_{\Pi}$  = отказ / единица наработки

где  $m_i$  – количество отказов  $i$  – ого объекта за весь период испытаний или наблюдений во время эксплуатации,

$H_i$  –установленная наработка при испытании или наблюдении в период эксплуатации для данного объекта.

Для восстанавливаемого объекта образуется равномерный поток отказов, при котором средняя скорость появления отказов остается примерно постоянной в течение всего периода эксплуатации объекта.

Это же явление характерно и для группы однотипных машин, агрегатов, узлов. Рассмотрим таблицу 3.11. Определим параметр потока отказов для каждого трактора (отказ/м.ч.):

$$\omega_1 = \frac{7}{790} = 0,0089; \quad \omega_1 = \frac{8}{930} = 0,0086; \quad \omega_1 = \frac{10}{1120} = 0,0089 ;$$

$$\omega_1 = \frac{12}{1240} = 0,0097; \quad \omega_1 = \frac{13}{1275} = 0,0102; \quad \omega_1 = \frac{12}{1320} = 0,0091;$$

$$\omega_1 = \frac{14}{1520} = 0,0092$$

Как видно из приведенного расчета величина скорости появления отказов для группы однотипных объектов примерно одна и та же. Ее среднее значение для 7 тракторов (сложить все  $\omega_{\Pi}$  и разделить на  $N = 7$ ) будет равно 0,0093 (отказ/наработка).

Из анализа формулы 13.8 видно, что значение параметра потока отказов является обратной величиной наработки:

$$\omega_{\Pi} = 1 / H \quad (13.9)$$

Для приведенного примера наработка на отказ составит:

$$H = 1 / \omega_{\Pi} = 1 / 0,0093 = 107,8 \text{ м}$$

Потоки отказов у машин являются сложными, т.е. состоящими из простых потоков, а поэтому параметр сложного потока складывается из параметров простых потоков:

$$\omega_{\Sigma} = \sum \omega_i \quad (13.10)$$

Это обстоятельство используется при анализе отказов сложных систем. Рассматривая поток отказов всей машины, разбивают его на потоки отказов механических, гидравлических, электромеханических и электронных систем или разделяют машину на функциональные блоки, агрегаты или узлы и оценивают удельный вес каждого простого потока отказов.

Данный показатель безотказности работы объекта удобен для организации работы по эксплуатации и планирования ремонта парка машин, позволяет рассчитывать необходимый запас запасных частей, материалов, различных материалов, рабочей силы и т.п. Для этого надо знать число отказов данных машин или их элементов за планируемую наработку (чаще всего за год) или за планируемую наработку для каждой конкретной машины.

Количество отказов определяется как:

$$m = \omega_{\Pi} \cdot H_{\Pi\Pi} \cdot N \quad (13.11)$$

Воспользуемся выше приведенным примером. В организации эксплуатируется 7 тракторов. Нарботка на отказ составила 107,8 м.ч. Планируется наработка на очередной год – 1350 маш.ч. на каждую машину. Тогда, количество отказов за год для данного парка машин составит:

$$m = \frac{1}{107,8} \cdot 1350 \cdot 7 = 87,6 = 88 \text{ отказов}$$

Таким образом, зная количество отказов и предполагаемые их виды можно спланировать материальные и технические ресурсы для их устранения.

#### 13.4. Экономические показатели безотказности.

Экономическими показателями безотказной работы изделия являются средние *удельные затраты времени, труда и денежных средств*.

Данные величины определяются по следующим формулам:

$$B_o = \frac{1}{N} \cdot \sum_i^N \frac{B_i}{H_i} \quad (13.12)$$

$$T_o = \frac{1}{N} \cdot \sum_i^N \frac{T_i}{H_i} \quad (13.13)$$

$$D_o = \frac{1}{N} \cdot \sum_i^N \frac{D_i}{H_i} \quad (13.14)$$

где N – количество машин в эксплуатации,

$B_i$ ;  $P_i$ ;  $D_i$  - соответственно суммарные затраты времени, труда и денежных средств на устранение отказов  $i$ -ой машины;

$H_i$  – наработка  $i$ -ой машины.

Рассмотрим приведенный выше пример для определения средней величины удельных затрат времени на устранение одного отказа. Было установлено суммарное время устранения отказов по каждому трактору. Данные приведены в таблице 13.4.

Таблица 13.4. Время устранения отказов по каждому трактору

№ машины	1	2	3	4	5	6	7
Нарботка до предельного состояния	790	930	1120	1240	1275	1320	1520
Время устранения отказов ч	158	190	257	274	384	336	293

Определим среднюю величину удельных затрат времени на устранение одного отказа:

$$V_0 = \frac{1}{7} \cdot \left( \frac{158}{790} + \frac{190}{930} + \frac{257}{1120} + \frac{274}{1240} + \frac{384}{1275} + \frac{336}{1320} + \frac{293}{1520} \right) = 0,23 \text{ час/маш.ч.}$$

При планируемой наработке 1350 маш.ч. на каждую машину на год эксплуатации общее время на устранение отказов для данного парка тракторов составит:

$$V = v_0 \cdot N \cdot N_{пл} = 0,23 \cdot 7 \cdot 1350 = 2174 \text{ час,}$$

или при 8-ми часовом рабочем дне 2-х слесарей-наладчиков – 136 дней *только* для обслуживания данных 7-ми тракторов.

Аналогичные расчеты можно сделать и для определения трудозатрат и денежных средств.

#### Контрольные вопросы

1. Дайте определение понятия «безотказность».
2. Как графически изображается функция безотказности машин.
3. Приведите формулу определения вероятности безотказности машин методом математической статистики.
4. Что такое «вероятность отказа» ?
5. Назовите показатель надежности для неремонтируемых изделий.
6. Как определяется средняя наработка на отказ?
7. Что такое «поток отказов» ?
8. С какой целью используют показатель «поток отказов» машин при планировании ремонта парка машин?
9. Как определяется средняя величина удельных затрат времени на устранение одного отказа?

## Глава 14. Понятие о долговечности технических систем и транспортно-технологических машин

### 14.1. Оценочные показатели долговечности

*Долговечность* - свойство объекта сохранять работоспособное состояние до наступления предельного состояния при установленной системе технического обслуживания и ремонта (ГОСТ 27.002). Другими словами, долговечность – это длительность работы машины (элементов) от начала ее эксплуатации и возобновление эксплуатации после ремонта (если он предусмотрен) до предельного состояния.

Еще раз напомним понятие *предельного состояния* объекта – состояние объекта, при котором его дальнейшая эксплуатация недопустима или нецелесообразна, либо восстановление его работоспособного состояния невозможно или нецелесообразно (ГОСТ 27.002)

Долговечность транспортных и технологических машин (агрегатов, узлов) – это не столько *техническая*, сколько *экономическая* категория. Предельное состояние машины (ее элементов) определяется ее моральным износом или затратами, связанными с физическим износом. Под моральным износом машины понимают невыгодность ее использования в связи созданием машины более экономической и производительной. О полном физическом износе машины говорят тогда, когда затраты на проведение устранения отказов, технических обслуживаний и ремонтов превышают стоимость новой машины. Поэтому основные показатели долговечности подразделяются на технические и экономические.

Технические показатели долговечности количественно оцениваются с помощью двух групп: ресурса как показателя, связанного с наработкой машины, агрегата, узла, и срока службы. Каждая из них имеет много разновидностей, но наиболее широко используемые:

- средний ресурс –  $T_{cp}^p$ ;
- гамма-процентный ресурс –  $T_{(\gamma\%)}^p$ ;
- средний срок службы –  $T_{cp}^c$ .

Экономическими показателями долговечности являются средние удельные затраты времени –  $V_{д}$ , труда –  $T_{д}$  и денежных средств –  $D_{д}$  на устранение эксплуатационных и (эо) ресурсных (ро) отказов.

Ресурс и срок службы транспортных и технологических машин и их агрегатов могут оцениваться до первого капитального ремонта (доремонтный ресурс, доремонтный срок службы), после ремонта до списания (послеремонтный ресурс, послеремонтный срок службы) и за весь период эксплуатации машины, агрегата (полный ресурс, полный срок службы).

#### 14.2 Средний ресурс или средний срок службы

Как было отмечено выше, средний ресурс и средний срок службы для сельскохозяйственных транспортных и технологических машин и их агрегатов, узлов и деталей подразделяется на доремонтные и послеремонтные значения. Количественные показатели среднего доремонтного ресурса или среднего доремонтного срока службы определяются либо методом математической статистики или вероятностным методом. Значения среднего послеремонтного ресурса и среднего послеремонтного срока службы объекта не отличаются от методики определения среднего доремонтного ресурса или среднего срока службы, так как считается, что после капитального ремонта эксплуатация машины или агрегата происходит по тем же законам, но с меньшими величинами параметров долговечности. Значение среднего *полного* ресурса и *полного* среднего срока службы есть сумма значений доремонтного и послеремонтного ресурсов и сроков службы.

Величину среднего доремонтного ресурса или среднего доремонтного срока службы объекта при обработке данных испытаний или эксплуатационных наблюдений методом математической статистики определяют из выражения:

$$T_{\text{ср. др.}}^p = \sum T_{\text{др.}(i)}^p / K \quad (14.1)$$

$$T_{\text{ср. др.}}^c = \sum T_{\text{др.}(i)}^{c.c.} / K \quad (14.2)$$

где  $T_{\text{др.}(i)}^p$  – доремонтный ресурс  $i$  – го объекта;

$T_{\text{др.}(i)}^{c.c.}$  – доремонтный срок службы  $i$  – го объекта;

$K$  – число наблюдаемых однотипных объектов.

Средний доремонтный ресурс или средний доремонтный срок службы объекта при обработке данных испытаний или эксплуатационных наблюдений вероятностным методом определяют из выражения:

$$T_{\text{ср. др.}}^{\text{р. ин}} = \sum (T_{\text{др.р(i)}}^{\text{ср. ин}} \cdot P_i^{\text{ин}}) \quad (14.3)$$

$$T_{\text{ср. др.}}^{\text{с.с.}} = \sum (T_{\text{др.с.с(i)}}^{\text{ср. ин}} \cdot P_i^{\text{ин}}) \quad (14.4)$$

где  $T_{\text{др.р(i)}}^{\text{ср. ин}}$  – средние значения интервальных доремонтных ресурсов;

$T_{\text{др.с.с(i)}}^{\text{ср. ин}}$  – средние значения интервальных доремонтных сроков службы;

$P_i$  – интервальная вероятность  $i$ -го ресурса или срока службы.

Данные выражения служат, соответственно, и для определения среднего послеремонтного ресурса или после ремонтного срока службы.

Средний ресурс или средний срок службы есть характеристика среднего уровня долговечности изучаемого объекта. Зная этот параметр для эксплуатируемой группы однотипных машин или одной машины, можно определять:

- объем производства запасных частей, узлов и агрегатов;
- число ремонтов машин (машины) за период эксплуатации;
- планирование убыли и пополнения парка машин;
- экономические затраты эксплуатации данного парка машин (машины).

Применение среднего ресурса как показателя долговечности для *большой группы* однотипных машин *длительного пользования* нецелесообразно, так как получение этого показателя или для его проверки в этом случае требует весьма длительных наблюдений в процессе эксплуатации или проведение испытания до разрушения всех, либо большей части элементов данной группы машины.

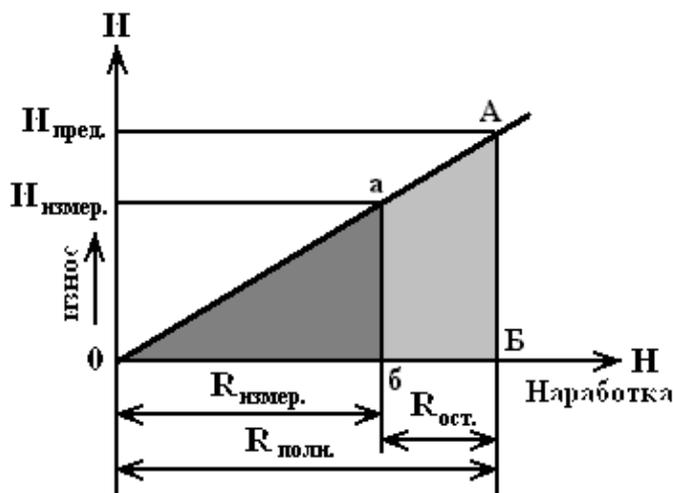
### 14.3. Определение остаточного ресурса детали

Данный метод определения остаточного ресурса детали осуществляется после контроля размеров трущихся поверхностей детали при дефектовке детали в процессе разборочно-сборочных работ при ремонте узла. В неработоспособное состояние узел, как правило, переходит при выработке ресурса одной, реже сразу двух деталей. Но остальные детали, входящие в состав узла, свой ресурс не выработывают. Поэтому задача дефектовщика в том, чтобы определить остаточный ресурс этих деталей и дать заключение о возможности или невозможности

их дальнейшей эксплуатации с учетом их ресурса до следующего ремонта узла. Если ресурс детали меньше, чем необходим до следующего ремонта, то деталь выбраковывается, если же больше – деталь вновь устанавливается в ремонтируемый узел. Поэтому при дефектовке существуют два понятия предельных износов:

1) *предельный износ* трущейся поверхности детали, который характеризует ресурсный отказ детали и

2) *допустимый износ* поверхности детали, который характеризует *остаточный* ресурс детали, который



- $R_{полн.}$  - полный ресурс детали
- $R_{ост.}$  - остаточный ресурс детали
- $R_{измер.}$  - выработанный ресурс детали на момент измерения размера детали
- $I_{измер.}$  - величина износа поверхности детали на момент измерения ее размера

Рис. 14.1. Зависимость износа от наработки детали.

может быть больше или меньше, или равный, установленному межремонтному ресурсу узла, агрегата или машины.

Для определения остаточного ресурса детали можно воспользоваться схемой, характеризующую зависимость между величиной износа трущейся поверхности детали и ресурсом, определяемым величиной наработки на момент проведения дефектовки детали (рис. 14.1).

Из подобия треугольников  $OAB$  и  $Oab$ , можно записать:

$$\frac{I_{пред}}{I_{измер}} = \frac{R_{полн}}{R_{измер}} \quad \text{тогда:} \quad R_{полн} = R_{измер} \cdot \frac{I_{пред}}{I_{измер}} \quad (14.5)$$

$$\text{и} \quad R_{ост} = R_{полн} - R_{измер} \quad (14.6)$$

*Пример.* Определить остаточный ресурс шестерни коробки передач трактора Т-10М, если при наработке 2000 м.ч. ( $R_{измер} = 2000$  м.ч.) при дефектовке зубьев данной шестерни было выявлено, что минимальная толщина одного из зубьев составила 8,76 мм. Согласно нормативно-технической документации предель-

ная минимальная толщина зуба шестерни составляет 8,34 мм, а минимальная толщина зубьев новой шестерни по чертежу составляет 9,19 мм.

*Решение:*

1. определяется предельный износ зуба шестерни:

$$I_{\text{пред}} = h_{\text{мин. чертеж}} - h_{\text{пред}} = 9,19 - 8,34 = 0,85 \text{ мм}$$

2. определяется величина износа зуба при измерении:

$$I_{\text{изм}} = h_{\text{мин. чертеж}} - h_{\text{изм}} = 9,19 - 8,76 = 0,43 \text{ мм}$$

3. определяется полный ресурс шестерни:

$$R_{\text{полн}} = R_{\text{измер}} \cdot \frac{I_{\text{пред}}}{I_{\text{измер}}} = 2000 \cdot \frac{0,85}{0,43} = 3954 \text{ м. ч.}$$

4. определяется остаточный ресурс шестерни:

$$R_{\text{ост}} = R_{\text{полн}} - R_{\text{измер}} = 3954 - 2000 = 1954 \text{ м. ч.}$$

*Вывод:* если величина остаточного ресурса больше установленного межремонтного ресурса для данной шестерни, то шестерня вновь устанавливается в коробку передач, если меньше – шестерня выбраковывается.

В технических условиях на дефектацию для каждой изнашиваемой детали указаны допустимые при ремонте размеры (а не износы), что облегчает работу дефектовщика.

#### 14.4. Определение остаточного ресурса сопряжения

Методика определения остаточного ресурса сопряжения 2-х деталей аналогична методике определения остаточного ресурса одной детали. За начальный зазор берут величину максимального начального зазора по чертежу сопряжения. Схема, с помощью которой определяется остаточный ресурс сопряжения представлена на рис 14.2. Остаточный ресурс сопряжения находится из выражения:

$$\frac{S_{\text{пред}} - S_{\text{нач.тах.}}}{S_{\text{измер}} - S_{\text{нач.тах.}}} = \frac{R_{\text{полн}}}{R_{\text{измер}}} \quad \text{тогда:} \quad R_{\text{полн}} = R_{\text{измер}} \cdot \frac{S_{\text{пред}} - S_{\text{нач.тах.}}}{S_{\text{измер}} - S_{\text{нач.}}} \quad (14.7)$$

$$\text{и} \quad R_{\text{ост}} = R_{\text{полн}} - R_{\text{измер}}$$

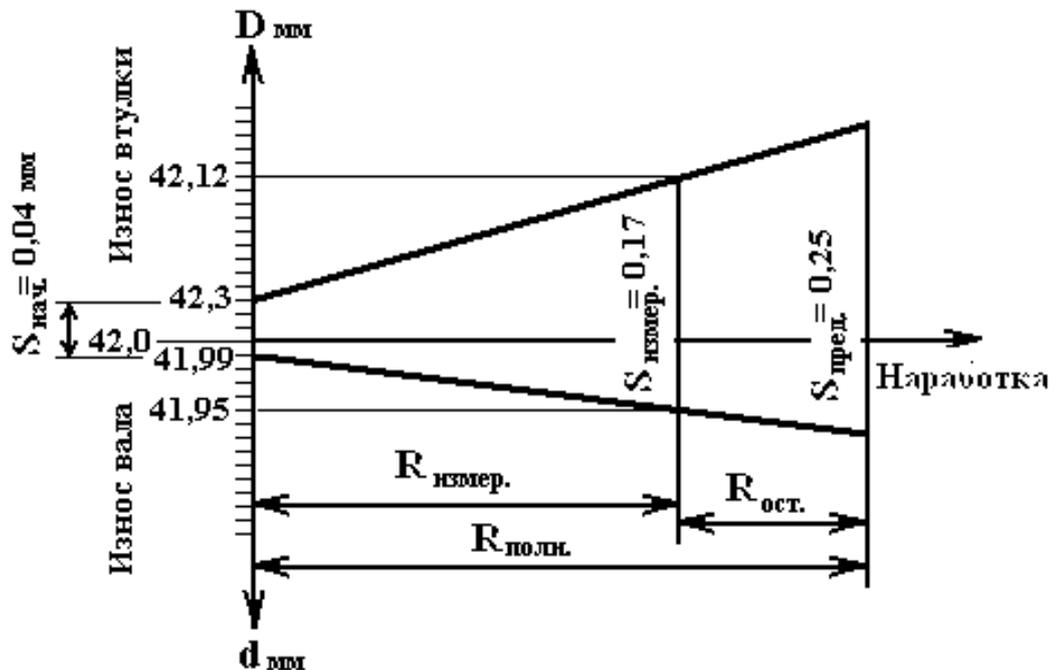


Рис. 14.2. Остаточный ресурс сопряжения

*Пример 1.* Определить остаточный ресурс сопряжения при наработке 1800 м.ч. ( $R_{\text{измер}} = 1800$  м.ч.), если при дефектовке данного сопряжения оказалось:

- 1) диаметр втулки – 42,12 мм
- 2) диаметр вала – 41,95 мм

Из нормативно-технической документации было определено, что начальный максимальный диаметр втулки по чертежу равнялся 42,03 мм, начальный минимальный диаметр вала по чертежу равен 41,99 мм и начальный максимальный зазор между ними – 0,04 мм. Предельно допустимый зазор для данного сопряжения установлен 0,25 мм.

*Решение:*

1. определяется величина зазора изношенного сопряжения:

$$S_{\text{изм}} = 42,12 - 41,95 = 0,17 \text{ мм}$$

2. определяется полный ресурс сопряжения:

$$R_{\text{полн}} = 1800 \cdot \frac{0,25 - 0,04}{0,17 - 0,04} = 2908 \text{ м. ч.}$$

3. определяется остаточный ресурс сопряжения:

$$R_{\text{ост}} = 2908 - 1800 = 1108 \text{ м.ч.}$$

*Вывод:* если остаточный ресурс сопряжения меньше установленного доремонтного (до следующего ремонта) ресурса, то сопряжение выбраковывается.

Данную задачу можно решить, используя величину скорости изнашивания материалов сопряжения.

Остаточный ресурс сопряжения находится из выражения:

$$R_{\text{ост}} = (S_{\text{пред.}} - S_{\text{измер.}}) / w_c \quad (14.8)$$

где  $w_c$  – средняя скорость изнашивания сопряжения.

Средняя скорость изнашивания определяется как:

$$w_c = (S_{\text{измер.}} - S_{\text{мах. нач.}}) / R_{\text{измер.}} \quad (14.9)$$

*Решение:*

1. определяется средняя скорость изнашивания

$$w_c = (0,17 - 0,04) / 1800 = 0,000072 \text{ мм/м.ч.}$$

2. определяется остаточный ресурс

$$R_{\text{ост}} = (0,25 - 0,17) / 0,000072 = 1111 \text{ м.ч.}$$

Результаты расчетов по 2-м вариантам совпали.

*Пример 2.*

Определить остаточный ресурс сопряжения при наработке 1800 м.ч. ( $R_{\text{измер}} = 1800$  м.ч.), если при дефектовке данного сопряжения оказалось:

1) диаметр втулки – 40,18 мм

2) диаметр вала – 39,91 мм

Из нормативно-технической документации было определено, что начальный максимальный диаметр втулки по чертежу равнялся 40,04 мм, начальный минимальный диаметр вала по чертежу равен 39,94 мм и начальный максимальный зазор между ними – 0,10 мм. Предельно допустимый зазор для данного сопряжения установлен 0,34 мм. Величина межремонтного ресурса составляет 500 м.ч.

*Решение:* 1. определяется величина зазора сопряжения при измерении:

$$S_{\text{изм}} = 40,18 - 39,91 = 0,27 \text{ мм}$$

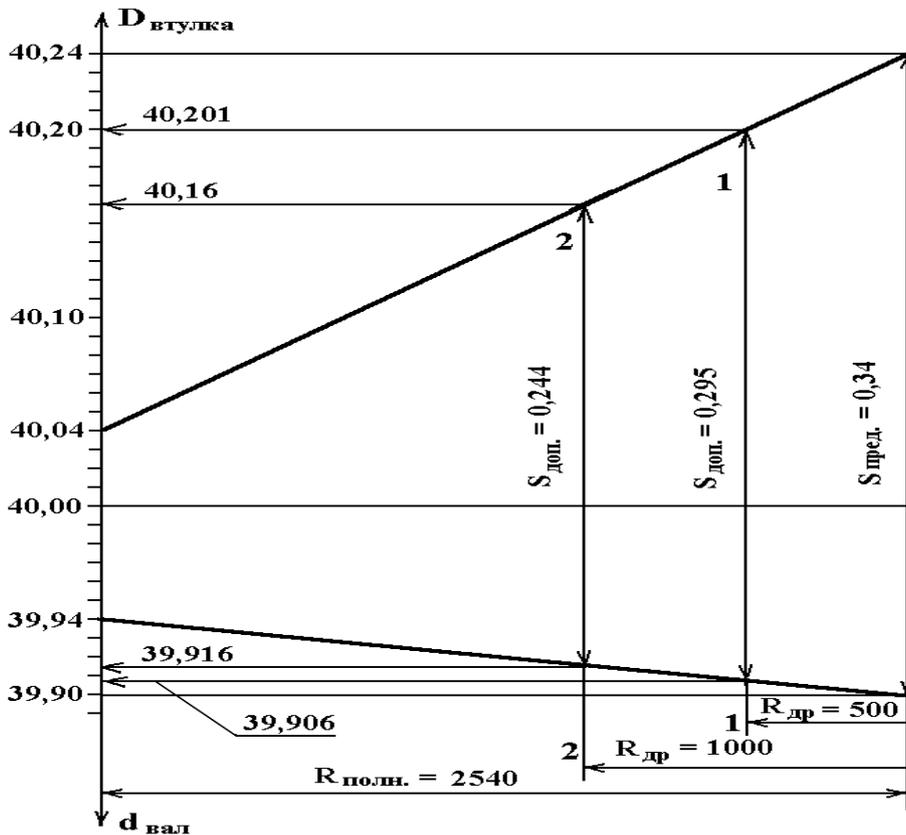
2. определяется средняя скорость изнашивания сопряжения:

$$w_c = (0,27 - 0,10) / 1800 = 0,000094 \text{ мм/м.ч.}$$

3. определяется остаточный ресурс сопряжения:

$$R_{\text{ост}} = (0,34 - 0,27) / 0,000094 = 745 \text{ м.ч.}$$

*Вывод:* остаточный ресурс сопряжения больше установленного межремонтного (до следующего ремонта) ресурса. Сопряжение вновь используется. Также как и для отдельной детали дефектовщик оценивает контролируемое сопряжение не по величине износа вала и втулки, а по величине *допустимого зазора*, естественно, зная размеры изношенной втулки и вала и вычтя из размера втулки размер вала. Если величина зазора в контролируемом сопряжении (при измерении) будет меньше



величины допустимого зазора  $S_{\text{пред.}}$  (0,34 мм), то вал и втулка остаются для дальнейшей эксплуатации, если больше – в ремонт или на списание.

Рис. 14.3. Схема дефектовки сопряжения вал-втулка.

Для определения допустимого зазора сопряжения необходимо отложить от линии предельного зазора влево значение межремонтного ресурса  $R_{\text{др}}$  и провести вертикаль 1-1 (рис.14.3) и от вертикали влево линии-стрелки с указанием допустимых размеров втулки и вала. Для нашего примера, когда  $R_{\text{др}}$  равно 500 м.ч., изношенный размер втулки составляет 40,201 мм и вала – 39,906 мм. Таким образом, *допустимый зазор* сопряжения для дальнейшей его эксплуатации равен 0,295 мм при межремонтном ресурсе в 500 м.ч. Полученный при дефектовке зазор в 0,27 мм, меньше чем допустимый, т.е. сопряжение остается в эксплуатации. Если межремонтный ресурс составлял бы 1000

м.ч., (вертикаль 2-2), то допустимый зазор был бы равен 0,244 мм, а полученный при дефектовке – 0,27 мм. *Вывод:* сопряжение в ремонт.

### 14.5. Определение остаточного ресурса сопряжения вероятностным методом

Необходимо отметить, что в рассмотренных примерах определение остаточного ресурса детали или сопряжения осуществлялось с использованием математической статистики. Если же рассчитывать остаточный ресурс вероятностным методом, то необходимо учитывать величину его рассеивания. Величина рассеивания остаточного ресурса детали или сопряжения характеризуется нижней ( $R^H$ ) и верхней ( $R^B$ ) доверительными границами при выбранной величине доверительной вероятности  $\beta$ . Значения этих границ определяются с учетом закона рассеивания остаточного ресурса (рис.14.4).

Естественно, что если речь идет об использовании детали или сопряжения для дальнейшей эксплуатации, то критерием принятия решения является значение *нижней доверительной границы* остаточного ресурса.

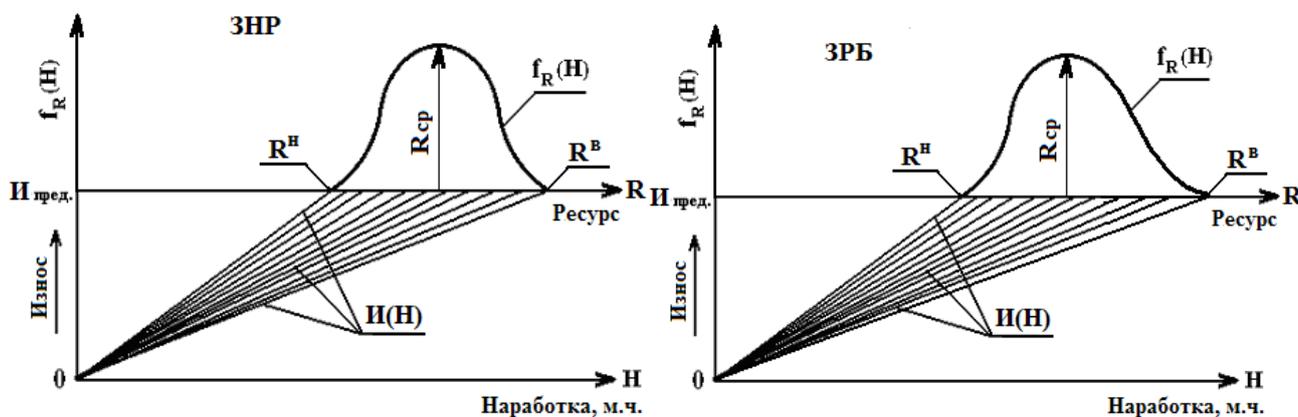


Рис. 14.4. Величина рассеивания остаточного ресурса детали или сопряжения

#### *Пример.*

В результате микрометража 42-х сопряжений вал-втулка было определено, что среднее значение остаточного ресурса данных сопряжений  $T_{ср}$  составляет 1360 м.ч., среднее квадратическое отклонение  $\sigma=440$  м.ч., смещение  $C=670$  м.ч. и коэффициент вариации  $V=0,52$ . Определить значение нижней доверительной границы рассеивания остаточного ресурса сопряжения при доверительной вероятности  $\beta = 0,9$ .

*Решение:*

Так как коэффициент вариации  $V$  более 0,5, то рассеивания остаточного ресурса сопряжения подчиняется закону распределения Вейбулла.

Рассмотрим 2 случая.

1) Предположим, что  $T_{cp}$  является средним значением в результате микрометража только этих 42 сопряжений вал-втулка. То есть, речь идет о том, что микрометраж проводится одной *единственной* группы деталей в количестве 42 штук. Тогда получаемый численный параметр надежности этой группы деталей (остаточный ресурс) носит название – *одиночное значение*.

Для одиночного значения величина нижней доверительной границы определяется как:

$$R^H = N_k^b \cdot ((1 - \beta) / 2) \cdot a + C \quad (14.10)$$

где  $N_k^b$  – квантиль закона распределения Вейбулла, который определяется по специальной таблице (см. приложение), согласно параметра закона "b";

a – параметр закона Вейбулла;  $a = 1,126 (T_{cp} - C)$ ;

C – сдвиг начала рассеивания определяемого параметра надежности;

Значение квантиля  $N_k^b$  соответствует значению функции:

$$F(t) = F[(1+\beta)/2] \text{ или функции } F[(1-\beta)/2]$$

Для нашего примера:  $a = 1,126 (1360 - 670) = 777$  м.ч.

b – определяется из таблицы 14.1. (таблица представлена сокращенной из приложения). Для  $V = 0,52$  значение b равно 2,0

Таблица 14.1. Параметр "b" закона распределения Вейбулла

V	0,73	0,68	0,64	0,61	0,58	0,55	0,52	0,50
b	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0	2,1

Из таблицы 14.2 (таблица представлена сокращенной из приложения) выбираем значение квантиля  $N_k^b$  при  $b = 2,0$  и  $F(t) = F[(1-\beta)/2] = 0,05$

Таблица 14.2. Квантили закона распределения Вейбулла

F(t)	Параметр b			
	2,0	2,5	3,0	3,5
0,01	0,10	0,16	0,22	0,27
0,03	0,18	0,25	0,31	0,37
0,05	0,23	0,31	0,37	0,43

Величина квантиля  $N_{\kappa}^b$  будет равна 0,23. Тогда значение величины нижней доверительной границы составит:  $R^H = 0,23 \cdot 777 + 670 = 848$  м.ч.

2) Предположим, что величина  $T_{cp}$  является средним значением измерения не одной группы деталей, как в первом случае, а средним значением измерения нескольких групп деталей (в каждой группе может быть разное число N). Тогда, получаемое  $T_{cp}^{гр}$  этих групп деталей, носит название – *среднее значение*, и нижняя доверительная граница остаточного ресурса будет определяться по следующей формуле:

$$R^H = (T_{cp}^{gp} - C) \cdot \sqrt[b]{r_3 + C} \quad (14.11)$$

где b - параметр закона Вейбулла,  $r_3$  -коэффициент закона Вейбулла, зависящий от заданной величины доверительной вероятности  $\beta$  и числа информации N из табл.14.3 (ниже таблица 14.3 представлена сокращенной из приложения).

Для сопоставимости результатов 1-го и 2-го случаев значение  $T_{cp}^{гр}$  получено как среднее значение из 42 средних значений каждой из 42 групп его значение также равно 1360 м.ч. Для N = 42 и  $\beta = 0,9$  значение  $r_3 = 0,78$ , следовательно:

$$R^H = (1360 - 670) \sqrt[2]{0,78} + 670 = 1280 \text{ м.ч.}$$

Как видно из полученного результата величина нижней доверительной границы остаточного ресурса сопряжения выше чем при определении одиночном значении ( $R^H = 848$  м.ч.) и является наиболее точной к действительной величине, так как при ее определении учитывалось значительно большее количество данных, чем при обработке математической статистикой и при одиночном значении. Результаты расчетов выше приведенного примера, если бы рассеива-

ние опытных данных информации подчинялось закону нормального распределения

Таблица 14.3. Величины доверительной вероятности  $\beta$

N	$\beta = 0,8$	$\beta = 0,9$	$\beta = 0,95$
	$r_3$	$r_3$	$r_3$
5	0,62	0,55	0,49
10	0,70	0,64	0,59
20	0,77	0,72	0,67
40	0,83	0,78	0,75
60	0,86	0,82	0,79
70	0,87	0,83	0,80
80	0,87	0,84	0,81
100	0,88	0,86	0,83

При рассеивании полученных результатов измерений в количестве 42 размеров (единичное значение) по закону нормального распределения нижняя доверительная граница рассеивания размеров определяется из выражения:

$$R^H = T_{cp} - t_{\beta} \cdot \sigma \quad (14.12)$$

где  $t_{\beta}$ - значение коэффициента Стьюдента при различной доверительной вероятности  $\beta$ , представленное в табл. 14.4 (выборочные значения из таблицы приложения). Значение  $t_{\beta}$  при данных  $\beta = 0,9$  числа информации  $K = 42$  будет 1,684.

Таблица 14.4. Коэффициент Стьюдента  $t_k$

Число информации	Доверительная вероятность $\beta$					
	0,7	0,8	0,9	0,95	0,98	0,99
	Коэффициент Стьюдента $t_k$					
3	1,336	1,886	2,920	4,30	6,96	9,92
5	1,190	1,533	2,130	2,77	3,75	4,60
8	1,119	1,415	1,895	2,36	3,00	3,50
10	1,100	1,383	1,833	2,26	2,82	3,25
12	1,088	1,363	1,796	2,20	2,72	3,11
15	1,076	1,345	1,761	2,14	2,62	2,98
20	1,066	1,328	1,729	2,09	2,54	2,86
25	1,059	1,318	1,711	2,06	2,49	2,80
30	1,055	1,310	1,697	2,04	2,46	2,75
40	1,050	1,303	1,684	2,02	2,42	2,70
50	1,048	1,294	1,676	2,01	2,40	2,68
60	1,046	1,296	1,671	2,00	2,39	2,66
100	1,044	1,284	1,657	1,97	2,36	2,64

Согласно данным примера  $N = 42$ ,  $T_{cp} = 1360$  м.ч.,  $\sigma = 440$  м.ч.,  $\beta = 0,9$ .

значение нижней доверительной границы будет равно:

$$R^H = 1360 - 1,684 \cdot 440 = 620 \text{ м.ч.}$$

При рассеивании полученных результатов измерений в количестве  $K=42$  размеров, выявленных в результате выборки из генеральной совокупности (среднее значение), по закону нормального распределения нижняя доверительная граница рассеивания размеров определяется из выражения:

$$R^H = T_{cp} - t_k (\sigma / \sqrt{K}) \quad (14.13)$$

$$R^H = 1360 - 1,684 (440 / \sqrt{42}) = 1245 \text{ м.ч.}$$

Ниже представлена сравнительная таблица величины нижней доверительной границы, а, следовательно, минимального значения остаточного ресурса рассматриваемого сопряжения вал-втулка, при замене опытных данных теоретическим законом нормального распределения и законом распределения Вейбулла (табл. 14.5)

Таблица 14.5. Значение нижней доверительной границы

Изучаемый показатель надежности	Закон нормального распределения	Закон распределения Вейбулла
	Значение нижней доверительной границы, м.ч.	
При одиночном значении	620	848
При среднем значении	1245	1280

#### 14.6. Определение остаточного ресурса методом индивидуального прогнозирования

Для определения остаточного ресурса детали необходимо иметь кривую износа детали в зависимости от наработки и значение предельного износа. Если не учитывать протяженность зоны приработки и условно считать, что на участке нормальной эксплуатации приращение величины износа прямо пропорционально наработке, т.е. будет иметь вид прямой в соответствии с рисунком 14.5.

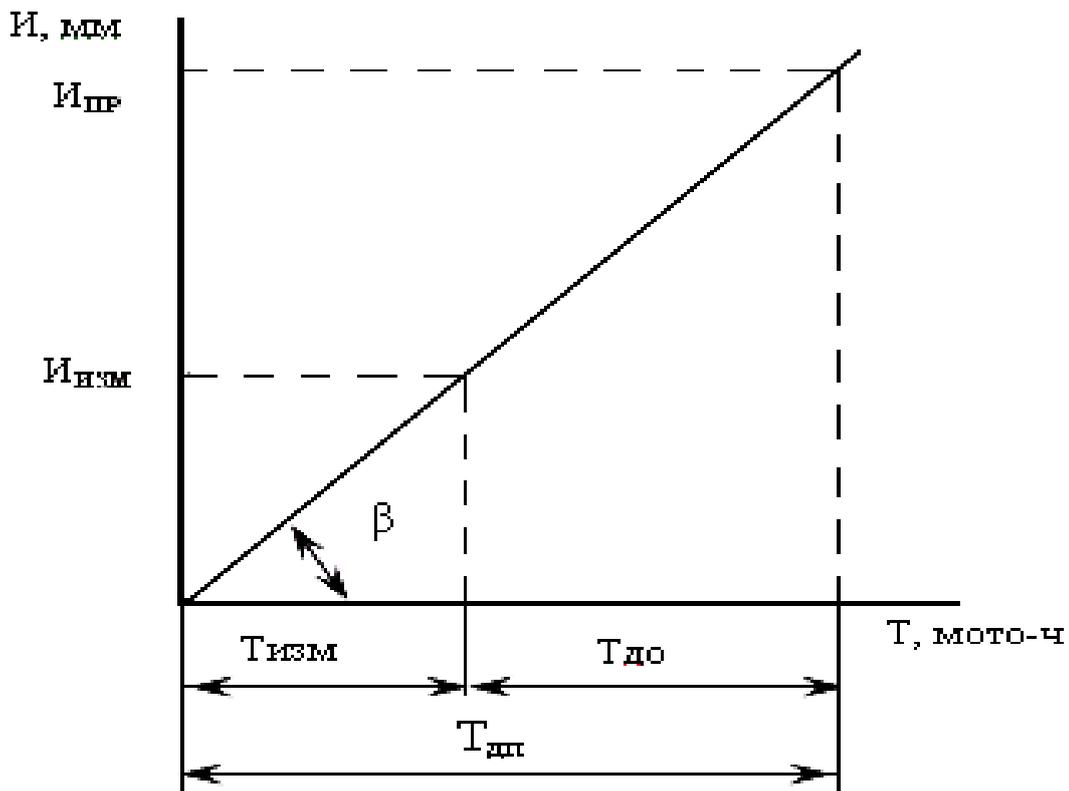


Рис. 14.5. Схема определения остаточного ресурса детали

Полный ресурс детали по данным проведенных измерений вычисляют по формуле:

$$T_{дп} = \frac{I_{пр}}{W_d} \quad (14.14)$$

где  $W$  – средняя скорость изнашивания детали, мм/мото-ч;

$T_{дп}$  – полный ресурс детали, мото-ч;  $I_{пр}$  – предельный износ детали, мм.

Средняя скорость изнашивания детали по данным проведенных измерений вычисляют по формуле:

$$\bar{W} = \frac{I_{изм}}{T_{изм}}, \quad (14.15)$$

где  $I_{изм}$  – износ детали в момент измерения, мм;

деталь типа «вал»:  $I_{изм} = d_{мин} - d_{изм}$ ,

деталь типа «отверстие»:  $I_{изм} = D_{изм} - D_{max}$ ,

$d_{мин}$  и  $D_{max}$  – нижний предельный размер вала и верхний предельный размер отверстия по чертежу, мм;  $d_{изм}$  и  $D_{изм}$  – измеренные диаметры вала и отверстия, мм;  $T_{изм}$  – ресурс детали на момент измерения, мото-ч.

Средний остаточный ресурс детали по данным проведенных измерений вычисляют по формуле:

$$\bar{T}_{\text{до}} = \frac{I_{\text{пр}} - I_{\text{изм}}}{\bar{W}_{\text{д}}} = \frac{I_{\text{пр}} - I_{\text{изм}}}{I_{\text{изм}}} T_{\text{изм}} \quad (14.16)$$

где  $I_{\text{пр}}$  - предельный износ детали, мм:

$$\text{деталь типа «вал»:} \quad I_{\text{пр}} = d_{\text{min}} - d_{\text{пр}};$$

$$\text{деталь типа «отверстие»:} \quad I_{\text{пр}} = D_{\text{пр}} - D_{\text{max}}.$$

После измерения деталь вновь устанавливают на машину, где она продолжает работать и изнашиваться до предельного износа  $I_{\text{пр}}$ . Поэтому остаточный ресурс необходимо рассчитывать вероятностным методом, учитывая величину его рассеяния. Величина рассеяния среднего ресурса деталей характеризуется нижней  $\bar{T}_{\text{до}}^{\text{H}}$  и верхней  $\bar{T}_{\text{до}}^{\text{B}}$  доверительными границами при выбранной величине доверительной вероятности. Доверительные границы рассеяния остаточного ресурса детали при доверительной вероятности  $\beta=0,8$  вычисляют по формуле:

$$\bar{T}_{\text{до}}^{\text{H}} = 0,7 \cdot \bar{T}_{\text{до}}; \quad \bar{T}_{\text{до}}^{\text{B}} = 1,35 \cdot \bar{T}_{\text{до}} \quad (14.17)$$

### ***Пример расчета остаточного ресурса.***

Наработка трактора МТЗ-82 после ремонта  $T_{\text{изм}}=2200$  мото-ч. Измерением диаметра поршневого пальца в соединении установлено, что  $d_{\text{изм}}=41,93$  мм. Требуется определить средний остаточный ресурс поршневого пальца и его доверительные границы при  $\beta=0,80$ , если известно из технических требований на дефектацию в соответствии с таблицей 14.6:

– начальный диаметр пальца  $d=42^{+0,001}_{-0,009}$  мм;

– предельный диаметр поршневого пальца  $d_{\text{пр}}=41,89$  мм.

1. определяется средняя скорость изнашивания поршневого пальца:

$$\bar{W}_{\text{д}} = \frac{(42 - 0,009) - 41,93}{2200} = 2 \cdot 10^{-5} \frac{\text{мм}}{\text{мото-ч}}$$

2. определяется остаточный ресурс пальца:

$$\bar{T}_{\text{до}} = \frac{(41,991 - 41,89) - (41,991 - 41,93)}{2 \cdot 10^{-5}} = 2000 \text{ мото-ч.}$$

3. определяется доверительные границы рассеяния среднего остаточного ре-

сурса пальца:  $\bar{T}_{до}^H = 0,7 \cdot 2000 = 1400$  мото-ч;  $\bar{T}_{до}^B = 1,35 \cdot 2000 = 2700$  мото-ч

Таблица 14.6. Данные из технических требований на дефектацию соединения «поршневой палец – втулка шатуна».

Соединяемые детали	Размеры деталей, мм	Зазор в соединении, мм		
	начальный диаметр	начальный $S_H$	допустимый $S_{ДР}$	предельный $S_{ПР}$
Втулка	$42^{+0,038}_{+0,023}$	от 0,022	0,15	0,25
Поршневой палец	$42^{+0,001}_{-0,009}$	до 0,047		

### 14.7. Определение полного ресурса соединения и допустимых без ремонта размеров соединяемых деталей

Средняя скорость изнашивания детали по данным проведенных измерений вычисляют по формуле:

$$\bar{W}_d = \frac{I_{изм}}{T_{изм}}, \quad (14.18)$$

где  $I_{изм}$  – износ детали в момент измерения, мм;

$T_{изм}$  – ресурс детали на момент измерения, мото-ч.

Среднюю скорость изнашивания соединения вычисляют по формуле:

$$\bar{W}_c = \frac{S_{изм} - S_{Hmax}}{T_{изм}}, \quad (14.19)$$

где  $S_{изм}$  – измеренная величина зазора в соединении, мм.

$S_{Hmax}$  – начальный зазор в соединении из технических требований на ремонт соединения в соответствии с таблицей 7 мм.

Величину зазора в соединении  $S_{изм}$  вычисляют по формуле:

$$S_{изм} = D_{изм} - d_{изм} \quad (14.20)$$

Средний остаточный ресурс соединения вычисляют по формуле:

$$\bar{T}_{co} = \frac{S_{пр} - S_{изм}}{\bar{W}_c}, \quad (14.21)$$

где  $S_{пр}$  – предельный зазор в соединении из технических условий на дефектацию соединения в соответствии с таблицей 0,7мм.

Доверительные границы среднего остаточного ресурса соединения вычисляются по формулам:

$$\bar{T}_{co}^H = 0,70\bar{T}_{co}; \quad \bar{T}_{co}^B = 1,35\bar{T}_{co} \quad (14.22)$$

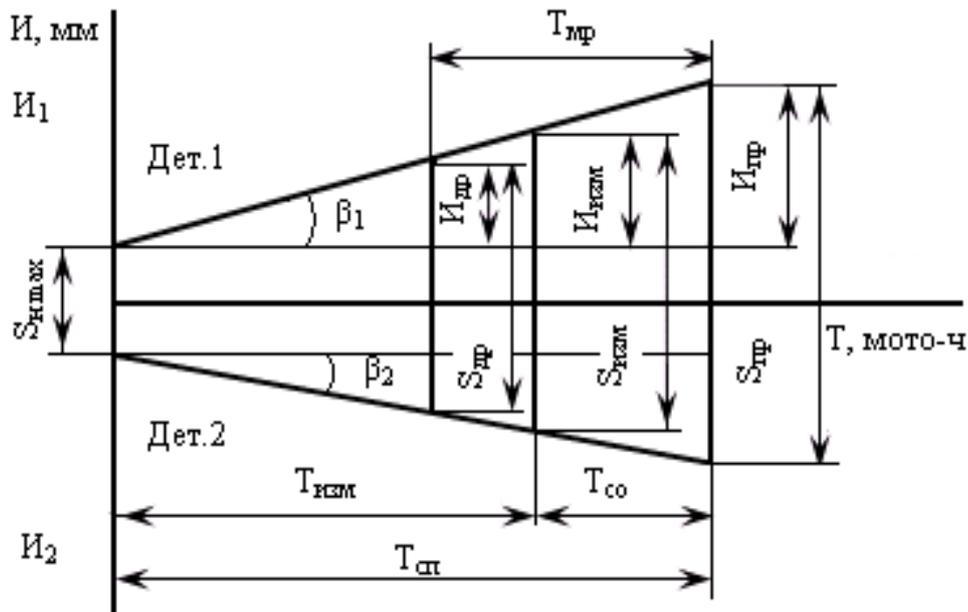


Рис. 14.6. Схема расчета ресурсов, предельных и допустимых износов деталей соединения.

По данным технической документации, полный средний ресурс детали и соединения в соответствии с рисунком 14.6 вычисляют по формулам:

$$\bar{T}_{др} = \frac{I_{пр}}{I_{пр} - I_{др}} T_{мр}, \quad (14.23)$$

$$\bar{T}_{сп} = \frac{S_{пр} - S_{н max}}{S_{пр} - S_{др}} T_{мр} \quad (14.24)$$

где  $I_{пр}$  и  $I_{др}$  - соответственно предельный и допустимый износы, мм;

$S_{н max}$ ,  $S_{пр}$  и  $S_{др}$  – соответственно начальный максимальный, предельный и допустимый зазоры из технических требований на ремонт соединения в соответствии с рисунком 14.6, мм;  $T_{мр}$  – установленная величина межремонтного ресурса, мото-ч.

Предельный износ вычисляют по формуле:

$$I_{\text{пр}} = I_{\text{др}} \frac{S_{\text{пр}} - S_{\text{н.мак.}}}{S_{\text{пр}} - S_{\text{др}}} \quad (14.25)$$

Предельные размеры втулки и поршневого пальца вычисляют по формулам:

$$\text{втулка:} \quad D_{\text{пр}} = D_{\text{н.мак.}} + I_{\text{пр}} \quad (14.26)$$

$$\text{поршневой палец:} \quad d_{\text{пр}} = d_{\text{н.мин.}} - I_{\text{пр}} \quad (14.27)$$

Допустимые без ремонта размеры втулки и поршневого пальца, в месте их наибольшего износа вычисляют по формулам:

$$\text{втулка:} \quad D_{\text{др}} = D_{\text{мак.}} + T_{\text{мр}} \cdot \ddot{W}_{\text{вт}} \quad (14.28)$$

$$\text{поршневой палец:} \quad d_{\text{др}} = d_{\text{н.}} + T_{\text{мр}} \cdot \ddot{W}_{\text{в}} \quad (14.29)$$

Допустимые износы втулки и поршневого пальца вычисляют по формулам:

$$\text{втулка:} \quad I_{\text{пр}} = D_{\text{др}} - D_{\text{н.мак.}} \quad (14.30)$$

$$\text{поршневой палец:} \quad I_{\text{пр}} = d_{\text{н.мин.}} - d_{\text{пр}} \quad (14.31)$$

### ***Пример расчета полного ресурса***

Измерением соединения «поршневой палец – втулка шатуна», проведенным через заданную наработку  $T_{\text{изм}}=2420$  мото-ч. двигателя Д-240, определены диаметры втулки верхней головки шатуна и поршневого пальца в местах их наибольшего износа:  $D_{\text{изм}} = 42,05$  мм;  $d_{\text{изм}} = 41,95$  мм. Межремонтный ресурс  $T_{\text{мр}}= 4800$  мото-ч.

Требуется определить остаточный ресурс соединения, доверительные границы при  $\beta = 0,80$ , предельные и допустимые при ремонте размеры втулки и поршневого пальца.

1. Среднюю скорость изнашивания соединения вычисляют по формуле:

$$\overline{W}_c = \frac{(42,05 - 41,95) - 0,047}{2420} = 2 \cdot 10^{-5} \frac{\text{мм}}{\text{мото-ч}}$$

2. Средний остаточный ресурс соединения вычисляют по формуле :

$$\overline{T}_{\text{со}} = \frac{0,25 - 0,1}{2 \cdot 10^{-5}} = 7500 \text{ мото-ч.}$$

Таблица 14.7. Данные из технических требований на ремонт соединения «поршневой палец – втулка шатуна».

Соединяемые детали	Размеры деталей, мм	Зазор в соединении, мм		
	начальный диаметр	начальный $S_H$	допустимый $S_{ДР}$	предельный $S_{ПР}$
Втулка	$42^{+0,038}_{+0,023}$	от 0,022	0,15	0,25
Поршневой палец	$42^{+0,001}_{-0,009}$	до 0,047		

3. Доверительные границы остаточного ресурса соединения вычисляют:

$$T_{co}^H = 0,70 \cdot 7500 = 5250 \text{ мото-ч}; \quad T_{co}^B = 1,35 \cdot 7500 = 10125 \text{ мото-ч}$$

4. Полный ресурс соединения в соответствии с техническими требованиями в

$$\bar{T}_{сп} = \frac{4800 \cdot (0,25 - 0,047)}{0,25 - 0,15} = 9744 \text{ мото-ч}$$

таблице 14.4 вычисляют:

5. Среднюю скорость изнашивания втулки и поршневого пальца вычисляют:

втулка: 
$$\bar{W}_{вт} = \frac{42,05 - 42,038}{2420} = 0,5 \cdot 10^{-5} \frac{\text{мм}}{\text{мото-ч}},$$

поршневой палец: 
$$\bar{W}_{пш} = \frac{41,991 - 41,95}{2420} = 1,7 \cdot 10^{-5} \frac{\text{мм}}{\text{мото-ч}}.$$

6. Допустимые без ремонта размеры деталей соединения в месте их наибольшего износа вычисляют по формулам:

втулка: 
$$D_{др} = 42,038 + 4887 \cdot 0,5 \cdot 10^{-5} = 42,06 \text{ мм};$$

поршневой палец: 
$$d_{др} = 41,991 - 4887 \cdot 1,7 \cdot 10^{-5} = 41,91 \text{ мм}.$$

7. Допустимые износы втулки и поршневого пальца по техническим условиям вычисляют:

втулка: 
$$I_{др} = 42,06 - 42,038 = 0,02 \text{ мм},$$

поршневой палец: 
$$I_{др} = 41,991 - 41,91 = 0,08 \text{ мм}.$$

8. Предельные износы втулки и поршневого пальца в соответствии с таблицей 7 вычисляют:

втулка: 
$$I_{пр} = 0,02 \frac{0,25 - 0,047}{0,25 - 0,1} = 0,04 \text{ мм}.$$

поршневой палец: 
$$I_{\text{пр}} = 0,08 \frac{0,25 - 0,047}{0,25 - 0,10} = 0,16 \text{ мм.}$$

9. Предельные размеры втулки и поршневого пальца вычисляют:

втулка: 
$$D_{\text{пр}} = 42,038 + 0,04 = 42,078 \text{ мм}$$

поршневой палец: 
$$d_{\text{пр}} = 41,991 - 0,16 = 41,831 \text{ мм}$$

При выбраковке сопряжения можно отбраковать только деталь с наибольшей величиной износа, сохранив сопрягаемую деталь. В нашем случае наиболее интенсивно изнашивалась втулка, так как к моменту дефектовки сопряжения ее износ составил 0,09 мм ( $D_{\text{изн}} - D_{\text{нов}} = 42,12 - 42,03 = 0,09 \text{ мм}$ ), а износ вала составил 0,04 мм ( $d_{\text{нов}} - d_{\text{изн}} = 41,99 - 41,95 = 0,04 \text{ мм}$ ).

#### **14.8. Определение остаточного ресурса сопряжения с заменой одной детали**

*Пример 1.* Определить остаточный ресурс сопряжения при наработке 1800 м.ч. ( $R_{\text{измер}} = 1800 \text{ м.ч.}$ ), если при дефектовке данного сопряжения оказалось:

- 1) диаметр втулки – 42,12 мм
- 2) диаметр вала – 41,95 мм

Из нормативно-технической документации было определено, что начальный максимальный диаметр втулки по чертежу равнялся 42,03 мм, начальный минимальный диаметр вала по чертежу равен 41,99 мм и начальный максимальный зазор между ними – 0,04 мм. Предельно допустимый зазор для данного сопряжения установлен 0,25 мм.

Рассмотрим выше приведенный пример износа сопряжения вал-втулка. После дефектовки изношенная втулка заменяется на новую. При этом, как видно из рис. 14.7, начальный новый зазор между изношенным валом и новой втулкой составит 0,08 мм, так как опять принимаем допущение, что и новая втулка будет иметь максимальный диаметр по чертежу, т.е. 42,03 мм

Заменяя старую втулку новой, делается допущение, что и новая втулка будет изнашиваться по тому же закону, что и старая втулка и, что скорость ее изнашивания не изменится по сравнению со старой втулкой.

Остаточный ресурс нового сопряжения определяется из выражения:

$$\frac{S_{\text{пред}} - S_{\text{нач.нов.}}}{R_{\text{ост.нов.}}} = \frac{S_{\text{измер}} - S_{\text{нач.}}}{R_{\text{измер.}}} \quad (14.32)$$

откуда: 
$$R_{\text{ост.нов.}} = R_{\text{измер.}} \cdot \frac{S_{\text{пред}} - S_{\text{нач.нов.}}}{S_{\text{измер.}} - S_{\text{нач.}}} \quad (14.33)$$

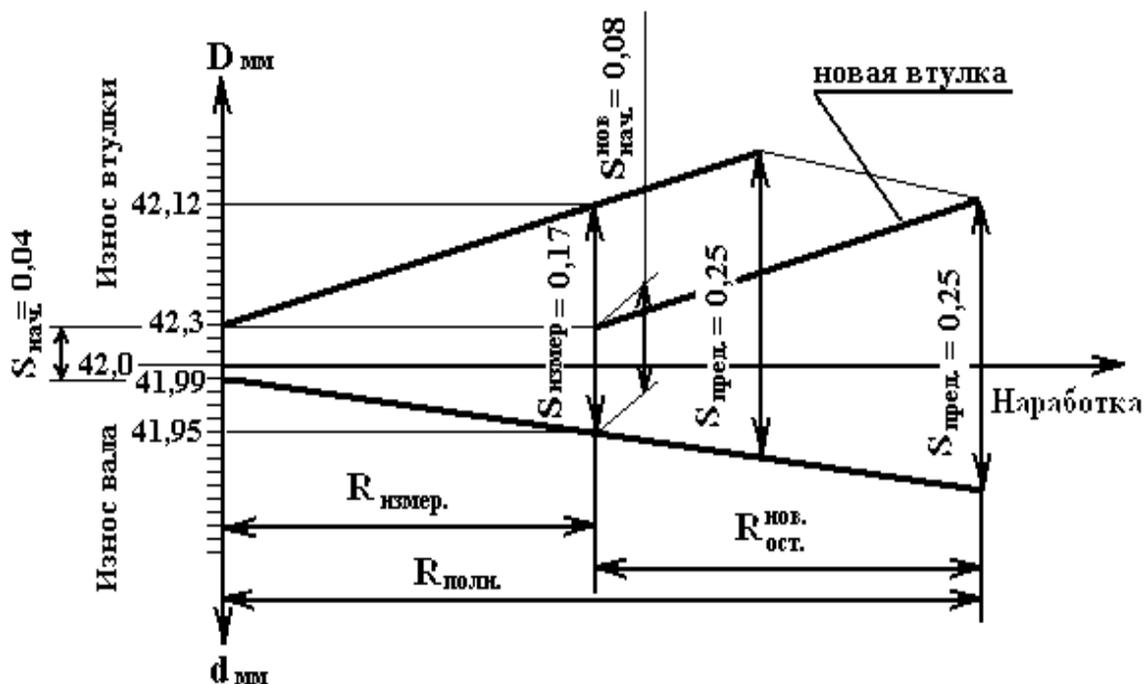


Рис.14.7. Износ сопряжения вал-втулка с заменой изношенной втулки

Продолжим решение выше приведенного примера. При замене изношенной втулки на новую начальный зазор между изношенным валом  $d = 41,95$  мм и новой втулки  $D = 42,3$  мм будет равен  $0,08$  мм. Тогда остаточный ресурс нового ремонтного сопряжения будет равен:

$$R_{\text{ост.нов.}} = 1800 \cdot \frac{0,25 - 0,08}{0,17 - 0,04} = 2354 \text{ м. ч.}$$

т.е. увеличился более чем 2 раза ( $2354 / 1108 = 2.13$ ).

Необходимо отметить, что в рассмотренных примерах определения остаточного ресурса детали или сопряжений значения остаточного ресурса определяются с использованием метода математической статистики. Если же рассчитывать остаточный ресурс вероятностным методом, то необходимо учитывать величину его рассеивания, а полученные по выше приведенным формулам значения остаточного ресурса принимаются как средние значения.

Величина рассеивания остаточного ресурса детали или сопряжения характеризуется нижней и верхней доверительными границами при выбранной величине доверительной вероятности  $\beta$ . Значения этих границ определяются с учетом закона рассеивания остаточного ресурса.

Естественно, что если речь идет об использовании детали или сопряжения для дальнейшей эксплуатации, то для перестраховки критерием принятия решения является значение нижней доверительной границы остаточного ресурса.

*Пример.* В результате микрометража 72 сопряжений вал-втулка было определено, что среднее значение остаточного ресурса данных сопряжений  $T_{cp}$  составляет 2360 м.ч., среднее квадратическое отклонение  $\sigma = 840$  м.ч., смещение  $C = 970$  м.ч. и коэффициент вариации  $V = 0,6$ .

Определить значение нижней доверительной границы рассеивания остаточного ресурса при доверительной вероятности  $\beta = 0,9$ .

*Решение:*

Так как коэффициент вариации  $V$  более 0,5, то рассеивания остаточного ресурса подчиняется закону распределения Вейбулла. Определяем нижнюю доверительную границу остаточного ресурса по формуле:

$$T^H = (T_{cp} - C) \cdot \sqrt[b]{r_3 + C} \quad (14.34)$$

где  $b$  – параметр закона Вейбулла,  $r_3$  – коэффициент закона Вейбулла, зависящий от заданной величины доверительной вероятности  $\beta$  и числа информации  $N$  (табл. 14.9)

Параметр  $b$  определяется из таблицы 14.8 согласно значению  $V$ :

Таблица 14.8. Параметр "b" закона распределения Вейбулла

Значение V	0,70	0,65	0,60	0,55	0,50	0,40
Параметр b	1,5	1,6	1,7	1,9	2,1	2,7

Таблица 14.9. Величины доверительной вероятности  $\beta$

К	$\beta = 0,8$	$\beta = 0,9$	$\beta = 0,95$
	$r_3$	$r_3$	$r_3$
5	0,62	0,55	0,49
10	0,70	0,64	0,59
20	0,77	0,72	0,67
40	0,83	0,78	0,75
60	0,86	0,82	0,79
70	0,87	0,83	0,80
80	0,87	0,84	0,81
100	0,88	0,86	0,83

Для  $V = 0,6$  параметр  $b = 1,7$  и для  $K = 72$  и  $\beta = 0,9$  значение  $r_3 = 0,83$ , следовательно:

$$T^H = (2360 - 970) \sqrt[1,7]{0,83} + 970 = 2215 \text{ м.ч.}$$

Если бы рассеивание остаточного ресурса выше приведенного примера подчинялось закону нормального распределения, то нижняя доверительная граница определялась из выражения:

$$T^H = T_{cp} - t_{\beta} (\sigma / \sqrt{N}) \quad (14.35)$$

где  $t_{\beta}$  – коэффициент, характеризующий закон распределения Стьюдента при различных значения доверительной вероятности  $\beta$ .

Значения данного коэффициента приведены в таблице 14.10.

Таблица 14.10. Коэффициент Стьюдента  $t_{\beta}$

Число информации	Доверительная вероятность $\beta$					
	0,7	0,8	0,9	0,95	0,98	0,99
	Коэффициент Стьюдента $t_{\beta}$					
50	1,048	1,294	1,676	2,01	2,40	2,68
60	1,046	1,296	1,671	2,00	2,39	2,66
70	1,045	1,292	1,665	1,99	2,38	2,65
100	1,044	1,284	1,657	1,97	2,36	2,64

Определяя величину нижней доверительной границы при  $\beta = 0,9$ , получим:

$$T^H = 2360 - 1,665 (840 / \sqrt{72}) = 2195 \text{ м.ч.}$$

## 14.9. Гамма-процентный ресурс

Выше было отмечено, что определение величины среднего доремонтного (послеремонтного) ресурса, как показателя долговечности для *достаточно большой* группы однотипных машин с большой продолжительностью их использования, затруднительно, так как требует *длительных* испытаний или наблюдений в период эксплуатации за данными машинами (агрегатами). Для сокращения времени наблюдения (испытания) при *оценке долговечности* объектов или их элементов пользуются понятием *гамма-процентным ресурсом* (соответственно – доремонтным или послеремонтным гамма-процентным ресурсом).

Общее понятие гамма-процентного ресурса состоит из двух моментов. Первый – физическая сущность данного ресурса и второй – определение величины гамма-процентного ресурса.

Физическая сущность данного показателя в том, что при определении долговечности большой группы однотипных машин или агрегатов, наблюдение в процессе их эксплуатации или испытаний ведется за *сравнительно небольшим* количеством объектов от их общего числа. За величину гамма-процентного ресурса будут принимать наработку до ресурсного отказа у *последнего* из наблюдаемых или испытываемых объектов. Под понятием "ресурсный отказ" подразумевается значение доремонтного ресурса (наработки) для новых машин и значение послеремонтного ресурса (наработки) для отремонтированных машин или их элементов. Как правило, для наблюдений или испытаний берут 10...20 % от общего числа наблюдаемых или испытываемых объектов.

Например, имеется парк *новых* однотипных машин в количестве 45 единиц. Под наблюдение взято 20% машин, т.е. оцениваться по ресурсному отказу будут первые 9 машин. Когда 9-я машина (из 45) выработает свой доремонтный ресурс, значение этой наработки и примут за величину гамма-процентного доремонтного ресурса для остальных 36 машин.

Согласно ГОСТ 27.002 *гамма-процентный ресурс* – суммарная наработка, в течение которой объект *не достигнет* предельного состояния с *вероятностью*

$\gamma$ , выраженной в процентах. Как известно, функция вероятности безотказного работоспособного состояния объекта может задаваться в долях единицы (от 1 до 0 или в процентах от 100% и до 0%). При определении долговечности объекта функция вероятности безотказного его работоспособного состояния чаще всего выражается в процентах (%), о чем и говорится в определении гамма-процентного ресурса. Таким образом, можно говорить, что вероятность безотказного работоспособного состояния объекта, который не достигнет предельного состояния, например, 90% или 80% т.е.  $\gamma = 90\%$  или  $\gamma = 80\%$ . Нормативно-технической документацией при проведении испытаний или наблюдений в процессе эксплуатации транспортных и технологических машин для большинства машин и их агрегатов установлены именно эти два значения  $\gamma$ : 80% и 90%.

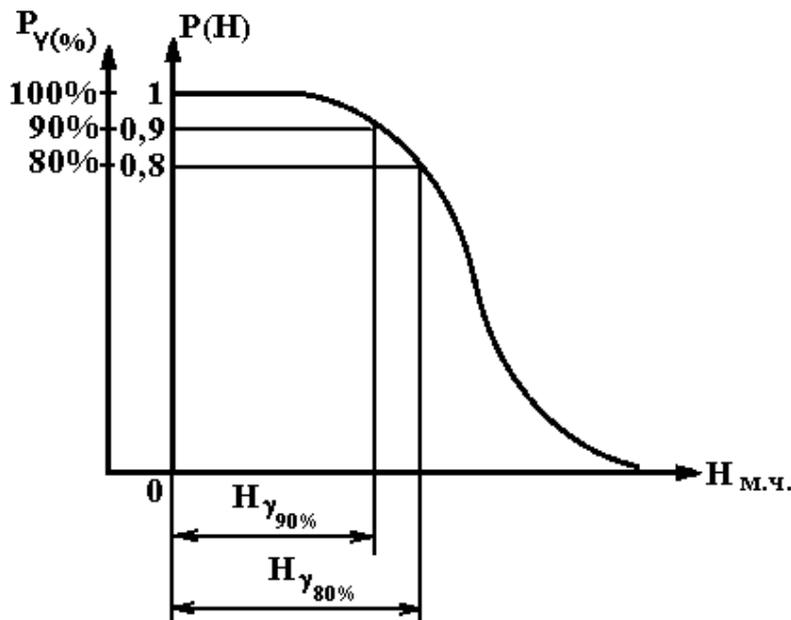
Для перевода величины функции вероятности безотказного работоспособного состояния объекта, выраженной в процентах (%) в наиболее привычное значение величины функции безотказности, выраженное в долях единицы, необходимо использовать зависимость:

$$P(H) = \gamma / 100\% \quad (14.36)$$

Следовательно, при определении гамма-процентного ресурса можно говорить, что гамма-процентный ресурс – это суммарная наработка, в течение которой объект не достигнет предельного состояния с вероятностью либо 0,9 или 0,8. Другими словами объект выполнит *какую-то по величине наработку*, которую называют гамма-процентным ресурсом, с вероятностью 0,9 или 0,8 (смотря, какая вероятность задана). В технической документации величину гамма-процентного ресурса при  $\gamma = 90\%$  называют "90%-м гамма-ресурсом", а для  $\gamma = 80\%$  - "80%-м гамма-ресурсом". Таким образом, 90- и 80-ти гамма-процентные ресурсы будут иметь значение функции безотказности соответственно 0,9 и 0,8 (рис. 14.8).

*Численная величина* гамма-процентного ресурса  $N_\gamma$  при определении долговечности группы однотипных изделий либо устанавливается (является директивной), либо определяется при испытаниях или эксплуатации машин.

Для определения величины гамма-процентного ресурса  $H_\gamma$ , которая выражается величиной наработки или сроком службы, в период испытаний или эксплуатации берется небольшое количество изделий от их общего числа, для которых определяется данный показатель долговечности. Это число изделий, *определяемое в долях единицы*, называется *гамма-процент изделий*, выработавшие свой ресурс т.е. выполнили



какую-то наработку или отработали какой-то срок по времени) до достижения величины гамма-процентного ресурса. Гамма-процент изделий определяется из выражения:

Рис. 14.8. Функция безотказности машин.

какую-то наработку или отработали какой-то срок по времени) до достижения величины гамма-процентного ресурса.

Гамма-процент изделий определяется из выражения:

$$\gamma = 1 - [P_{\gamma(\%)} / 100\%] \quad (14.37)$$

где  $\gamma$  - гамма-процент изделий (*в долях единицы*), выходящих из строя до *достижения* гамма-процентного ресурса  $H_\gamma$ .

$P_{\gamma(\%)}$  – принятая величина вероятности безотказного работоспособного состояния до предельного состояния для данной группы изделий.

Например, для группы из 18 машин ( $N=18$ ) при установленной (директивной) для них 80%-ного гамма-ресурса гамма-процент машин, которые будут иметь наработку *менее* чем величина наработки, определяемая 80%-ным гамма-ресурсом, составит:

$$\gamma = 1 - (80\% / 100\%) = 0,2$$

Количество машин, определяемым величиной гамма-процентом, находят из выражения:

$$m = \gamma \cdot N \quad (14.38)$$

$$0,2 \cdot 18 = 3,6 = 4. \quad \text{В нашем примере это оставляет 4 машины.}$$

При установленном (заданном) 90% гамма-ресурсе для данной группы машин величина  $\gamma$  составит 0,1, а число машин для наблюдения в период эксплуатации или при испытании - 2 машины.

Если ставится задача об *определении* величины гамма-процентного ресурса для конкретного парка однотипных машин, то за величину гамма-процентного ресурса принимают наработку до ресурсного отказа, *в общем случае, у последнего* из наблюдаемых (испытываемых) изделий, число которых определено через гамма-процент. Под понятием "ресурсный отказ" подразумевается значение доремонтного ресурса (наработки, срока службы) для новых машин и значение межремонтного ресурса (наработки, срока службы) для отремонтированных машин или их элементов. Другими словами, величина наработки (срок службы) или ресурсный отказ, что одно и то же, достигнутым *последним* из числа наблюдаемых или испытываемых изделий  $m$ , взятых из *общей массы* изделий, принимается за величину гамма-процентного ресурса, которое должны выработать остальные изделия.

Таким образом, в нашем примере, при выходе из строя по ресурсному отказу 4-й машины значение ее наработки будет принято за 80% -й гамма-ресурс для данной группы машин и все остальные 14 машин должны выработать наработку или срок службы, равную или больше наработки (срока службы) 4-й машины. Если все 14 машин выполнят или перевыполнят наработку (срок службы) 4-й машины, тогда показатель долговечности для этой группы машин будет положительным.

В приведенном выше примере определение величины гамма-процентного ресурса, равной ресурсу последней машины из числа определяемым гамма-процентом, имеет наибольшее распространение, но существуют и другие методики, позволяющие более точно, при необходимости, определять значение гамма-процентного ресурса. Так, при законе нормального распределения, зная среднее значение ресурса  $H_{cp}$  и среднее квадратическое отклонение  $\sigma$ , можно определить величину гамма-процентного ресурса  $H_\gamma$ , пользуясь таблицей квантилей закона нормального распределения, из уравнения:

$$H_\gamma = H_{cp} - H_k \cdot \sigma \quad (14.39)$$

При применении закона распределения Вейбулла значение гамма-процентного ресурса  $H_\gamma$  определяется из выражения:

$$H_{\gamma} = H_k^B (1-\gamma) \cdot a + C \quad (14.40)$$

где  $H_k^B (1-\gamma)$  – квантили закона распределения Вейбулла,

$a$  - параметр закона распределения Вейбулла,  $C$  - величина смещения.

На практике чаще всего вводят регламентированную (директивную) величину гамма-процентного ресурса. Тогда, рассматривая выше приведенный пример, может быть три варианта:

1) ресурс 4-й машины оказался больше директивной величины гамма-процентного ресурса. Тогда долговечность данной группы считается в пределах установленного уровня;

2) ресурс 4-й машины оказался *меньше* директивного гамма-процентного ресурса, но значение ресурса следующей 5-й машины оказалось *выше* заданного гамма-процентного ресурса. В этом случае долговечность данной группы машин также находится в пределах установленного уровня.

3) ресурс 5-й машины оказался *меньше* значения директивного значения гамма-процентного ресурса - долговечность этих машин не удовлетворяет установленным требованиям.

Таким образом, устанавливаемый гамма-процентный ресурс для группы однотипных изделий указывает:

1) процент изделий, которые должны выполнить установленный гамма-процентный ресурс: при 90%-м гамма-ресурсе – 90% изделий из общего их количества, при 80%-м гамма-ресурсе – 80% изделий из общего количества;

2) значение вероятности безотказного работоспособного состояния до предельного состояния при 90% - м гамма-ресурсе составит 0,90 и при 80%-м гамма-ресурсе – 0,8.

#### ***14.9.1. Нахождение значения гамма-процентного ресурса в процессе испытаний или эксплуатации***

***1-й способ:*** Порядковый номер машины, наработка которой до ресурсного отказа будет принята за гамма-процентный ресурс ( $N_{\alpha}$ ), определяется из выражения:

$$N_{\alpha (i)} = (N + 1) \cdot \alpha \quad (14.41)$$

где  $N$  – общее количество наблюдаемых (испытываемых) машин;

$\alpha$  - доля машин, выходящих из строя до достижения гамма- процентного ресурса.

Доля машин, выработавших свой ресурс до достижения величины гамма- процентного ресурса, определяется из выражения:

$$\alpha = 1 - (\gamma\% / 100\%) \quad (14.42)$$

где  $\gamma\%$  - задаваемый гамма-процентный ресурс.

*Пример.* Имеется парк в количестве 12 одномарочных машин. Определить 80% - й гамма-ресурс для данного парка машин.

*Решение:*

1. Определяется значение  $\alpha$ :  $\alpha = 1 - (80\% / 100\%) = 0,2$ .

2. Определяется порядковый номер машины, чья ресурсная наработка будет принята за 80% -й гамма-ресурс:

$$N_{\alpha} = (N + 1) \cdot \alpha = (12 + 1) \cdot 0,2 = 2,6 \text{ или } 3\text{-я машина}$$

Таким образом, при выходе из строя по ресурсному отказу 3-й машины, значение его наработки будет принято за 80% -й гамма-ресурс для данного парка машин, т.е. все остальные 9 машин (80% от общего количества) должны вырабатывать наработку больше, чем у 3-й машины.

Но здесь может быть два случая:

1. Значение гамма-процентного ресурса не регламентировалось. Тогда за величину оценки долговечности данных машин будет принято значение ресурса 3-й машины.

2. Было регламентировано (установлено нормативно-технической документацией) значение 80%-го гамма-ресурса для данного типа машин. Ресурс 3-й машины оказался меньше заданного гамма-процентного ресурса.

Следовательно, долговечность этих машин не удовлетворяет установленным требованиям. А если равен или больше - долговечность данного типа машин соответствует установленным требованиям по их долговечности.

**2-й способ.** Известны ресурсные отказы нескольких машин, полученные при испытаниях или эксплуатации. Например, 8-ми (таблица 14.11).

Таблица 14.11. Ресурсные отказы машин, полученные при испытаниях или эксплуатации.

№ п/п	Наработка машины (ресурс) на момент прекращения испытаний (м.ч.)
1	2900
2	1550
3	2250
4	1800
5	2400
6	2950
7	3000
8	2150

Задача: определить 80% гамма-ресурс ( $R_{80\%}$ ) для машин данного типа.

*Решение:*

1) Составляется вариационный (изменяющийся) ряд ресурса данных машин по убывающей величине:

№ машины	1	2	3	4	5	6	7	8
Наработка	3000	2950	2900	2400	2250	2150	1800	1550

2) Определяется порядковый номер машины, ресурс которого будет определять величину гамма-процентного ресурса для машин этой конструкции. Данный номер определяется из следующего выражения:

$$N_0 = (N \cdot \gamma\%) / 100\% + 0,5; \quad N_0 = (8 \cdot 80\%) / 100\% + 0,5 = 6,9$$

Так как номер получился дробным, тогда величину 80% гамма-ресурса  $R_{80\%}$  определяют из следующего выражения:

$$R_{80\%} = R_i - (R_i - R_{i+1}) \cdot (N_0 - N_{i-1}) \quad (14.43)$$

где  $R_i$  – ресурс машины, номер которого ближайший наименьший расчетному. Ближайший наименьший расчетному номеру будет № 6 и  $R_i = 2150$  м.ч.

$R_{i+1}$  – ресурс машины, номер которого ближайший наибольший расчетному, Ближайший наибольший расчетному номеру будет № 7 и  $R_{i+1} = 1800$  м.ч.

$N_{-1}$  – наименьший ближайший расчетному номеру номер машины в виде целого числа, он равен 6.

Тогда 80% гамма-ресурс для данного типа машин составит:

$$R_{80\%} = 2150 - (2150 - 1800) \cdot (6,9 - 6) = 1835 \text{ м.ч.}$$

#### **14.9.2. Определение значения гамма-процентного ресурса вероятностным методом**

Для определения значения гамма-процентного ресурса вероятностным методом предложены следующие зависимости:

##### **1) для закона нормального распределения.**

Гамма-процентный ресурс представляет собой *нижнюю* доверительную границу рассеивания ресурсных отказов, которая для закона ЗНР (как известно) определяется из выражения:

$$R_{(\gamma\%)} = T_{\text{ср}} - N_{\text{к}} \cdot \sigma \quad (14.44)$$

где  $T_{\text{ср}}$  – среднее значение ресурсного отказа,  $\sigma$  – среднее квадратическое отклонение,  $N_{\text{к}}$  – квантиль закона нормального распределения.

Среднее значение ресурсного отказа и среднее квадратическое отклонение определяются в результате обработки опытной информации, а квантиль ЗНР – из специальной таблицы( см. приложение).

Для нахождения значения квантиля ЗНР необходимо определить функцию  $F(t)$ , из выражения:

$$F(t) = \gamma\% / 100\% \quad (14.45)$$

где  $\gamma\%$  - определяемый гамма-процентный ресурс.

*Пример.* Определить 80%-й доремонтный гамма-ресурс конкретного двигателя Д-108, если в результате обработки опытной информации известно:

средний доремонтный ресурс данных двигателей 3800 м.ч., среднее квадратическое отклонение 830 м.ч. рассеивание ресурса подчиняется закону ЗНР.

*Решение:*

1) Определяется значение функции  $F(t)$  для  $\gamma\% = 80\%$

$$F(t) = \gamma\% / 100\% = 80\% / 100\% = 0,8$$

В таблице 14.12 приведены значения квантилей  $N_{\text{к}}$  закона нормального распределения.

Таблица 14.12. Значения квантилей  $H_k$  закона нормального распределения.

F(t)	Значение $H_k$								
	сотые доли F(t)								
	0	1	3	4	5	6	7	8	9
0,5	0,000	0,025	0,075	0,100	0,126	0,151	0,176	0,202	0,227
0,6	0,253	0,279	0,332	0,358	0,385	0,412	0,440	0,468	0,496
0,7	0,524	0,553	0,613	0,643	0,675	0,706	0,739	0,772	0,806
0,8	0,842	0,878	0,954	0,994	1,036	1,080	1,126	1,175	1,227
0,9	1,282	1,341	1,405	1,476	1,645	1,751	1,881	2,054	2,326

2) Из таблицы 12 находится значение квантиля  $H_k$ :  $H_k = 0,842$

3) Определяется значение 80%-го доремонтного ресурса двигателя:

$$R_{(80\%)} = R_{cp} - H_k \cdot \sigma = 3800 - 0,842 \cdot 830 = 3100 \text{ м.ч.}$$

*Вывод:* долговечность конкретного двигателя Д-108 будет соответствовать заданному значению, если долговечность двигателей данной модели оценивается гамма-процентным ресурсом до 3100 м.ч. Если же долговечность этих двигателей оценивается гамма-процентным ресурсом более чем в 3100 м.ч., то данный двигатель по каким-то причинам не удовлетворяет заданной долговечности.

### **2) при применении закона распределения Вейбулла.**

Для закона ЗНР гамма-процентный ресурс также представляет собой нижнюю доверительную границу рассеивания ресурсных отказов. Но есть одна особенность при нахождении нижней доверительной границы. Для закона ЗНР она не столь существенна, поэтому при решении задач по ЗНР эта особенность не учитывается. А для закона ЗРВ эта особенность играет роль, так как доверительные границы (верхняя и нижняя) при законе распределения Вейбулла асимметричны среднему значению изучаемого показателя надежности.

Сущность данной особенности в следующем. Гамма-процентный ресурс как нижняя доверительная граница определяется при *односторонней* доверительной вероятности  $\beta$ , которая на одну ступень меньше, чем при двусторонней доверительной вероятности  $\beta$ . Часто вместо "двусторонней доверительной вероятности" говорят просто "доверительная вероятность". Когда же подразумева-

ется односторонняя доверительная вероятность, то это указывается. Нижняя доверительная граница для закона ЗРВ (как известно) определяется как:

$$R_{(\gamma\%)} = H_k^B(1 - \beta) \cdot a + C \quad (14.46)$$

где  $H_k^B(1 - \beta)$  – квантиль закона распределения Вейбулла,  $a$  – параметр Вейбулла,  $C$  – смещение зоны рассеивания ресурса,  $\beta$  – односторонняя доверительная вероятность.

*Пример.* Определить 90% межремонтный гамма-ресурс комбайнов при односторонней доверительной вероятности  $\beta = 0,9$ , если в результате обработки опытной информации известно:

- средний межремонтный ресурс комбайнов  $R_{cp} = 1700$  м.ч.,
- среднее квадратическое отклонение  $\sigma = 533$  м.ч.
- смещение начала рассеивания ресурсов  $C = 430$  м.ч.
- рассеивание ресурса подчиняется закону ЗРВ.

*Решение:*

- 1) определяется величина коэффициента вариации  $V$ .

$$V = \sigma / (R_{cp} - C) \quad (14.47)$$

$$V = 533 / (1700 - 430) = 0,43$$

- 2) определяется параметр закона ЗРВ "b"

Из таблицы 14.13 (представлена сокращенной, см приложение) при  $V = 0,43$  "b" = 2,5

Таблица 14.13. Величина коэффициента вариации  $V$  и параметр закона ЗРВ "b"

Значение $V$	0,48	0,46	0,44	0,43	0,41	0,40
Параметр $b$	2,2	2,3	2,4	2,5	2,6	2,7

- 3) определяется параметр закона ЗРВ "a"

$$a = 1,126 (R_{cp} - C) = 1,126 (1700 - 430) = 1430 \text{ м.ч.}$$

- 4) определяется функция  $F(t)$

$$F(t) = F[(1-\beta)/2] = F[(1-0,9)/2] = F(0,05)$$

5) определяется значение квантиля ЗРВ по таблице 14 (таблица 14.14 представлена сокращенной, см приложение).

Значение квантиля  $H_k^B$  соответствует значению функции:

$$H_k^B = F(t) = F(0,05) \text{ при } "b" = 2,5 \text{ и равно } 0,31$$

б) определяется значение 90% межремонтного гамма-ресурса:

$$R_{(90\%)} = H_k^B(1 - \beta) \cdot a + C = 0,31 \cdot 1430 + 430 = 873 \text{ м.ч.}$$

*Вывод:* если в процессе эксплуатации комбайны выработают наработку свыше 873 м.ч. то их долговечность будет соответствовать заданной.

Таблица 14.14. Значение квантиля ЗРВ.

F(t)	Параметр b						
	2,0	2,2	2,4	2,5	2,7	2,8	2,9
0,05	0,23	0,26	0,29	0,31	0,34	0,35	0,36
0,10	0,33	0,36	0,39	0,41	0,44	0,45	0,46
0,90	1,52	1,47	1,42	1,40	1,37	1,35	1,34
0,95	1,73	1,66	1,58	1,55	1,5	1,4	1,46

#### 14.10. Назначенный ресурс или срок службы

Назначенный ресурс или срок службы – это суммарная наработка изделия или календарная продолжительность его эксплуатации, при достижении которого (которой) дальнейшая эксплуатация изделия должна быть прекращена, независимо от технического его состояния. Чаще всего это относится к изделиям, техническое состояние которых или трудно определить, или их дальнейшая эксплуатация может привести к нарушению безопасности работы или убытки.

#### 14.11. Экономические показатели долговечности

Экономическими показателями долговечности машины или ее элементов являются средние *удельные затраты времени, труда и денежных средств* на устранение эксплуатационных и ресурсных (ремонтных) отказов.

Данные величины определяются по следующим формулам:

$$B_d = \frac{1}{N} \sum_I^N \cdot \frac{B_{\text{эoi}} + B_{\text{poi}}}{H_{\text{др(пр)i}}}: \frac{\text{час}}{\text{ед. нароб.}} \quad (14.48)$$

$$T_d = \frac{1}{N} \sum_I^N \cdot \frac{T_{\text{эoi}} + T_{\text{poi}}}{H_{\text{др(пр)i}}}: \frac{\text{чел. час}}{\text{ед. нароб.}} \quad (14.49)$$

$$D_d = \frac{1}{N} \sum_I^N \cdot \frac{D_{\text{эо}i} + D_{\text{рo}i}}{H_{\text{др(пр)}i}}; \frac{\text{руб}}{\text{ед. нароб.}} \quad (14.50)$$

где  $N$  – количество машин (агрегатов) в эксплуатации,

$V_i$ ;  $T_i$ ;  $D_i$  - соответственно суммарные затраты времени, труда и денежных средств на устранение эксплуатационных (эо) и ресурсных (ро) отказов  $i$ -й машины (агрегата),  $H_{\text{др(пр)}i}$  – доремонтная (др) или послеремонтная (пр) наработка  $i$ -й машины (агрегата).

Приведенные выше формулы характеризуют полные затраты от начала эксплуатации до снятия с эксплуатации машины или ее агрегатов. Поэтому в данные формулы входит как составная часть затраты на проведение текущего (если он предусмотрен) и капитального ремонта. Если же рассматривается долговечность объекта до ремонта или после ремонта, то этой составляющей нет.

#### **14.12. Анализ износа деталей технических систем и транспортно - технологических машин при их дефектовке**

Анализ износа деталей сопряжений транспортных и технологических машин при их дефектовке в ремонтном производстве проводится с целью:

- 1) определения деталей для дальнейшей эксплуатации с бывшими в эксплуатации сопрягаемыми деталями;
- 2) возможность их эксплуатации с новыми (или восстановленными под номинальный размер) сопрягаемыми деталями;
- 3) выявление деталей, требующих восстановления или списания.

Таким образом, в зависимости от величины износа детали подразделяются на:

- годные для дальнейшей эксплуатации в сопряжении с *бывшими* в эксплуатации сопрягаемыми деталями,
- годные для сопряжения с *новыми* или *восстановленными до номинального размера* деталями,
- негодные, но которые могут быть восстановлены,
- негодные, которые должны быть списаны из-за экономической нецелесообразности их восстановления или из-за других дефектов.

Подлежащими восстановлению считаются те детали, которые имеют износы, превышающие допустимые по техническим условиям, но восстановление их экономически целесообразно.

Величина износа (И) определяется по разности размеров чертежного и измеренного при контроле (дефектовке).

Для валов чертежным размером считается его *минимальный* диаметр –  $d_{\min}$ , а для *отверстий* – *максимальный* диаметр -  $D_{\max}$ .

$$I_d = d_{\min} - d_{\text{изм}} ; \quad I_D = D_{\text{изм}} - D_{\max}$$

Для проведения анализа износов однотипных деталей необходимо:

- 1) записать величины износов по возрастающему значению;
- 2) построить статистическую таблицу;
- 3) определить среднее значение величины износа  $T_{\text{cp}}$ ;
- 4) определить среднее квадратическое отклонение  $\sigma$ ;
- 5) определить коэффициент вариации  $V$ ;
- 6) по коэффициенту вариации  $V$  определить теоретический закон; если по коэффициенту вариации  $V$  не удастся определить конкретный теоретический закон, то необходимо воспользоваться критерием Пирсона;
- 7) определить значение интегральной функции выбранного теоретического закона;
- 8) построить график данной функции и по данному графику определить количество деталей, годных к дальнейшей эксплуатации или требующих восстановления.

Пункт 1. Из представленной информации по размерам деталей определить величины их износа и записать величины износа в порядке возрастания.

Пункты 2, 3 и 4 выполняются в той последовательности, которая указана в методических указаниях по выбору теоретического закона при определении показателей надежности.

Пункт 5. Коэффициент вариации  $V$  определяется из выражения:

$$V = \sigma / (T_{\text{cp}} - C) \quad (14.51)$$

где  $C$  – величина сдвига начала распределения величины износа.

$$C = t_{\min} - 0,5 A \quad (A - \text{длина интервала}) \quad (14.52)$$

Пункт 6. По величине коэффициента вариации  $V$  определяется теоретический закон. Значение  $V$  до 0,33 характеризует закон нормального распределения (ЗНР), при значениях равном или больше 0,5 – закон распределения Вейбулла (ЗРВ), а в интервале 0,33...0,49 может быть использован или ЗНР, или ЗРВ. Какой их них конкретно выбрать необходимо выявить с помощью критерия Пирсона  $\chi^2$

Пункт 7. Определение значения интегральной функции выбранного теоретического закона  $F(t)$  выполняется в той же последовательности, которая указана в методических указаниях по выбору теоретического закона при определении показателей надежности.

Пункт 8. График интегральной функции строится по данным значений  $F(t)$ .

По оси абсцисс откладываются *значение конца каждого интервала*, а по оси ординат значения функции  $F(t)$ . Правильность нахождения значений функции  $F(t)$ : *последнее значение данной функции должно быть близко к 1* (не менее 0,97). Определение процента деталей, годных для сопряжения с *бывшими в эксплуатации* деталями, годных для сопряжения с *новыми* или *восстановленными* деталями и деталей, требующих восстановления при дефектовке *партии деталей*, износ которых подчиняется выбранному теоретическому закону

Для определения процента деталей, годных для сопряжения с *бывшими в эксплуатации* деталями, необходимо:

1) определить предельную допустимую величину износа контролируемых (дефектуемых) деталей, пригодных для дальнейшей эксплуатации с деталями также бывшими в эксплуатации:

$$I_{\text{доп}} = d_{\min} - d_{\text{доп}}^{\text{Б}}; \quad I_{\text{доп}} = D_{\text{изм}} - D_{\text{доп}}^{\text{Б}}$$

где  $d_{\text{доп}}^{\text{Б}}$  – допустимый размер детали типа вал в сопряжении с деталями, бывшими в эксплуатации,  $D_{\text{доп}}^{\text{Б}}$  – допустимый размер детали типа отверстие в сопряжении с деталями, бывшими в эксплуатации.

2) отложить на графике интегральной функции  $F(t)$  (рис. 14.9) по оси абсцисс значение  $I_{\text{доп}}$ , (например, 0,2 мм), восстановить перпендикуляр до кривой

функции и далее влево до оси ординат.

Значение полученной функции на оси ординат (0,10), умноженное на 100%, будет соответствовать проценту деталей (10%), пригодных для дальнейшей эксплуатации в сопряжении с деталями также бывшими в эксплуатации.

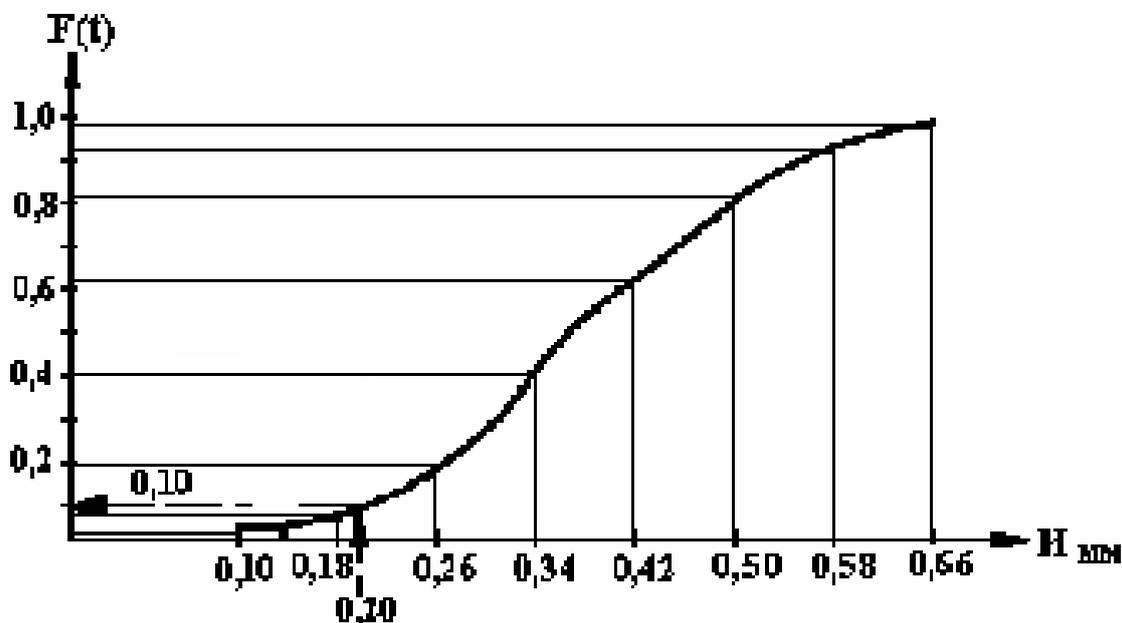


Рис. 14.9. График интегральной функции F(t)

Для определения процента деталей, годных для сопряжения с *новыми* или *восстановленными* деталями, необходимо:

1) определить предельную допустимую величину износа контролируемых (дефектуемых) деталей, пригодных для дальнейшей эксплуатации с новыми или восстановленными деталями:

$$I_{\text{доп}} = d_{\text{min}} - d_{\text{доп}}^H ; \quad I_{\text{доп}} = D_{\text{изм}} - D_{\text{доп}}^H$$

где  $d_{\text{доп}}^H$  – допустимый размер детали типа вал в сопряжении с новыми и восстановленными деталями,  $D_{\text{доп}}^H$  – допустимый размер детали типа отверстие в сопряжении с новыми или восстановленными деталями.

2) отложить на графике интегральной функции F(t) (рис. 14.10) по оси абсцисс значение  $I_{\text{доп}}$ , (например, 0,34 мм), восстановить перпендикуляр до кривой функции и далее влево до оси ординат.

Но значение полученной функции на оси ординат, умноженное на 100%, будет соответствовать проценту двух типов деталей, так как интегральная функция F(t) - суммирующая:

а) деталей, пригодных для дальнейшей эксплуатации в сопряжении с деталями, бывшими в эксплуатации и

б) деталей, пригодных для дальнейшей эксплуатации в сопряжении с новыми или восстановленными до номинального размера деталями.

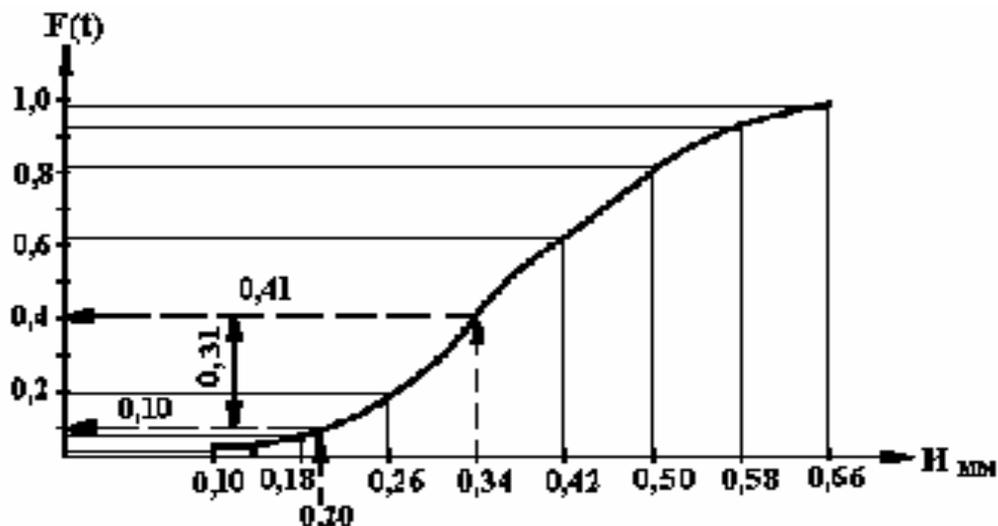


Рис. 14.10. Суммирующий график интегральной функции  $F(t)$

Для определения процента деталей, пригодных для дальнейшей эксплуатации с новыми или восстановленными до номинального размера деталями необходимо из полученной величины процента по графику (41%) вычесть величину процента деталей, пригодных для эксплуатации с деталями, бывшими в эксплуатации (10%).

Разница – процент деталей, пригодных для дальнейшей эксплуатации с новыми или восстановленными до номинального размера деталями (31%). Для определения процента деталей, требующих восстановления, необходимо из 100% вычесть полученные значения процентов рассмотренных выше двух типов деталей:  $K\%_{\text{восст}} = 100\% - (K\%_{\text{с бывш}} + K\%_{\text{нов}})$

*Пример.*

Дана информация измерения толщины шлиц валов КПП при капитальном ремонте трактора Т10М:

5,86	5,73	5,63	5,56	5,53	5,51	5,48	5,44	5,40
5,86	5,70	5,63	5,54	5,52	5,51	5,46	5,43	5,38
5,78	5,68	5,60	5,53	5,52	5,50	5,46	5,42	5,36
5,78	5,64	5,60	5,53	5,52	5,48	5,44	5,40	5,30

1. Определить износ шлицев и записать их в порядке возрастания.
2. Подобрать теоретический закон изменения износа шлицев.
3. Построить интегральную кривую изменения износа шлицев выбранного закона.
4. Определить процент валов, годных к дальнейшей эксплуатации без восстановления и требующих восстановления, если:

а) номинальная толщина шлица  $6,0_{-0,08}^{+0,02}$  мм.

$$d_{\max} = 6,02 \text{ мм} \quad d_{\min} = 5,92 \text{ мм}$$

б) допустимая толщина шлиц в сопряжении с шлицевыми втулками, бывшими в эксплуатации – 5,72 мм,

в) допустимая толщина шлиц в сопряжении с новыми втулками – 5,58 мм.

*Решение:*

1. Определяем величину износа шлиц вала. Величины износа (И) определяются по разности размеров чертежного и измеренного.

Для валов чертежным размером считается его минимальный диаметр –  $d_{\min}$ , который равен 5,92 мм.  $I = d_{\min} - d_{\text{изм}}$ .

Для первого шлица  $I_1 = 5,92 - 5,86 = 0,06$  мм, для второго  $I_2 = 5,92 - 5,86 = 0,06$  мм и т.д. Для последнего шлица  $I_{36} = 5,92 - 5,30 = 0,62$  мм. Записываем величины износа шлиц в порядке возрастания износа в мм:

0,06	0,19	0,29	0,36	0,39	0,41	0,44	0,48	0,52
0,06	0,22	0,29	0,38	0,40	0,41	0,46	0,49	0,54
0,14	0,24	0,32	0,39	0,40	0,42	0,46	0,50	0,56
0,14	0,28	0,32	0,39	0,40	0,44	0,48	0,52	0,62

1. Составляется статистический ряд:

а) определяется число интервалов  $n$ :  $n = \sqrt{N} + 1$  (14.53)

где  $N$  - число данных информации,  $N = 36$

$$n = \sqrt{N} + 1 = 6 + 1 = 7$$

б) определяется длину интервала  $A$ :  $A = (I_{\max} - I_{\min}) / n$  (14.54)

$$A = (0,62 - 0,06) / 7 = 0,08 \text{ мм.}$$

в) определяется величина сдвига информации  $C$ :  $C = I_{\min} - 0,5 \cdot A$  (14.55)

$$C = 0,06 - 0,5 \cdot 0,08 = 0,02 \text{ мм}$$

г) определяются границы интервалов и данные заносятся в таблицу.

За начало границы 1-го интервала принимается величина сдвига, чтобы среднее значение первого интервала равнялось  $I_{\min}$ . Данные границы интервалов заносятся в таблицу

Границы интервалов	0,02	0,10	0,18	0,26	0,34	0,42	0,50	0,58
	0,10	0,18	0,26	0,34	0,42	0,50	0,58	0,66

д) определяется число данных информации, попадающих в каждый интервал  $m$ . При попадании значения информации на границу интервалов в предыдущий и последующий интервалы вносится не целое число - единица, а 0,5. Если же на границу интервалов попадает несколько значений информации, то *каждое значение* информации оценивается не единицей, а по 0,5. Поэтому в интервалах могут быть дробные числа значения  $m$ . *сумма  $m$  интервалов должна быть равна числу данных информации  $N$*

Данные заносятся в таблицу.

Границы интервалов	0,02	0,10	0,18	0,26	0,34	0,42	0,50	0,58
	0,10	0,18	0,26	0,34	0,42	0,50	0,58	0,66
Кол-во $m$	2	2	3	5	10,5	8	4,5	1

е) определяется вероятность попадания значения данных информации в каждый интервал.

$$P_i = m / N \quad (14.56)$$

$$P_1 = 0,06; \quad P_2 = 0,06; \quad P_3 = 0,08; \quad P_4 = 0,14;$$

$$P_5 = 0,29; \quad P_6 = 0,22; \quad P_7 = 0,12; \quad P_8 = 0,03.$$

*сумма всех  $P_i$  должна быть равна 1.*

Данные заносятся в таблицу.

Границы интервалов	0,02	0,10	0,18	0,26	0,34	0,42	0,50	0,58
	0,10	0,18	0,26	0,34	0,42	0,50	0,58	0,66
Кол-во $m$	2	2	3	5	10,5	8	4,5	1
Значение $P_i$	0,06	0,06	0,08	0,14	0,29	0,22	0,12	0,03

ж) определяется среднее значение каждого интервала  $t_i^{\text{cp}}$ . Среднее значение интервала определяется как *полусумма* значений начала и конца интервала.

Данные заносятся в таблицу.

Границы интервалов	0,02 0,10	0,10 0,18	0,18 0,26	0,26 0,34	0,34 0,42	0,42 0,50	0,50 0,58	0,58 0,66
Кол-во m	2	2	3	5	10,5	8	4,5	1
Значение P <sub>i</sub>	0,06	0,06	0,08	0,14	0,29	0,22	0,12	0,03
Значение t <sub>i</sub> <sup>cp</sup>	0,06	0,14	0,22	0,30	0,38	0,46	0,54	0,62

2. Определяем среднее значение изучаемого параметра T<sub>cp</sub>:

$$T_{cp} = \sum (t_i^{cp} \cdot P_{i(x)}) \quad (14.57)$$

$$t_{cp1} = 0,06 \times 0,06 = 0,0036 \quad t_{cp5} = 0,38 \times 0,29 = 0,1102$$

$$t_{cp2} = 0,14 \times 0,06 = 0,0084 \quad t_{cp6} = 0,46 \times 0,22 = 0,1012$$

$$t_{cp3} = 0,22 \times 0,08 = 0,0176 \quad t_{cp7} = 0,54 \times 0,12 = 0,0648$$

$$t_{cp4} = 0,30 \times 0,14 = 0,0420 \quad t_{cp8} = 0,62 \times 0,03 = 0,0186$$

$$T_{cp} = 0,366 \text{ мм}$$

3. Определяется среднее квадратическое отклонение  $\sigma$ :

$$\sigma = \sqrt{\sum [(t_i^{cp} - T_{cp})^2 \cdot P_{i(x)}]} \quad (14.58)$$

$$(0,06 - 0,366)^2 \times 0,06 = 0,0056 \quad (0,38 - 0,366)^2 \times 0,29 = 0,0001$$

$$(0,14 - 0,366)^2 \times 0,06 = 0,0031 \quad (0,46 - 0,366)^2 \times 0,22 = 0,0019$$

$$(0,22 - 0,366)^2 \times 0,08 = 0,0017 \quad (0,54 - 0,366)^2 \times 0,12 = 0,0036$$

$$(0,30 - 0,366)^2 \times 0,14 = 0,0006 \quad (0,62 - 0,366)^2 \times 0,03 = 0,0019$$

$$\sigma = \sqrt{0,0185} = 0,136 \text{ мм}$$

4. Определяется наличие "выпадающих точек".

если  $\lambda_{расч} < \lambda_{табл}$ , то значение информации достоверно;

если  $\lambda_{расч} > \lambda_{табл}$ , то значение информации ложное.

Для первых 2-х минимальных величин данных информации:

$$\lambda_{расч}^{min} = \frac{I_i - I_{i-1}}{\sigma} = \frac{0,06 - 0,06}{0,136} = 0 \quad (14.59)$$

Для последних 2-х максимальных величин данных информации:

$$\lambda_{расч}^{max} = \frac{I_{i+1} - I_i}{\sigma} = \frac{0,62 - 0,56}{0,136} = 0,44 \quad (14.60)$$

Ниже представлена таблица коэффициента  $\lambda_{табл}$ .

Число информации	25	30	40	50	75	100
Коэффициент $\lambda_{табл}$ .	1,25	1,2	1,15	1,1	1,05	1

$\lambda_{расч}^{min}$  и  $\lambda_{расч}^{max}$   $\lambda_{табл}$  - 0 и  $0,44 < 1,15$ , т.е. "выпадающих точек" нет и статистический ряд пересчитывать не надо.

5. Определяется коэффициент вариации V:

$$V = \frac{\sigma}{T_{cp}} = \frac{0,136}{0,366-0,02} = 0,39 \quad (14.61)$$

По величине коэффициента вариации V определяется теоретический закон. Значение V до 0,33 характеризует закон нормального распределения (ЗНР), при значениях равном или больше 0,5 – закон распределения Вейбулла (ЗРВ), а в интервале 0,34...0,49 может быть использован или ЗНР, или ЗРВ. Какой их них конкретно выбрать, необходимо выявить с помощью критерия Пирсона  $\chi^2$ . Для нахождения величин  $\chi^2$  для ЗНР и ЗРВ необходимо определить значение интегральной функции данных законов.

6. Определяется значение интегральной функции закона нормального распределения. Интегральная функция закона нормального распределения F(t) для практических расчетов выражается уравнением:

$$F(t) = F_o [(t_{к(i)} - T_{cp}) / \sigma] \quad (14.62)$$

где  $t_{к(i)}$  - значение конца i – го интервала статистического ряда.

Значение  $F_o$  определяется из таблицы 14.15. При получении отрицательного значения аргумента необходимо воспользоваться следующим уравнением:

$$F_o(-t) = 1 - F_o(+t). \quad (14.63)$$

$$F_{(t)1} = F_o \cdot \frac{0,10 - 0,366}{0,136} = F_o(-1,96) = 1 - F_o(1,96) = 1 - 0,98 = 0,02$$

$$F_{(t)2} = F_o \cdot \frac{0,18-0,366}{0,136} = F_o(-1,37) = 1 - F_o(1,37) = 1 - 0,92 = 0,08$$

$$F_{(t)3} = F_o \cdot \frac{0,26 - 0,366}{0,136} = F_o(-0,78) = 1 - F_o(0,78) = 1 - 0,78 = 0,22$$

$$F_{(t)4} = F_o \cdot \frac{0,34 - 0,366}{0,136} = F_o(-0,19) = 1 - F_o(0,19) = 1 - 0,58 = 0,42$$

$$F_{(t)5} = F_o \cdot \frac{0,42 - 0,366}{0,136} = F_o(0,40) = 0,66$$

$$F_{(t)6} = F_o \cdot \frac{0,50 - 0,366}{0,136} = F_o(0,99) = 0,84$$

$$F_{(t)7} = F_o \cdot \frac{0,58 - 0,366}{0,136} = F_o(1,57) = 0,94$$

$$F_{(t)8} = F_o \cdot \frac{0,66 - 0,366}{0,136} = F_o(2,16) = 0,98$$

7. Определяется значение интегральной функции закона распределения Вейбулла. Интегральная функция закона распределения Вейбулла  $F(t)$  для практических расчетов выражается уравнением:  $F(t) = F_T [0,9(t_{к(i)} - C)] / (T_{cp} - C)$

Таблица 14.15. Значение  $F_o$ .

$F_o$	Сотые доли									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0,0	0,50	50	51	51	52	52	52	53	53	54
0,1	0,54	54	55	55	56	56	56	57	57	58
0,2	0,58	58	59	59	60	60	60	61	61	61
0,3	0,62	62	63	63	63	64	64	64	65	65
0,4	0,66	66	66	67	67	67	68	68	68	69
0,5	0,69	70	70	71	71	71	71	72	72	72
0,6	0,73	73	73	74	74	74	75	75	75	75
0,7	0,76	76	76	77	77	77	78	78	78	79
0,8	0,79	79	79	80	80	80	81	81	81	81
0,9	0,82	82	82	82	83	83	83	83	84	84
1,0	0,84	84	85	85	85	85	86	86	86	86
1,1	0,86	87	87	87	87	88	88	88	88	88
1,2	0,89	89	89	89	89	89	90	90	90	90
1,3	0,90	91	91	91	91	91	91	92	92	92
1,4	0,92	92	92	92	93	93	93	93	93	93
1,5	0,93	93	94	94	94	94	94	94	94	94
1,6	0,95	95	95	95	95	95	95	95	95	96
1,7	0,96	96	96	96	96	96	96	96	96	96
1,8	0,96	97	97	97	97	97	97	97	97	97
1,9	0,97	97	97	97	97	97	98	98	98	98
2,0	0,98	98	98	98	98	98	98	98	98	98
2,1	0,98	98	98	98	98	98	98	99	99	99
2,2	0,99	99	99	99	99	99	99	99	99	99
2,3	0,99	99	99	99	99	99	99	99	99	99
2,4	0,99	99	99	99	99	99	99	99	99	99
2,5	0,99	99	99	99	99	99	1,00	1,00	1,00	1,00

Значение  $F(t)$  определяется из таблицы 14.17, предварительно найдя параметр закона Вейбулла "b" из таблицы 14.16 по значению  $V$ .

Таблица 14.16. Параметр закона Вейбулла "b".

Значение $V$	0,52	0,50	0,48	0,46	0,44	0,42	0,41	0,40
Параметр b	2,0	2,1	2,2	2,3	2,4	2,5	2,6	2,7
Значение $V$	0,39	0,38	0,37	0,36	0,35	0,34	0,33	0,32
Параметр b	2,8	2,9	2,9	3,0	3,1	3,2	3,4	3,5

Так как  $V = 0,39$ , то принимаем  $b = 2,8$ .

$$F_{(t)1} = F_T \cdot \frac{0,9 \cdot (0,10 - 0,02)}{0,366 - 0,02} = F_T(0,21) = 0,01$$

$$F_{(t)2} = F_T \cdot \frac{0,9 \cdot (0,18 - 0,02)}{0,366 - 0,02} = F_T(0,42) = 0,08$$

$$F_{(t)3} = F_T \cdot \frac{0,9 \cdot (0,26 - 0,02)}{0,366 - 0,02} = F_T(0,62) = 0,22$$

$$F_{(t)4} = F_T \cdot \frac{0,9 \cdot (0,34 - 0,02)}{0,366 - 0,02} = F_T(0,83) = 0,45$$

$$F_{(t)5} = F_T \cdot \frac{0,9 \cdot (0,42 - 0,02)}{0,366 - 0,02} = F_T(1,04) = 0,67$$

$$F_{(t)6} = F_T \cdot \frac{0,9 \cdot (0,50 - 0,02)}{0,366 - 0,02} = F_T(1,25) = 0,84$$

$$F_{(t)7} = F_T \cdot \frac{0,9 \cdot (0,58 - 0,02)}{0,366 - 0,02} = F_T(1,46) = 0,94$$

$$F_{(t)1} = F_T \cdot \frac{0,9 \cdot (0,64 - 0,02)}{0,366 - 0,02} = F_T(1,61) = 0,98$$

Таблица 14.17. Значение  $F(t)$ .

F(t)	Параметр "b"						
	2,0	2,2	2,4	2,5	2,7	2,8	2,9
0,1	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,2	0,04	0,03	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01
0,3	0,09	0,07	0,05	0,05	0,04	0,03	0,03
0,4	0,15	0,12	0,10	0,10	0,08	0,07	0,07
0,5	0,22	0,20	0,17	0,16	0,14	0,13	0,13
0,6	0,30	0,28	0,25	0,24	0,22	0,21	0,20
0,7	0,39	0,37	0,35	0,34	0,32	0,31	0,30
0,8	0,47	0,45	0,44	0,44	0,42	0,41	0,41
0,9	0,56	0,55	0,54	0,54	0,53	0,53	0,52
1,0	0,63	0,63	0,63	0,63	0,63	0,63	0,63
1,1	0,70	0,71	0,72	0,72	0,73	0,73	0,73
1,2	0,76	0,78	0,79	0,79	0,81	0,81	0,82
1,3	0,82	0,83	0,85	0,85	0,87	0,88	0,88
1,4	0,86	0,88	0,89	0,90	0,92	0,92	0,93
1,5	0,90	0,91	0,93	0,94	0,95	0,96	0,96
1,6	0,92	0,94	0,95	0,96	0,97	0,98	0,98
1,7	0,94	0,96	0,97	0,98	0,98	0,99	0,99
1,8	0,97	0,97	0,98	0,99	0,99	0,99	1,00
1,9	0,97	0,98	0,99	0,99	1,00	1,00	
2,0	0,98	0,99	0,99	1,00			
2,1	0,99	0,99	1,00				
2,2	0,99	1,00					
2,3	1,00						

Продолжение таблицы 14.17.

F <sub>T</sub>	Параметр "b"					
	3,0	3,1	3,2	3,3	3,4	3,5
0,1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,2	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00
0,3	0,03	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
0,4	0,06	0,06	0,05	0,05	0,04	0,04
0,5	0,12	0,11	0,10	0,10	0,09	0,09
0,6	0,19	0,19	0,18	0,17	0,16	0,15
0,7	0,29	0,28	0,27	0,27	0,26	0,25
0,8	0,40	0,39	0,39	0,38	0,37	0,37
0,9	0,52	0,51	0,51	0,51	0,50	0,50
1,0	0,63	0,63	0,63	0,63	0,63	0,63
1,1	0,74	0,74	0,74	0,75	0,75	0,75
1,2	0,82	0,83	0,84	0,84	0,84	0,85
1,3	0,89	0,90	0,90	0,91	0,91	0,92
1,4	0,94	0,94	0,95	0,95	0,96	0,96
1,5	0,97	0,97	0,97	0,98	0,98	0,98
1,6	0,98	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99
1,7	0,99	0,99	1,00	1,00	1,00	1,00
1,8	1,00	1,00				

Полученные значения интегральной функции законов ЗНР и ЗРВ занести в таблицу:

Границы интервалов	0,02	0,10	0,18	0,26	0,34	0,42	0,50	0,58
	0,10	0,18	0,26	0,34	0,42	0,50	0,58	0,66
Кол-во m	2	2	3	5	10,5	8	4,5	1
F(t) ЗНР	0,02	0,08	0,22	0,42	0,66	0,84	0,94	0,98
F(t) ЗРВ	0,01	0,08	0,22	0,45	0,67	0,84	0,94	0,98

8. Определяется значение критерия согласия Пирсона  $\chi^2$  (хи-квадрат) для каждого закона

Для определения  $\chi^2$  каждого рассматриваемого теоретического закона необходимо:

1. Укрупнить статистический ряд. Правило построения данного ряда:

а) объединить ряд последовательных интервалов между собой, если в них значение частоты  $m$  меньше 4. Количество интервалов должно быть не меньше 4-х и не более 6...8

б) сложить значения частоты  $m$  объединяемых интервалов. В каждом объединенном интервале значение частоты  $m$  должна быть равно или больше 4.

2. В каждый укрупненный интервал записать значение границ интервала и значение интегральной функции  $F(t)$  каждого закона, равное значению *последнего* интервала, объединенных между собой. Данные занести в таблицу.

Границы интервалов	0,02... 0,26	0,26... 0,34	0,34... 0,42	0,42... 0,50	0,50... 0,66
Кол-во $m_{укр}$	7	5	10,5	8	5,5
F(t) ЗНР	0,22	0,42	0,66	0,84	0,98
F(t) ЗРВ	0,22	0,45	0,67	0,84	0,98

3. Определяется теоретическая частота  $m_T$  каждого укрупненного интервала.

$$\text{Значение } m_T \text{ определяется по формуле: } m_T = N [F(t_i) - F(t_{i-1})] \quad (14.64)$$

где  $F(t_i)$  – значение интегральной функции  $i$ -го интервала,

$F(t_{i-1})$  - значение интегральной функции предшествующего интервала,

$N$  - общее число информации.

*Для закона ЗНР*

$$m_1 = 36 (0,22 - 0) = 7,92$$

$$m_3 = 36 (0,66 - 0,42) = 8,64$$

$$m_2 = 36 (0,42 - 0,22) = 7,2$$

$$m_4 = 36 (0,84 - 0,66) = 6,48$$

$$m_5 = 36 (0,98 - 0,84) = 5,04$$

*Для закона ЗРВ*

$$m_1 = 36 (0,22 - 0) = 7,92$$

$$m_3 = 36 (0,67 - 0,45) = 7,92$$

$$m_2 = 36 (0,45 - 0,22) = 8,28$$

$$m_4 = 36 (0,84 - 0,67) = 6,12$$

$$m_5 = 36 (0,98 - 0,84) = 5,04$$

Данные занести в таблицу

Границы интервалов	0... 0,26	0,26... 0,34	0,34... 0,42	0,42... 0,50	0,50... 0,64	
Кол-во $m_{укр}$	7	5	10,5	8	5,5	
по закону ЗНР	F(t)	0,22	0,42	0,66	0,84	0,98
	$m_{теор}$	7,92	7,20	8,64	6,48	5,04
по закону ЗРВ	F(t)	0,22	0,45	0,67	0,84	0,98
	$m_{теор}$	7,92	8,28	7,92	6,12	5,04

4. Определяется численное значение  $\chi^2$  для каждого закона.

$$\chi^2 = \sum \frac{(m_i - m_{Ti})^2}{m_{Ti}} \quad (14.65)$$

где  $m_i$  - опытная укрупненная частота данных информации,

$m_{ti}$  - теоретическая укрупненная частота данных информации.

Для закона ЗНР

$$\chi^2 = \frac{(7-7,92)^2}{7,92} + \frac{(5-7,2)^2}{7,2} + \frac{(10,5-8,64)^2}{8,64} + \frac{(8-6,48)^2}{6,48} + \frac{(5,5-5,04)^2}{5,04} = 0,11 + 0,67 + 0,40 + 0,36 + 0,04 = 1,58$$

Для закона ЗРВ

$$\chi^2 = \frac{(7-7,92)^2}{7,92} + \frac{(5-8,28)^2}{8,28} + \frac{(10,5-7,92)^2}{7,92} + \frac{(8-6,12)^2}{6,12} + \frac{(5,5-5,04)^2}{5,04} = 0,11 + 1,3 + 0,84 + 0,58 + 0,04 = 2,87$$

Таким образом, выбирается закон нормального распределения (ЗНР), так как он имеет значение  $\chi^2$  меньше, чем у закона ЗРВ.

5. Определяется степень совпадения данных информации с выбранным теоретическим законом.

Для определения степени совпадения данных информации (в процентах) с выбранным теоретическим законом необходимо:

Определить порядковый № строки:  $\text{№} = n_{\text{укр}} - r$

где  $n_{\text{укр}}$  - число укрупненных интервалов,

$r$  - число параметров, определяющих закон.

Для законов ЗНР и ЗРВ число  $r$  равно 3. Тогда  $\text{№} = n_{\text{укр}} - 3$

$$\text{№ строки} = 5 - 3 = 2$$

По выбранной строке выбираем ближайшее значение  $\chi^2_{\text{теор}}$ , близкое к полученной расчетной величине  $\chi^2$  и определяем величину  $P\%$  из таблицы 14.18.

Таблица 14.18. Величину  $P\%$ .

№ строки	$P\%$	95	90	80	70	50	30	20	10
1		0,00	0,02	0,06	0,15	0,45	1,07	1,64	2,71
2	$\chi^2_{\text{теор}}$	0,10	0,21	0,45	0,71	1,39	2,41	3,22	4,60
3		0,35	0,58	1,00	1,42	2,37	3,66	4,64	6,25
4		0,71	1,06	1,65	2,20	3,36	4,88	5,99	7,78
5		1,14	1,61	2,34	3,00	4,35	6,06	7,29	9,24

Значение  $P\%$  для расчетного  $\chi^2 = 1,58$  будет равно примерно 46 %.

Критической вероятностью совпадения значений выбранного теоретического закона с данными информации принято считать  $P \% = 10$ . Если  $P \% < 10 \%$ , выбранный для выравнивания теоретический закон распределения следует считать непригодным. Выбранный закон нормального распределения хорошо описывает значения представленной информации и рекомендуется для продолжения решения данной задачи.

6. Строится график интегральной функции закона нормального распределения и определяем процент валов годных для дальнейшей эксплуатации и требующих ремонта.

По оси абсцисс откладывается *конечное* значение каждого интервала, а по оси ординат значение функции  $F(t)$  каждого интервала (рис. 14.9). Допустимый размер толщины шлиц валов при работе со шлицевыми втулками, бывшими в эксплуатации составляет 5,72 мм. Определяется допустимая величина износа шлиц валов, пригодных для сопряжения с шлицевыми втулками, бывшими в эксплуатации:

$$I_{\text{доп}} = d_{\text{min}} - d_{\text{бывш. в экпл.}} = 5,92 - 5,72 = 0,20 \text{ мм.}$$

Откладывается на оси абсцисс значение износа, равное 0,20 мм, восстанавливается перпендикуляр до кривой интегральной функции, а затем влево до оси ординат. По оси ординат определяется, что значение  $F(t)$  при данном допустимом износе составит 0,10 или 10%.

Таким образом, процент валов для дальнейшей эксплуатации в сопряжении со шлицевыми втулками, бывшими в эксплуатации, составит 10%.

Допустимый размер толщины шлиц валов при работе с новыми шлицевыми втулками составляет 5,58 мм. Определяется допустимая величина износа шлиц валов, пригодных для сопряжения с новыми или восстановленными до номинального размера шлицевыми втулками:

$$I_{\text{доп}} = d_{\text{min}} - d_{\text{нов.}} = 5,92 - 5,58 = 0,34 \text{ мм.}$$

Откладывается на оси абсцисс значение износа, равное 0,34 мм, восстанавливается перпендикуляр до кривой интегральной функции, а затем влево до оси ординат. По оси ординат определяется, что значение  $F(t)$  при этом износе со-

ставит 0,41 или 41%. Но в эти 41% входят и 10% валов, которые могут работать со шлицевыми втулками, бывшими в эксплуатации. Таким образом, число валов для дальнейшей эксплуатации в сопряжении с *новыми или восстановленными до номинального размера* шлицевыми втулками составит 31%. Остальные 59% валов требуют восстановления:  $100\% - (10\% + 31\%) = 59\%$ .

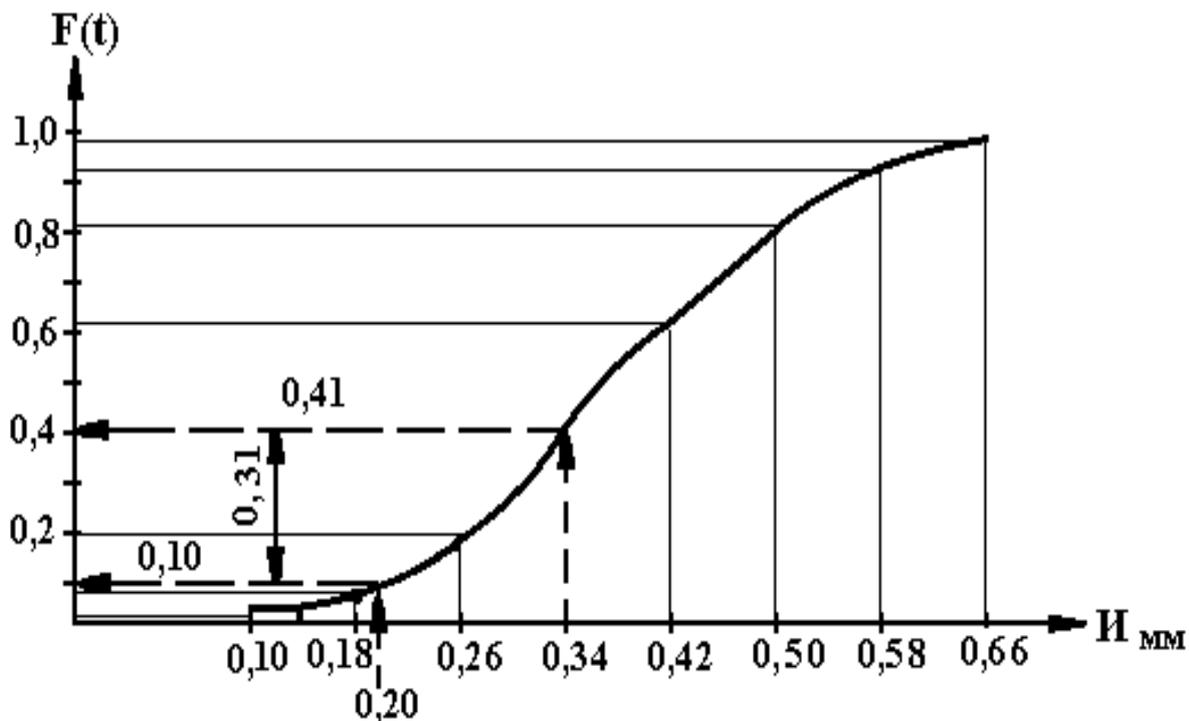


Рис. 14.9. Кривая интегральной функции

Вывод:

- 1) Износ шлицов валов КПП трактора Т10М подчиняется нормальному закону распределения.
- 2) Если на ремонтном предприятии дефектуется партия валов КПП в количестве, например, 120 штук, то:
  - а) 10% из них или 12 валов можно оставить для дальнейшей эксплуатации в КПП со старыми шлицевыми втулками;
  - б) 31% из них или 37 валов можно оставить для дальнейшей эксплуатации в КПП, но с использованием новых или восстановленных до номинального размера шлицевых втулок;
  - в) 59% из них или 51 вал требуют ремонта по восстановлению у них шлицевых поверхностей.

### Контрольные вопросы

1. Дайте определение понятию долговечность изделия.
2. Какими параметрами надежности характеризуется долговечность машины?
3. Что такое средний доремонтный ресурс?
4. Что такое допустимый износ детали и что он определяет?
5. Что характеризует допустимый зазор?
6. Что определяет величина нижней доверительной границы?
7. В чем сущность сопряжения с заменой одной детали?
8. Дайте определение гамма-процентного ресурса.
9. В чем физическая сущность гамма-процентного ресурса?
10. Как определяется гамма-процент изделия?
11. Назовите экономические показатели долговечности.

## Глава 15. Ремонтопригодность технических систем и транспортно - технологических машин

*Ремонтопригодность* – свойство объекта, заключающееся в приспособленности к поддержанию и восстановлению работоспособного состояния путем технического обслуживания и ремонта (ГОСТ 27.000).

Применительно к машинам или ее агрегатам можно сказать, что ремонтпригодность машины (агрегата) – это *свойство ее конструкции*, которое позволяет данной конструкции предупреждать, выявлять и устранять отказы и неисправности в результате выполнения технических обслуживаний и ремонтов при минимальных затратах труда, материалов, времени и денежных средств.

Таким образом, структуру свойств ремонтпригодности машин можно представить из двух крупных блоков (рис.15.1):

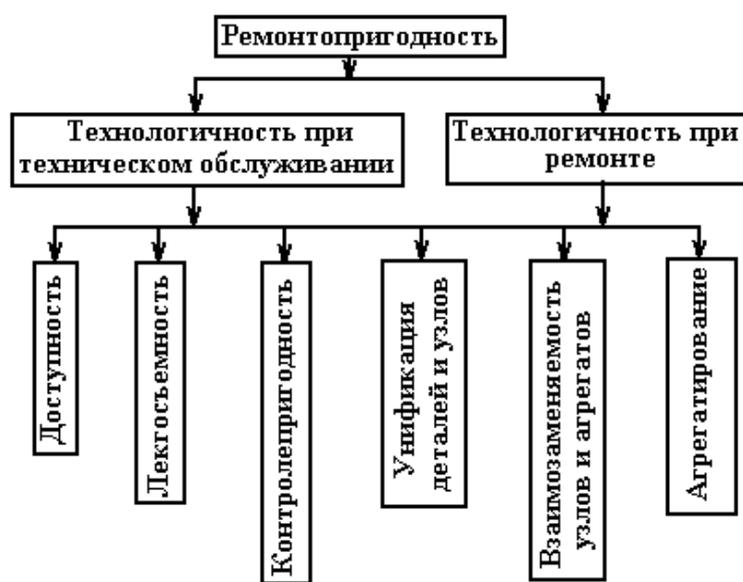


Рис. 15.1 Структура свойств ремонтпригодности машин.

- 1) технологичность машин при техническом обслуживании,
- 2) технологичность машин при ремонте.

Под технологичностью машин при техническим обслуживании понимают такое свойство их конструкций, которое выражается в их приспособленности к работам, выполняемым при техническом обслуживании в

процессе эксплуатации и хранения.

Под технологичностью машин при ремонте понимают свойство конструкций машин и их конструктивных элементов (деталей, узлов, блоков), которое характеризуется их приспособленностью к ремонтным работам. Как видно из структуры свойств машины при техническом обслуживании и ремонте каждый из этих блоков состоит из следующих свойств: а) доступность;

- б) легкоъемность;
- в) контролепригодность;
- г) унификация узлов и деталей.
- д) взаимозаменяемость узлов и агрегатов;
- е) агрегатирование.

### *Доступность*

Под *доступностью* подразумевают возможность с малыми затратами времени и труда добраться до агрегатов, узлов и деталей, которые могут подлежать систематическому контролю, регулировке, замене или ремонту. Другими словами, узлы и детали в машине необходимо размещать так, чтобы с минимальной потерей времени и труда выявить отказавшие элементы или найти причину отказа. Доступность характеризуется такими факторами как:

- возможность машиниста или слесаря производить работу руками в определенных точках зоны рабочего места при определенной позе;
- возможность осмотра рабочего места с достаточной отчетливостью;
- исключение работы на ощупь;
- удобство использования инструмента.

Основные требования по обеспечению доступности для конструкций транспортных и технологических машин таковы:

1. Агрегаты и оборудование различных систем сложной машины необходимо группировать в монтажные блоки и устанавливать на панелях в специализированных отсеках. Установленное в отсеке оборудование следует размещать так, чтобы свести к минимуму или совсем исключить случаи, когда осмотр или замена одного из агрегатов невозможны без предварительного демонтажа других, рядом расположенных, агрегатов.

2. К местам крепления съемных элементов машины следует обеспечивать удобный доступ с необходимым для работы инструментом.

3. Капоты, щитки и кожухи машины должны легко открываться и в открытом положении обеспечивать свободный доступ ко всем агрегатам, узлам и деталям, которые они закрывают.

4. Резьбовые соединения, требующие периодического осмотра и проверки затяжки должны быть легкодоступны.

5. Блоки гидро- и электрооборудования необходимо монтировать на местах, обеспечивающих их полный контроль работы.

6. Приборные доски и щиты с приборами для обеспечения доступа при осмотре и замене приборов должны выполняться откидными или легкоъемными.

Доступность любого из объектов для технического обслуживания и ремонта может быть оценена *коэффициентом доступности*  $K_d$ , рассчитываемым по

формуле:

$$K_d = \frac{T_{\text{доп}}}{T_{\text{доп}} + T_{\text{осн}}} \quad (15.1)$$

где  $T_{\text{доп}}$  – трудоемкость дополнительных работ, чел/ч,

$T_{\text{осн}}$  – трудоемкость выполнения основной целевой работы, чел/ч.

К дополнительным работам относятся снятие и установка крышек люков, панелей, капотов, теплозвукоизоляции, демонтаж и монтаж рядом установленного и не подлежащего съему оборудования и т.д. К основным целевым работам относятся контрольные, регулировочные, смазочные, заправочные операции, демонтаж и монтаж подлежащих замене агрегатов, узлов или деталей и др.

Коэффициент доступности можно определять как для отдельных сборочных единиц (агрегатов, узлов), так и для машины в целом.

### ***Легкоъемность***

Требование доступности непосредственно дополняется требованием *легкоъемности* узлов и деталей, подлежащих замене или ремонту. Легкоъемность зависит от конструкции разъемов, характера крепления, габаритов и массы снимаемых деталей, узлов или агрегатов. Необходимо по возможности отказываться в конструкции узла от таких способов фиксации и стопорения как шплинтовка, кернение, развальцовка. Следует стремиться к сокращению крепежных деталей и использовать унифицированные крепежные изделия, быстроразъемные соединения и муфты.

Легкоъемность в первую очередь нужна к тем элементам конструкции,

которые подвержены наиболее интенсивному изнашиванию, с наибольшей частотой отказов.

Для агрегатов и других элементов машины весом от 20 до 50 кгс, подлежащие периодической замене, должна быть предусмотрена возможность выполнения работ усилием двух человек. Агрегаты весом более 50 кгс должны иметь такелажные узлы для подъемных приспособлений.

Легкосъемность определяется коэффициентом легкосъемности:

$$K_{\text{л}} = 1 - \Delta T_{\text{дм}} / T_{\text{дм}} \quad (15.2)$$

где  $\Delta T_{\text{дм}}$  – превышение трудоемкости демонтажно-монтажных работ машины по сравнению с эталонной;

$T_{\text{дм}}$  – трудоемкость демонтажно-монтажных работ машины.

### ***Контролепригодность***

Под *контролепригодностью* понимают свойство конструкции машины (агрегата) к предупреждению и обнаружению эксплуатационных отказов, обеспечению эффективного текущего и оперативного (после возникновения отказа) контроля за состоянием узлов и деталей. Текущий контроль осуществляется различными приборами, датчиками, сигнальными лампочками и т.п., а оперативный контроль подразумевает возможность легко подключить специальные контрольные приборы.

Увеличение сложности машин приводит к тому, что затраты времени и трудоемкость работ, связанных с контролем и прогнозированием работоспособности машины, становятся достаточно существенными. Поэтому при проектировании новых моделей машин или модернизации существующих типов машин возникает задача рационального выбора во-первых контролируемых параметров машины и во-вторых – метода и средств контроля. Средства контроля необходимо подбирать таким образом, чтобы в каждой контрольной операции получать информацию о техническом состоянии машины или ее элементов требуемой полноты и достоверности при возможно меньших затратах времени.

В конструкции транспортных и технологических машин предусмотрены в основном средства контроля, которые в процессе их эксплуатации осуществля-

ют контроль значений только определенных параметров и аварийный контроль. Например, прибор контроля давления масла, расхода топлива, индикаторы, загораящиеся при перегреве двигателя или отсутствия топлива и т.д. Но эти средства контроля не позволяют диагностировать текущее состояние объекта и по ним нельзя вести прогнозирование потери объектом работоспособности.

Как показывает практика эксплуатации транспортных и технологических машин выведение на пульт управления машиной большого числа встроенных приборов не дает положительного эффекта, так как обилие информации на пульте управления резко снижает управляемость машиной. Поэтому практически весь контроль за прогнозированием состояния машины производится при проведении технических обслуживаний и при ремонте с использованием специального оборудования.

Существует количественный показатель контролепригодности конкретной машины – *коэффициент общей контролепригодности*:

$$K_k = N_k / N_{об} \quad (15.3)$$

где  $N_k$  – количество элементов машины, приспособленных к контролю,

$N_{об}$  – общее число элементов машины, которые в процессе эксплуатации необходимо бы контролировать

### ***Унификация узлов и деталей***

Под *унификацией* понимают *метод использования* единообразия конструкции одинаковых по своему функциональному назначению деталей, узлов, агрегатов, применяемых в различных машинах, с целью сокращения их типов, видов и размеров.

Например, при создании семейства тракторов одного класса, но различных по назначению, можно использовать ряд агрегатов (двигатель, муфту сцепления, коробку передач, задний мост) для всех или нескольких модификаций. Начальным этапом осуществления унификации элементов конструкции машин является заимствование деталей, узлов и агрегатов из ранее созданных машин, т.е. осуществление *принципа конструктивной преемственности*.

Существует так называемая *внутриразмерная* унификация.

На основе базовой модели создается семейство близких по назначению машин с унифицированными (полностью или частично) рабочими органами, механизмами и т.д. Уровень унификации здесь наиболее высокий, однако применимость унифицированных элементов ограничена пределами данного семейства машин. Например, существует семейство дизельных двигателей ЯМЗ-236, 238НБ, 240Н, Д-180, Д442-52, Д-3045 со степенью унификации 93...100%.

Более широкую область унификации составляет *межразмерная* унификация, когда унификация охватывает различные по своему назначению машины. Унификация существенно влияет на обеспечение машин запасными частями. Большая номенклатура запасных частей значительно усложняет и удорожает организацию технического обслуживания и ремонта машин.

### ***Взаимозаменяемость узлов и агрегатов.***

Взаимозаменяемость узлов и агрегатов машин играет важную роль в повышении эффективности их технического обслуживания и ремонта. Под взаимозаменяемостью при оценке ремонтпригодности машин понимается свойство конструкций узлов и агрегатов обеспечивающее возможность осуществлять их сборку или замену без выполнения пригоночных работ.

При разработке требований, обеспечивающих взаимозаменяемость, необходимо учитывать следующие факторы: частоту снятий и замен элементов машины при техническом обслуживании и ремонте, объем и сложность пригоночных работ при замене, продолжительность и сложность ремонта. В целом же общие требования по обеспечению взаимозаменяемости узлов и агрегатов машины снимаемых и заменяемых при техническом обслуживании и ремонте таковы:

1. Снимаемые и заменяемые узлы и агрегаты машины должны обладать геометрической и функциональной взаимозаменяемостью;
2. При модификациях машины измененные (модифицированные) узлы и агрегаты должны сохранять взаимозаменяемость с прежними конструкциями;
3. Эксплуатационно-ремонтные допуски следует назначать с учетом сохранения качества элементов машины при последующем выполнении технического обслуживания и ремонта.

Вопросы связанные с взаимозаменяемостью, решают на этапах проектирования машины и ее изготовления.

Взаимозаменяемость оценивается коэффициентом взаимозаменяемости:

$$K_B = T_{\text{зам}} / (T_{\text{зам}} + T_{\text{подг}}) \quad (15.4)$$

где  $T_{\text{зам}}$  - трудоемкость основной работы при замене агрегата, одной единицы, детали, чел-час,  $T_{\text{подг}}$  – трудоемкость подгоночных работ, чел-час.

### *Агрегатирование*

Под *агрегатированием* понимают *метод компоновки* достаточно большой и разнообразной номенклатуры машин в зависимости от их назначения на основе применения ограниченного числа стандартизованных и унифицированных агрегатов, обладающих геометрической и функциональной взаимозаменяемостью. Агрегат – укрупненный узел машины, самостоятельно выполняющий отдельные функции (двигатель, редуктор, гидронасос и др.).

Использование принципов агрегатирования позволяет значительно сократить номенклатуру сборочных единиц и запасных частей к ним, а также организовывать ремонт агрегатов на специализированных ремонтных предприятиях.

При применении принципа агрегатирования необходимо предусматривать у агрегатов наличие базовых поверхностей и установочных штифтов, обеспечивающих быструю и правильную установку их на машину без дополнительной центровки, регулировки и пригоночных работ.

Применение агрегатирования с возможностью замены агрегатов с минимальными затратами труда и времени приобретает особо важное значение, когда в практику восстановления работоспособного состояния машин внедряются агрегатный метод, плановая замена ремонтными комплектами (ПЗРК) и др.

Оценочные показатели ремонтпригодности. Как и другие свойства надежности ремонтпригодность оценивается техническими и экономическими показателями.

*Техническими* показателями для транспортных и технологических машин являются:

- 1) среднее время восстановления работоспособности машины  $\tau_{\text{ср}}$ ;

2) вероятность восстановления работоспособности машины в заданное время  $P(\tau)$ ;

3) средняя трудоемкость восстановления объекта после отказа –  $S_{cp}^B$ .

Среднее время восстановления работоспособности машины определяют из

выражения: 
$$\tau_{cp} = \frac{1}{m} \sum t_i \text{ (час / отказ)} \quad (15.5)$$

где  $t_i$  - оперативное время устранения  $i$ -го эксплуатационного отказа,

$m$  – суммарное количество отказов у  $N$  наблюдаемых машин.

В таблице 15.1 представлена ведомость количества отказов, затраты в часах и рублях на устранение эксплуатационных отказов и проведение технического обслуживания для парка машин одного из ООО.

Таблица 15.1. Ведомость количества отказов и затраты в часах и рублях на устранение эксплуатационных отказов и проведение ТО.

№ п/п	Наработка до конца наблюдения	Количество отказов за время наблюдения	Устранение отказов		Проведение технического обслуживания	
			час	руб	час	руб
1	1920	7	220	126	185	345
2	1210	5	195	226	110	250
3	2720	6	168	188	205	480
4	1600	9	215	180	155	265
5	970	2	96	84	105	180
6	1870	6	134	197	180	345
7	3450	8	312	286	335	680
8	2680	5	164	155	265	520
9	2930	12	248	365	380	730
10	3280	11	406	763	325	785
11	1850	9	210	246	170	310
12	1440	8	114	134	145	130
Итого:	25920	88	2395	2950	2560	5020

Определяется величина среднего времени восстановления работоспособности машин данного парка. Суммарное время устранения отказов – 2395 час.

$$\tau_{cp} = \frac{1}{88} 2395 = 27,2 \text{ (ч / отказ)}$$

Среднее время восстановления работоспособности машины зависит не столько приспособленностью машины к ремонту, сколько от уровня организации осуществления этого ремонта: структуры ремонтно-обслуживающей базы, наличие агрегатов обменного фонда, запасных частей, радиуса перевозки обменного фонда, укомплектованности передвижных ремонтных средств и других факторов. В связи с этим, при расчете показателей ремонтпригодности объекта учитывают лишь оперативное время обнаружения и устранения отказа.

Как показала практика, рассеивание времени восстановления у машин их работоспособность при эксплуатационных отказах, в большинстве случаев согласуется с законом распределения Вейбулла.

Вероятность восстановления работоспособности объекта  $P(\tau)$  оценивается вероятностью того, что время восстановления работоспособного состояния объекта не превысит заданное значение:

$$P(\tau) = P(T_{cp} < t) \quad (15.6)$$

где  $T_{cp}$  – среднее время восстановления,  
 $t$  – заданное время устранения отказа.

Показатель *вероятности* восстановления работоспособности машины в заданное время  $P(\tau)$  используется при планировании и составления графиков проведения технического обслуживания и ремонтов машин для парка машин. Так, по нормативам капитальный ремонт гусеничных тракторов составляет 40 дней, время на проведение технического обслуживания ТО-1 –125 часов, ТО-2 –500 часов и т.д.

Среднюю трудоемкость восстановления работоспособности объекта чаще всего оценивают *объединенной удельной трудоемкостью* технического обслуживания и ремонта за некоторый период эксплуатации данного объекта:

$$S_{cp}^B = \sum S_i / \sum H_i, \text{ чел.ч. / ед. наработ.} \quad (15.7)$$

где  $S_i$  – объединенная суммарная трудоемкость технического обслуживания и текущего ремонта  $i$  –го объекта за некоторый период эксплуатации,

$H_i$  – суммарная наработка  $i$  –го объекта за некоторый период эксплуатации.

Экономическими показателями ремонтпригодности являются:

1. Средние удельные затраты времени на проведение технического обслуживания, устранения эксплуатационных отказов и ремонт:

$$V_{\text{рем}} = \frac{1}{N} \cdot \sum \frac{V_{\text{ТО}(i)} + V_{\text{ЭО}(i)} + V_{\text{рем}(i)}}{N}, \text{ (ч/мотто-ч)} \quad (15.8)$$

где  $V_{\text{ТО}(i)}$ ,  $V_{\text{ЭО}(i)}$ ,  $V_{\text{рем}(i)}$  – удельные затраты времени на проведение технических обслуживаний, на устранение эксплуатационных отказов, на ремонт  $i$ -й машины,  $N$  - наработка (доремонтная, послеремонтная или полная), мото-ч.

$N$  – число наблюдаемых машин.

2. Средние удельные затраты труда на проведение технического обслуживания, устранения эксплуатационных отказов и ремонт:

$$T_{\text{рем}} = \frac{1}{N} \cdot \sum \frac{T_{\text{ТО}(i)} + T_{\text{ЭО}(i)} + T_{\text{рем}(i)}}{N}, \text{ (ч/мотто-ч)} \quad (15.9)$$

где  $T_{\text{ТО}(i)}$ ,  $T_{\text{ЭО}(i)}$ ,  $T_{\text{рем}(i)}$  – удельные затраты труда на проведение технических обслуживаний, на устранение эксплуатационных отказов, на ремонт  $i$ -й машины,  $N$  - наработка (доремонтная, послеремонтная или полная), мото-ч.

$N$  – число наблюдаемых машин

3. Средние удельные затраты денежных средств на проведение технического обслуживания, устранения эксплуатационных отказов и ремонт:

$$D_{\text{рем}} = \frac{1}{N} \cdot \sum \frac{D_{\text{ТО}(i)} + D_{\text{ЭО}(i)} + D_{\text{рем}(i)}}{N}, \text{ (руб/мотто-ч)} \quad (15.10)$$

где  $D_{\text{ТО}(i)}$ ,  $D_{\text{ЭО}(i)}$ ,  $D_{\text{рем}(i)}$  – удельные затраты денежных средств на проведение технических обслуживаний, на устранение эксплуатационных отказов, на ремонт  $i$ -й машины,  $N$  - наработка (доремонтная, послеремонтная или полная), мото-ч.,  $N$  – число наблюдаемых машин.

Произведем расчет по определению средних удельных затрат времени устранения эксплуатационных отказов и на проведение технических обслуживаний для парка машин, техническое состояние которых приведены в таблице 1.15.

Решение: 
$$V_{\text{ср}} = \frac{\sum V_{\text{ТО}} + \sum V_{\text{ЭО}}}{\sum N} \text{ (ч/мотто-ч)} \quad (15.11)$$

$$V_{\text{ср}} A = \pi r^2 = \frac{2395 + 2560}{25920} = 0,19$$

Зная данную величину, можно планировать работу службы эксплуатации для данных машин, зная их годовую планируемую наработку. Например, в среднем на каждую машину планируется годовая наработка в 2000 мото-ч. Так как время простоя машины за год составит 380 мото-ч. ( $0,19 \times 2000$ ), а парка машин – 4560 мото-ч., то фактическая наработка данных машин составит 19440 мото-ч., а не 24000 мото-ч. как планировалась ( $2000 \times 12$ ).

*Отсюда вывод:*

1) увеличить штат службы эксплуатации, чтобы сократить время на проведение работ по устранению эксплуатационных отказов (время на проведение технического обслуживания обычно регламентировано и его изменять практически трудно);

2) приобрести дополнительно 3 машины, если необходимо выполнить тот объем работы, который оценивается в 24000 мото-ч.

Сопоставление денежных затрат на увеличение штата или покупку 3-х машин даст правильное решение.

### Контрольные вопросы

1. Какова структура свойств ремонтпригодности машины?
2. Приведите конструктивные примеры, повышающие возможности доступа у машины.
3. Что такое унификация узлов и деталей машины?
4. Чем взаимозаменяемость узлов и деталей отличается от унификации?
5. Приведите оценочные показатели ремонтпригодности.
6. С какой целью используется показатель вероятности восстановления работоспособности машины в заданное время?
7. Что определяет средние удельные затраты времени на устранение эксплуатационных отказов и на проведения технических обслуживаний?
8. Что является экономическими показателями ремонтпригодности?
9. Как определяются средние удельные затраты денежных средств на проведение ТО, устранения эксплуатационных отказов и ремонта?

## Глава 16. Понятие о сохраняемости технических систем и транспортно -технологических машин

### 16.1 Оценочные показатели сохраняемости

*Сохраняемость* – свойство объекта сохранять в заданных пределах значения параметров, характеризующих способности объекта выполнять требуемые функции, в течение и после хранения и (или) транспортирования (ГОСТ 27.002)

Измерителями сохраняемости обычно служат:

- срок сохраняемости;
- вероятность работоспособного состояния после хранения.

Срок сохраняемости – это календарная продолжительность хранения или транспортировки машины, агрегата, технического средства в течении и после которой сохраняются значения показателей безотказности и ремонтпригодности в установленных пределах.

Вероятность работоспособного состояния после хранения – это вероятность того, что после заданного срока хранения машина или техническое средство в целом будет в работоспособном состоянии.

Сохраняемость характеризуется сопротивляемостью конструкции объекта изменению характеристик его элементов (агрегатов и узлов) под воздействием влажности окружающей среды, загрязненности атмосферы различными примесями, отдельные составляющие которых, агрессивны, окружающей температуры и других факторов. Показателем сохраняемости объекта служит срок его сохраняемости. Согласно ГОСТ 27.002 показателями сохраняемости являются:

1. вероятность безотказного хранения;
2. вероятность отказа при хранении;
3. интенсивность отказа при хранении;
4. средний срок сохраняемости  $C_{cp}$  – математическое ожидание срока сохраняемости;

$$C_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^N C_{ci}}{N} \quad (16.1)$$

где  $C_{ci}$  – срок сохраняемости  $i$ -го объекта.

5. гамма-процентный срок сохраняемости  $C_{(\gamma\%)}$  – срок сохраняемости, достигнутый объектом с заданной вероятностью  $\gamma$ , выраженной в процентах;

6. средние удельные затраты  $C_{xp}$  на хранение объекта.

$$C_{xp} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{C_{зп.хр} \cdot C_{м.хр} \cdot C_{ам.хр}}{C_{ср}} \quad (16.2)$$

где  $C_{зп.хр}$  – суммарные затраты на заработную плату при хранении  $i$ -той машины,  $C_{м.хр}$  - суммарные затраты на материалы при хранении  $i$ -той машины,  $C_{ам.хр}$  - суммарные затраты на амортизацию здания и сооружений, машинных дворов при хранении  $i$ -той машины,

Гамма-процентный срок сохраняемости  $C_{(\gamma\%)}$  по своему физическому смыслу, так же как и гамма-процентный ресурс, - это односторонняя нижняя доверительная граница показателя срока сохраняемости, указывающая, какой  $\gamma$  процент объектов или их составных элементов, должен превышать установленный срок сохраняемости.

Данный показатель определяется аналитическими уравнениями, определяемыми соответствующими законами:

- при законе нормального распределения при доверительной вероятности  $\beta$ :

$$C_{(\gamma\%) \beta} = C^{ср} - H_{к(\beta)} \cdot \sigma \quad (16.3)$$

- при законе распределения Вейбулла:

$$C_{(\gamma\%) \beta} = H_k^B (1 - \beta) \cdot a + C \quad (16.4)$$

Сохраняемость объекта характеризует также его способность противостоять отрицательному влиянию условий хранения и транспортировки на остальные показатели надежности объекта – безотказность, долговечность и ремонтпригодность. Продолжительное хранение и транспортирование объектов могут снизить их надежность при последующей работе по сравнению с объектами, которые не подвергаются хранению и транспортировке.

Для некоторых транспортных и технологических машин, которые работают сезонно или в определенные периоды, проблема их сохраняемости вне рабочего периода весьма актуальна.

Машины, которые не используются от 10 дней до 2-х месяцев ставят на кратковременное хранение без снятия с них сборочных единиц и деталей. При постановке машины на кратковременное хранение ей проводят техническое обслуживание, которое включает очистку и мойку, герметизацию отверстий, щелей и полостей от проникновения влаги и пыли, консервацию составных частей, установку машины на подставки. При хранении при низких температурах или более 1 месяца аккумуляторные батареи и резинотехнические изделия снимают и сдают на склад.

На длительное хранение машина ставится с перерывом в использовании более 2 месяцев. Если машина хранится на открытой площадке, то с нее снимают сборочные единицы, которые хранятся в закрытом помещении.

С машины снимают электрооборудование, втулочно-роликовые цепи, приводные ремни, резинотехнические и полимерные детали и узлы, стальные тросы. Кроме консервации наружных поверхностей осуществляется консервация картеров, гидравлических и других циркуляционных систем.

Правильное и качественное проведение технического обслуживания машин при подготовке их длительному хранению, технического обслуживания во время хранения и технического обслуживания при снятии машин с хранения, обеспечиваю высокие показатели сохраняемости

*Коррозия* - основной фактор снижения ресурса машины и ее элементов. Поэтому большое внимание обращают на восстановление поврежденного лакокрасочного покрытия, а также на качественное нанесение антикоррозионных покрытий.

Исключить процесс естественного старения в период хранения машины невозможно, но значительно снизить данный процесс условиями хранения возможно. Так резинотехнические изделия (протекторы, камеры, манжеты, ремни и др.) при хранении в сырых и неотопливаемых зимой помещениях теряют свой ресурс до 100%. Расслоение и трещины являются характерными признаками неправильного их хранения.

В условиях эксплуатации транспортных и технологических машин возникает необходимость их перебазирования на новые объекты работ. Если соблюдены все правила транспортировки объекта, то его работоспособность сохраняется в тех же параметрах, что и до транспортировки.

## 16.2. Показатели надежности восстанавливаемых объектов

*Восстанавливаемый* объект отличается от невосстанавливаемого только спецификой эксплуатации. Показатели безотказности невосстанавливаемых объектов: вероятность безотказной работы объекта, вероятность отказа, средняя наработка до отказа, интенсивность отказов могут характеризовать безотказность восстанавливаемых объектов, если оценивать функционирование восстанавливаемых объектов до первого отказа.

С другой стороны, процесс эксплуатации объектов с восстановлением можно представлять как последовательность интервалов работоспособности, чередующихся с интервалами восстановления. При этом восстановление может быть как полное, так и частичное. При полном восстановлении наработки между отказами имеют одинаковое распределение.

Для восстанавливаемых объектов важным показателем является *ремонтоспособность* (maintainability) - свойство объекта, заключающееся в приспособленности к поддержанию и восстановлению работоспособного состояния путем технического обслуживания и ремонта.

Показатели ремонтоспособности следующие:

- *вероятность восстановления* (probability of restoration, maintainability function) - вероятность того, что время восстановления работоспособного состояния объекта не превысит заданного значения  $PAO = P\{T_B < t\}$ . С этим показателем тесно связаны понятия вероятности невыполнения ремонта в заданное время и плотности вероятности времени восстановления.

*Вероятность невыполнения ремонта в заданное время* - это вероятность того, что отказ изделия не будет устранен в течение заданного времени  $V$ .

$$Q_B(t) = P\{T_B > t\} = 1 - P_B(t), \quad (16.5)$$

*Плотность вероятности* времени восстановления определяется формулой:

$$f_B(t) = \frac{dP_B(t)}{dt} \quad (16.6)$$

*Среднее время восстановления* (mean restoration time) - математическое ожидание времени восстановления работоспособного состояния объекта после отказа. Время восстановления отсчитывают либо непрерывно с начала выполнения восстановительных работ, либо из этого промежутка времени по определенным признакам исключают интервалы времени, не обусловленные непосредственно выполнением ремонта. В связи с этим различают общее время восстановления работоспособности и оперативное время восстановления работоспособности объекта.

*Гамма-процентное время восстановления* (gamma-percentile restoration time) - время, в течение которого восстановление работоспособности объекта будет осуществлено с вероятностью  $\gamma$ , выраженной в процентах.

*Интенсивность восстановления* ((instantaneous) restoration rate) - условная плотность вероятности восстановления работоспособного состояния объекта, определенная для рассматриваемого момента времени при условии, что до этого момента восстановление не было завершено:

$$\mu(t) = \frac{df_B(t)}{Q_B(t)} \quad (16.7)$$

Вероятность того, что отказ изделия будет устранен в интервале  $t + \Delta t$  (используя формулу условной вероятности):

$$P_B(t, t + \Delta t) = P_B\left(\frac{T_B \leq t + \Delta t}{T_B > t}\right) = \frac{P_B(t < T_B \leq t + \Delta t)}{Q_B(t)} = \frac{P_B(t + \Delta t) - P_B(t)}{Q_B(t)} \quad (16.8)$$

Умножим числитель и знаменатель на  $\Delta t$ :

$$P_B(t, t + \Delta t) = \left(\frac{P_B(t + \Delta t) - P_B(t)\Delta t}{Q_B(t)\Delta t}\right) \quad (16.9)$$

При малом  $\Delta t$ :  $\frac{P_B(t + \Delta t) - P_B(t)\Delta t}{\Delta t} = f_B(t)$  (16.10)

Следовательно:  $P_B(t, t + \Delta t) = \frac{f_B(t)\Delta t}{Q_B(t)}$  (16.11)

Введем обозначение  $\mu(t) = \frac{df_B(t)}{Q_B(t)}$  тогда  $P_B(t, t + \Delta t) = \mu(t)\Delta t$  (16.12)

Таким образом, вероятность восстановления в интервале равна интенсивности восстановления, умноженной на длительность данного интервала.

*Средняя трудоемкость восстановления* (mean restoration man-hours, mean maintenance man-hours) - математическое ожидание трудоемкости восстановления объекта после отказа.

Затраты времени и труда при восстановлении определяются в заданных условиях выполнения операций технического обслуживания и ремонта в части организации, технологии, материально-технического обеспечения, квалификации персонала и т. п.

Вероятностными характеристиками потока отказов являются:

*среднее число отказов  $Q(t)$*  (mean failure intensity) - математическое ожидание числа отказов за время  $t$ :

$$Q(t) = M[r(t)] \quad (16.13)$$

где  $r(t)$  - число отказов за время.

*параметр потока отказов* (failure intensity) - отношение математического ожидания числа отказов восстанавливаемого объекта за достаточно малую его наработку к значению этой наработки:

$$\omega(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{M[r(t+\Delta t)] - M[r(t)]}{\Delta t} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{M[r(t+\Delta t)] - M[r(t)]}{\Delta t} = \frac{d[\Omega(t)]}{dt} \quad (16.14)$$

Из формулы следует, что параметр потока отказов также равен производной по времени от среднего числа отказов.

*Средняя наработка на отказ* (mean operating time between failures) — отношение суммарной наработки восстанавливаемого объекта к математическому ожиданию числа его отказов в течение этой наработки:

$$T_{н.о} = \frac{1}{\omega(t)} \quad (16.15)$$

Если после каждого отказа объект восстанавливается до первоначального состояния, то средняя наработка на отказ равна средней наработке до отказа. В общем случае средняя наработка на отказ зависит от времени эксплуатации  $t$  и степени восстановления объекта и, как правило, уменьшается с течением времени.

## Контрольные вопросы

1. Дайте определение понятия сохраняемости машины.
2. Назовите виды хранения машин.
3. Назовите оценочные показатели сохраняемости.
4. В чем физический смысл гамма-процентного срока сохраняемости?
5. Как определяется параметр гамма-процентного срока сохраняемости при применении закона нормального распределения?
6. Каким образом оценивается сохраняемость технических систем?
7. Как воздействует коррозия на снижения ресурса машины и ее элементов?
8. В чем различие восстанавливаемого объекта от невосстанавливаемого?
9. Что является важным показателем для восстанавливаемых объектов?
10. Что означает вероятность восстановления?
11. Как определяется вероятность невыполнения ремонта в заданное время?
12. Как определяется плотность вероятности времени восстановления?
13. Что такое среднее время восстановления?
14. Что такое гамма-процентное время восстановления?
15. Что такое интенсивность восстановления?
16. Что такое средняя трудоемкость восстановления?
17. Как определяется среднее число отказов?
18. Как определяется параметр потока отказов?

## Глава 17. Комплексные показатели надежности

Комплексные показатели надежности характеризуют несколько свойств, составляющих надежность изделия. В основном, их используют при оценке надежности ремонтируемых объектов. В качестве комплексных показателей надежности используются соответствующие коэффициенты. Их четыре:

- коэффициент технического использования  $K_{Т.и.}$ ; - коэффициент готовности  $K_{Г.}$ ; - коэффициент оперативной готовности  $K_{о.г.}$ ; - коэффициент сохранения эффективности  $K_{с.эф.}$

*Коэффициент технического использования*  $K_{Т.и.}$  согласно ГОСТ 27.002 определяется как отношение математического ожидания суммарного времени пребывания объекта в работоспособном состоянии за некоторый период эксплуатации к математическому ожиданию суммарного времени пребывания объекта в работоспособном состоянии и простоев, обусловленных техническим обслуживанием и ремонтом за тот же период. Другими словами, коэффициент технического использования характеризует долю времени нахождения объекта в рабочем состоянии с учетом простоя на проведение технических обслуживаний, устранение отказов и ремонта. Данный коэффициент для единичного объекта определяется согласно выражения:

$$K_{Т.и.} = \frac{T_{сум}}{T_{сум} + \sum T_{Т.о.} + \sum T_{отк} + T_{рем}}, \quad (17.1)$$

где  $T_{сум}$ —суммарное время нахождения объекта в работоспособном состоянии,  $\sum T_{Т.о.}$  – суммарное время нахождения объекта при проведении технического обслуживания,  $\sum T_{отк.}$  – суммарное время нахождения объекта при устранения эксплуатационных отказов,  $T_{рем}$  – время нахождения объекта в ремонте.

При эксплуатации однотипных машин определяется среднее значение данного коэффициента, которое находится из выражения:

$$K_{Т.и.}^{ср} = \frac{1}{N} \cdot \sum_{j=1}^N \frac{T_{сум(i)}}{T_{сум(i)} + T_{Т.о.(i)} + T_{отк(i)} + T_{рем(i)}}, \quad (17.2)$$

где  $T_{сум(i)}$  – суммарная продолжительность работы  $i$  –ой машины за ее межремонтный период,  $T_{Т.о.(i)}$ ,  $T_{отк.(i)}$ ,  $T_{рем(i)}$  – суммарная продолжитель-

ность простоев  $i$  – ой машины за ее межремонтный период соответственно на проведение технического обслуживания, устранение эксплуатационных отказов и ремонт,  $N$  – число эксплуатируемых машин.

Коэффициент технического использования кроме оценки безотказности машины (наработка на отказ) характеризует и уровень ремонтпригодности машины. Для транспортных и технологических машин данный коэффициент колеблется в пределах от 0,6 до 0,85, что свидетельствует о недостаточном уровне их ремонтпригодности – малых значений коэффициента доступности  $K_d$ , коэффициента легкосъемности  $K_{л.}$ , взаимозаменяемости  $K_v$  и других.

На величину коэффициента  $K_{т. и.}$  влияет не только уровень надежности машины, но и система организации проведения технических обслуживаний (ТО) и ремонта в эксплуатирующей организации – вопросы применения современного оборудования при проведении ТО и ремонта, наличия запасных частей, квалификации ремонтников и т.д. Так, применение агрегатного метода ремонта значительно повышает величину данного коэффициента.

Коэффициент технического использования можно условно считать как "коэффициент работоспособности" машины. Если  $K_{т. и.}$  машины равен 0,7, то это значит, что время нахождения машины в работоспособном состоянии составит 70% и 30% времени в период ее эксплуатации будет потрачено на проведение устранения отказов, технических обслуживаний и ремонта. При эксплуатации парка однотипных машин величина коэффициента технического использования определяет количество гарантировано работающих машин. Так, если в организации используется 15 бульдозеров, у которых  $K_{т.и.} = 0,6$ , то можно считать, что в заданный период времени гарантированно будут работать только 9 из них.

*Коэффициент готовности*  $K_r$  – вероятность того, что объект окажется в работоспособном состоянии в произвольный момент времени, кроме планируемых периодов, в течение которых применение объекта по назначению не предусматривается.

Коэффициент готовности машины характеризует ее готовность к применению. Этот показатель одновременно оценит свойства работоспособности и ремонтпригодности объекта.

Величина коэффициента готовности определяется как:

$$K_{\Gamma} = \frac{N_{\text{ср}}^{\text{от}}}{N_{\text{ср}}^{\text{от}} + T_{\text{ср}}^{\text{в}}} \quad (17.3)$$

где  $N_{\text{ср}}^{\text{от}}$  – средняя наработка на отказ (в часах),  $T_{\text{ср}}^{\text{в}}$  – среднее время восстановления эксплуатационного отказа (ч).

Планируемыми периодами, в течение которых применение объекта по назначению не предусматривается, является время простоя объекта на технические обслуживания (ежесменные и плановые), ремонт, хранение, транспортировку. При определении величины коэффициента готовности учитывается только оперативное время устранения отказа.

*Коэффициент оперативной готовности*  $K_{\text{о.г}}$  – вероятность того, что объект окажется в работоспособном состоянии в произвольный момент времени, кроме планируемых периодов, в течение которых применение объекта по назначению не предусматривается, и, начиная с этого момента, будет работать безотказно в течение заданного интервала времени.

Коэффициент оперативной готовности определяется из выражения:

$$K_{\text{о.г.}} = K_{\Gamma} \cdot P(t_0, t_1) \quad (17.4)$$

где  $P(t_0, t_1)$  – вероятность безотказной работы объекта в интервале  $(t_0, t_1)$ .

$t_0$  – момент времени, с которого возникает необходимость применения объекта по назначению,  $t_1$  – момент времени, когда применение объекта по назначению прекращается.

*Коэффициент сохранения эффективности*  $K_{\text{с.эф.}}$  – отношение значения показателя эффективности использования объекта по назначению за определенную продолжительность эксплуатации к номинальному значению этого показателя, вычисленному при условии, что отказы объекта в течение того же периода не возникают.

*Приработка* – интервал характеризуется повышенным уровнем отказов, большой интенсивностью отказов, которая с течением времени уменьшается.

*Износ* – при этом процессе уровень отказов возрастет, интенсивность отказов растет с течением времени.

#### Контрольные вопросы.

1. Что характеризуют комплексные показатели надежности?
2. Как определяется коэффициент технического использования?
3. Как еще можно считать коэффициент технического использования?
4. Как определить коэффициент готовности?
5. Что такое коэффициент оперативной готовности?
6. Что такое коэффициент сохранения эффективности?
7. Для чего необходима приработка?
8. Что такое износ?
9. Что характеризует коэффициент готовности машины?
10. Как определяется среднее значение коэффициента технического использования при эксплуатации однотипных машин?

## Глава 18. Надежность сложной системы

### 18.1. Структурная схема надежности

Сельскохозяйственные транспортные и технологические машины являются *сложными системами*, состоящими из отдельных агрегатов, узлов и деталей. Под сложной системой понимают такую машину, которую можно расчленить на *элементы*, каждый из которых выполняет определенные функции и находится во взаимодействии с другими элементами системы.

При определении надежности сложного изделия первоначальным этапом решения данной задачи является расчленение такого изделия на составляющие элементы так, чтобы *отказ* одного элемента *не должен изменять надежность* других. На втором этапе определяется надежность каждого элемента. С учетом имеющегося опыта целесообразно расчленять изделие на подсистемы, подсистемы на агрегаты, агрегаты на узлы и узлы на детали.

Например, типичными подсистемами транспортных и технологических машин могут быть: - силовая установка с трансмиссией; - рабочее оборудование; - система управления; - гидравлическая и электрическая системы; - навесная, прицепная системы и другие.

Подсистема – силовая установка с трансмиссией – состоит из агрегатов, которыми являются двигатель, коробка перемены передач, задний мост, передний мост, привод рабочего органа.

В теории надежности существует понятие *структурная схема* взаимосвязи элементов между собой. В конструкциях машин структурных схем взаимосвязи элементов машины между собой может быть три:

1. *Последовательное соединение элементов*. При последовательном соединении элементов системы (изделия) отказ одного элемента выводит из строя все изделие (систему) (рис.18.1).

Последовательное соединение элементов по структурной схеме надежности наблюдается большей частью в *механических* системах. Например, выход из строя двигателя приводит к потере работоспособности всей машины.

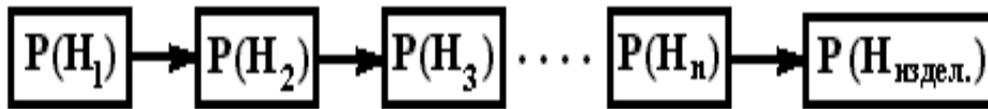


Рис. 18.1. Последовательное соединение элементов машины  
 $P(H_i)$  - вероятность безотказной работы  $i$ -го элемента.

2. *Параллельное соединение элементов.* При параллельном соединении элементов *отказ* одного элемента или нескольких элементов *не выводит* из строя все изделие. В неработоспособное состояние изделие переходит при отказе всех элементов (рис.18.2).

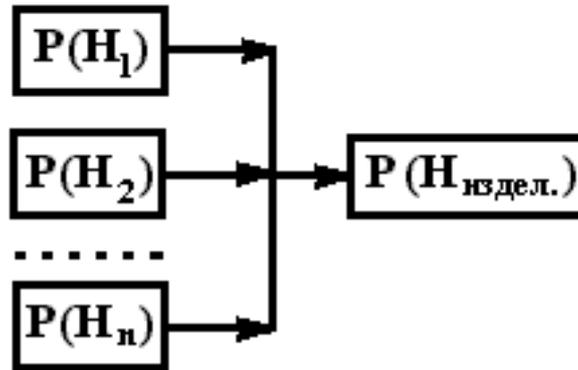


Рис. 18.2. Параллельное соединение элементов машины

3. *Смешанное соединение* (рис.18.3).

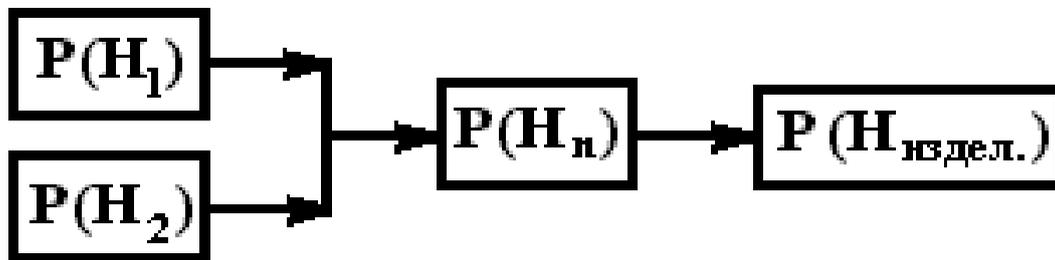


Рис. 18.3. Смешанное соединение элементов машины

Параллельное и смешанное соединения по структурной схеме надежности применяются чаще в *гидравлических* и *электрических* системах.

Надо отметить, что структурная схема надежности машины и конструктивная схема соединения составляющих элементов машины могут совпадать, а могут отличаться. Например, приведенная на рис.18.4 структурная схема надежности, совпадает с конструктивной схемой расположения 2-х параллельных фильтров при засоре одного из фильтров и не совпадает при разрыве фильтрующих элементов одного из фильтров.

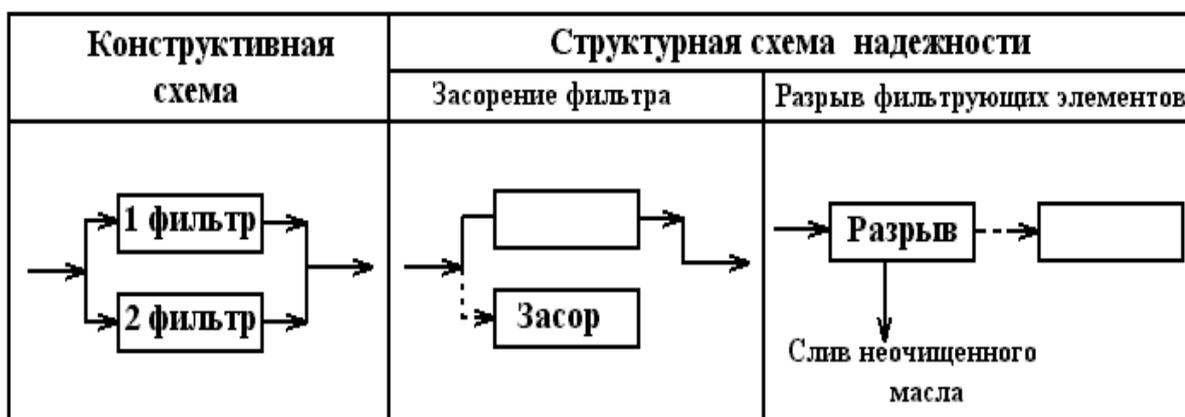


Рис. 18.4. Структурная схема надежности

## 18.2. Определение безотказной работы системы (изделия)

При последовательном соединении элементов изделия вероятность работы данного изделия, согласно формуле умножения вероятностей независимых событий, равна произведению вероятностей безотказной работы ее каждого элемента:

$$P(H)_{\text{изд}} = P_1(H) \cdot P_2(H) \cdot P_3(H) \cdot \dots \cdot P_n(H) = \prod_{i=1}^n P_i(H) \quad (18.1)$$

Например, по структурной схеме надежности конструкция трактора состоит из следующих последовательно соединенных укрупненных элементов: двигатель – трансмиссия – задний мост – ходовая тележка. Предположим, что вероятность безотказной работы была принята для двигателя  $P_{\text{дв}} = 0,98$ , трансмиссии  $P_{\text{тр}} = 0,96$ , заднего моста  $P_{\text{з.м}} = 0,88$  и ходовой тележки  $P_{\text{х.т}} = 0,80$ . Тогда вероятность безотказной работы трактора составит:

$$P_{\text{трак}} = 0,98 \cdot 0,96 \cdot 0,88 \cdot 0,80 = 0,66$$

По нормативно-технической документации вероятность безотказной работы трактора должна быть не менее 0,85. Следовательно, необходимо повысить надежность заднего моста и ходовой тележки. Предположим, что вероятность безотказной работы заднего моста будет доведена до 0,96. Тогда вероятность безотказной работы ходовой тележки должна быть не менее 0,94.

$$P_{\text{тр}} = 0,98 \cdot 0,96 \cdot 0,96 \cdot 0,94 = 0,85$$

При одинаковой надежности элементов можно записать:

$$P(H)_{\text{изд}} = P_i(H)^n \quad (18.2)$$

Сложные изделия, состоящие из элементов высокой надежности, могут обладать низкой надежностью за счет *большого числа* элементов. Например, узел состоит 10 деталей, вероятность безотказной работы каждой детали за заданный срок работы составляет 0,95.

Вероятность безотказной работы узла составит:

$$P(H) = (0,95)^{10} = 0,6$$

По уравнению 18.1 определяют безотказность работы изделия с *внезапными отказами* ее элементов. Для изделий с постепенными отказами использование этой формулы дает заниженное значение вероятности безотказной работы изделия.

Поэтому вероятность безотказной работы изделия с *постепенными отказами* необходимо характеризовать величиной безотказной работы наихудшего элемента изделия, т.е

$$P_{\text{изд.}}(H) = P_{\text{min}}(H) \quad (18.3)$$

где  $P_{\text{min}}(H)$  – вероятность безотказной работы наихудшего элемента изделия.

Для наихудшего элемента изделия (узла или агрегата) вероятность безотказной работы его необходимо определять по формуле 18.1.

Чаще всего при эксплуатации машин эксплуатационников интересует не показатель вероятности безотказной работы машины а *вероятность ее отказа* ( $F$ ). Так как данное событие противоположно событию безотказной работы ( $P$ ), то согласно теории надежности:

$$F = 1 - P \quad (18.4)$$

Вероятность отказа системы (изделия) из параллельно соединенных элементов (рис. 18.2) определяется по формуле:

$$F_n(H) = \prod_{i=1}^n F_i(H) \quad (18.5)$$

где  $n$  – число элементов в системе (изделии).

Вероятность безотказной работы такой системы (изделия) определяется по следующей формуле:

$$P(H)_{\text{изд}} = 1 - F(H)_{\text{изд}} = 1 - \prod_{i=1}^n F_i(H) = 1 - \prod_{i=1}^n [1 - P_i(H)] \quad (18.6)$$

*Пример 1.* Определить вероятности безотказной работы 2-х машин, состоящих из 3-х агрегатов. В первой машине агрегаты соединены *последовательно*, во второй – *параллельно* по структурной схеме надежности. Вероятность безотказной работы 1-го агрегата , 0,92, второго агрегата – 0,88 и у третьего агрегата – 0,8.

Вероятность безотказной работы первой машины составляет:

$$P_{\text{маш.1}} = P_1(H) \cdot P_2(H) \cdot P_3(H) = 0,92 \cdot 0,88 \cdot 0,81 = 0,66$$

Вероятность безотказной работы второй машины составляет:

$$P_{\text{маш.2}} = 1 - [(1 - 0,92) \cdot (1 - 0,88) \cdot (1 - 0,81)] = 0,998$$

Из этого примера можно сделать следующие выводы:

- 1) параллельное соединение элементов системы по структурной схеме надежности повышает надежность системы;
- 2) вероятность безотказной работы системы с последовательно соединенными элементами ниже наихудшего элемента ( $P_3(H)$ ) системы;
- 3) вероятность безотказной работы системы с параллельным соединением элементов выше лучшего элемента ( $P_1(H)$ ).

*Пример 2.* Определить вероятность безотказной работы машины, структурная схема надежности которой, представлена на рис. 18.5. Вероятность безотказной работы 1-го элемента  $P_1 = 0,85$  и далее соответственно  $P_2 = 0,96$ ,  $P_3 = 0,72$ ,  $P_4 = 0,80$ ,  $P_5 = P_6 = P_7 = 0,76$ ,  $P_8 = 0,91$ ,  $P_9 = P_{10} = 0,95$ . Выявить, соответствует ли вероятность безотказной работы отдельных элементов, если вероятность безотказной работы машины должна составлять не менее 0,8.

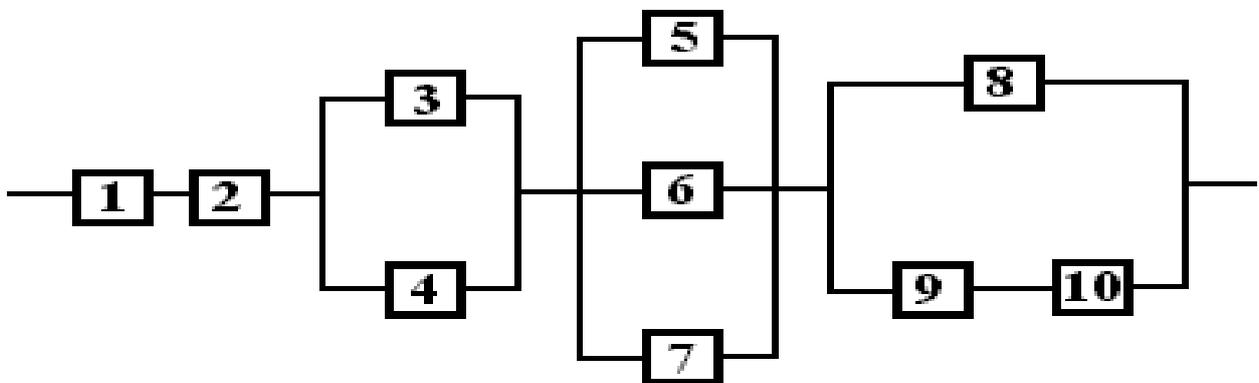


Рис. 18.5. Структурная схема надежности безотказной работы машины

Вероятность безотказной работы данной машины составит:

$$P_{\text{маш}} = P_1 \cdot P_2 [1 - (1 - P_3) \cdot (1 - P_4)] \cdot [1 - (1 - P_5) \cdot (1 - P_6) \cdot (1 - P_7)] \times [1 - (1 - P_8) \cdot (1 - P_9 \cdot P_{10})] = 0,75$$

Таким образом, при данных значениях вероятности безотказной работы отдельных элементов машины безотказность работы самой машины не соответствует нормативному заданию. Если увеличить вероятность безотказной работы первого элемента до 0,96, а у элементов  $P_5$ ,  $P_6$  и  $P_7$  повысить до 0,8, то  $P_{\text{маш}}$  составит 0,86, т.е. заданный норматив на безотказность работы данной машины будет выполнен.

### 18.3. Резервирование ненадежных элементов системы (изделия)

При недостаточном уровне надежности изделия определяют пути ее повышения:

- а) изменением конструкции ненадежных элементов;
- б) применение более прочных и износостойких материалов при изготовлении деталей;
- в) улучшение качества технологических процессов изготовления деталей и технологии их сборки;
- г) введение резервирования (дублирования) ненадежных элементов.

Резервирование малонадежных элементов резко повышает надежность изделия. Существуют два вида резервирования малонадежных элементов:

- а) с применением нагруженных резервных элементов (рис. 18.6 а),
- б) с применением ненагруженных резервных элементов



а)

Рис.18.6, а. Нагруженный резервный элемент



б)

Рис. 18.6, б. Ненагруженный резервный элемент

*Нагруженные резервные элементы* – такие элементы, когда они *постоянно* присоединены к основным и находятся в одинаковом с ними режиме работы.

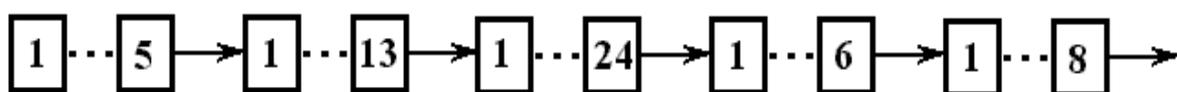
Например, у автомобиля раздельная система тормозов на передние и задние колеса и сдвоенные задние колеса, применение двух масляных фильтров и установка двух клапанных пружин у двигателей, многокатковая система у гусеничных машин и др. Так как резервный элемент работает одновременно с основным элементом, то его ресурс также как и у основного элемента исчерпывается в период эксплуатации.

*Ненагруженные резервные элементы* не работают до момента их введения в работу. Например, ручной тормоз автомобиля, запасное колесо и т.д.

Наиболее часто в сельскохозяйственных транспортных и технологических машинах ненагруженные резервные элементы используются *методом замещения*, т.е. функции основного элемента после его отказа передаются резервному элементу после снятия основного элемента и установки на его место резервного. При таком резервировании ресурс резервного элемента прежде временно не расходуется и вероятность безотказной работы системы повышается. Если система состоит из основного и  $n$  ненагруженных элементов, то отказ системы (изделия) наступит только тогда, когда откажет последний из  $n$  заменяемых элементов.

Рассмотрим на примере дизельного двигателя применение ненагруженных резервных элементов. В таблице 18.1 приведены данные по двигателю с разбивкой его конструктивной схемы на 5 узлов и даны значения вероятности безотказной работы деталей в узле, считая их равнопрочными.

Составим структурную схему надежности двигателя. Так как отказ любого узла вызывает отказ работы двигателя, то соединение элементов (узлов) по структурной схеме надежности последовательное.



$$P_1(H) = 0,999; P_2(H) = 0,997; P_3(H) = 0,99; P_4(H) = 0,935; P_5(H) = 0,92.$$

Таблица 18.1. Данные по двигателю.

Наименование сборочного узла	Кол-во деталей в узле	Вероятность безотказной работы детали узла $P_i(H)$
1. Блок-картер, блок цилиндров, головка блока, прокладки	5	0,999
2. Коленчатый вал, шатуны, распредвал, вкладыши коренных и шатунных подшипников	13	0,997
3. Поршни, кольца, клапаны газораспределения	24	0,980
4. Топливная аппаратура	6	0,935
5. Плунжерные пары	8	0,920

Считаем, что выход любого узла из работоспособного состояния происходит при внезапном отказе (поломка, заклинивание детали и другие причины). Тогда вероятность безотказной работы каждого узла определяется по формуле 18.2.

$$P_1 = 0,999^5 = 0,995; \quad P_2 = 0,997^{13} = 0,9617; \quad P_3 = 0,98^{24} = 0,6158;$$

$$P_4 = 0,935^6 = 0,6681; \quad P_5 = 0,92^8 = 0,5132;$$

Так как соединение узлов по структурной схеме надежности последовательное, то согласно формуле 18.1, безотказность работы двигателя будет равна:

$$P_{\text{двиг}} = 0,995 \times 0,9617 \times 0,6158 \times 0,6681 \times 0,5132 = 0,2020$$

По нормативно-технической документации вероятность безотказной работы двигателя установлена не ниже 0,8. Таким образом, необходимо резервирование узлов двигателя.

Определим минимальную величину вероятности безотказной работы каждого из 5-ти узлов двигателя (принимая условно, что они равны между собой) при вероятности безотказной работы самого двигателя  $P_{\text{двиг}}(H) = 0,8$ :

$$P_{\text{узла}}(H) = \sqrt[5]{0,8} = 0,9563$$

Следовательно, ненадежными узлами двигателя являются 3-й, 4-й и 5-й узлы. Рассмотрим вопрос резервирования отдельно каждого узла.

Для узла 3 введем 2-е резервирование, т.е. данный узел будет состоять из основного узла, установленного в двигателе и запасного узла в виде запчастей (комплект поршней, колец, клапанов).

По структурной схеме надежности соединение основного и резервного узлов будет параллельным.

Согласно формуле 18.6:

$$P_3 = 1 - (1 - 0,6158)^2 = 0,8524 < 0,9563$$

Введем 3-х кратное резервирование:

$$P_3 = 1 - (1 - 0,6158)^3 = 0,9433$$

Для узла 4 экономически нецелесообразно применение резервного узла. Тогда, считая что 4-й узел должен иметь величину безотказной работы, равной 0,9563, определим величину безотказной работы каждой детали топливной аппаратуры:

$$P_4(H) = \sqrt[6]{0,9563} = 0,993$$

Это может быть достигнуто за счет применения более прогрессивных материалов и улучшения технологии их изготовления.

Для узла 5 также введем 2-е резервирование. Тогда величина вероятности безотказной работы этого узла составит:

$$P_5(H) = 1 - (1 - 0,5132)^2 = 0,763 \text{ значительно } < 0,9563$$

Введем 4-х кратное резервирование (дополнительно прилагать к двигателю в качестве запасных частей 3 комплекта плунжерных пар):

$$P_5 = 1 - (1 - 0,5132)^4 = 0,9438$$

Подсчитаем величину вероятности безотказной работы двигателя с учетом 3-х кратного резервирования 3-го узла, повышения надежности работы деталей 4-го узла и 4-х кратного резервирования 5-го узла:

$$P_{\text{двиг}} = 0,995 \times 0,9617 \times 0,9433 \times 0,9563 \times 0,9438 = 0,815$$

что превышает нормативное значение.

## Контрольные вопросы

1. Что такое структурная схема надежности элементов машины?
2. Чем структурная схема надежности отличается от конструктивной схемы элементов машины между собой?
3. Может ли совпадать конструктивная схема со структурной схемой надежности?
4. В чем сущность структурной схемы надежности последовательного соединения элементов машины между собой?
5. Как влияет количество элементов узла машины при одинаковой надежности каждого элемента?
6. Влияет ли на повышение надежности машины параллельное соединение элементов машины по структурной схеме надежности?
7. Какие пути повышения надежности машины?
8. Что такое нагруженный резервный элемент?
9. Приведите примеры ненагруженного резервного элемента.
10. Сколько нагруженных резервных элементов вы можете назвать у трактора Т402.01?
11. Запасные части считаются ненагруженными резервными элементами машины?

## **Глава 19. Работоспособность основных сборочных единиц технических систем и транспортно – технологических машин.**

### **19.1. Двигатель внутреннего сгорания**

Условия эксплуатации двигателя внутреннего сгорания машин характеризуются переменными нагрузочным и скоростным режимами работы, высокой запыленностью и большими колебаниями температуры окружающего воздуха, а также тряской и вибрацией во время работы. Эти условия и определяют долговечность двигателя.

Температурный режим работы силовой установки зависит от температуры окружающего воздуха.

Конструкция двигателя должна обеспечивать нормальный эксплуатационный режим работы при температуре окружающего воздуха (+ 50)...(- 40)° С.

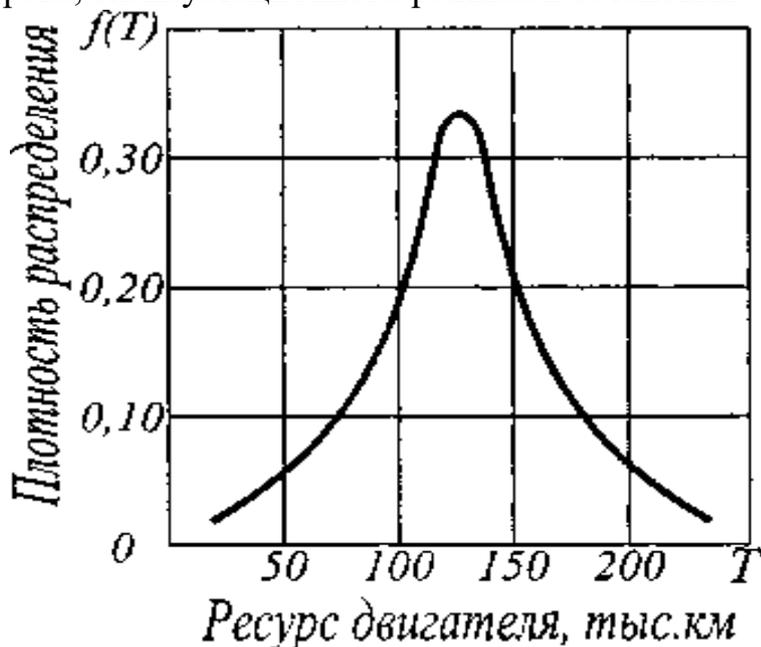
Высокая запыленность воздуха характерна для условий работы машин большинства типов. Ее оценивают количеством пылевых частиц в единице объема воздуха, г/м<sup>3</sup>.

Интенсивность тряски и вибрации при работе машин оценивают частотой и амплитудой колебаний. Эти явления вызывают повышение износа деталей, ослабление креплений, подтекания горюче-смазочных материалов и т. п.

Основным количественным показателем работоспособности двигателя внутреннего сгорания является его ресурс. Значение ресурса двигателя колеблется в широких пределах (рис. 19.1). Это свидетельствует о большом влиянии условий эксплуатации на работоспособность ДВС. Следует отметить, что выход из строя двигателя является наиболее частой причиной отказов машин. При этом большая часть отказов характеризуется эксплуатационными причинами: резким превышением нагрузки допустимых пределов; применением загрязненных масел и топлива и др. Режим работы двигателя характеризуется развиваемой мощностью, частотой вращения коленчатого вала, рабочими температурами масла и охлаждающей жидкости. Для каждой конструкции двигателя существуют оптимальные значения этих показателей, при которых эффективность

использования и долговечность двигателей будут максимальными.

Резко отклоняются значения показателей при пуске, прогреве и остановке двигателя. Поэтому с точки зрения обеспечения его работоспособности необходимо соблюдать параметры использования двигателей на этапах пуска, прогрева, эксплуатационного режима и остановки.



Пуск двигателя обусловлен нагревом воздуха в цилиндрах в конце такта сжатия до температуры  $t_c$  не ниже температуры самовоспламенения топлива  $t_m$ . Обычно считается, что  $t_c = t_m + 100$  °С. Известно, что  $t_m = 250...300$  °С. Тогда условие пуска двигателя  $I_m = 350...400$  °С.

Рис. 19.1. Колебания значения ресурса двигателя.

Частота вращения коленчатого вала должна быть достаточно велика. В противном случае значительная часть тепла, выделившегося при сжатии воздуха, передается через стенки цилиндров охлаждающей жидкости. Важное значение в обеспечении надежного пуска имеет техническое состояние двигателя. С увеличением износа и зазора в цилиндро-поршневой группе снижается давление воздуха в конце такта сжатия и повышается пусковая частота вращения вала двигателя, т. е. минимальная частота вращения коленчатого вала, при которой возможен надежный пуск.

Существенно влияет на возможность пуска наличие масла на стенках цилиндров. Масло способствует герметизации цилиндра значительно снижает износ его стенок. Принудительная подача масла до пуска снижает износ цилиндров во время пуска в 7 раз, поршней - 2 раза, поршневых колец - в 1,8 раза.

Зависимость скорости изнашивания элементов двигателя от времени работы после пуска приведена на рис. 19.2.

Как видно из рисунка, в течение 1...2 мин после пуска износ много раз превышает установившееся значение на эксплуатационных режимах. Это объясняется плохими условиями смазки поверхностей в начальный период работы двигателя.

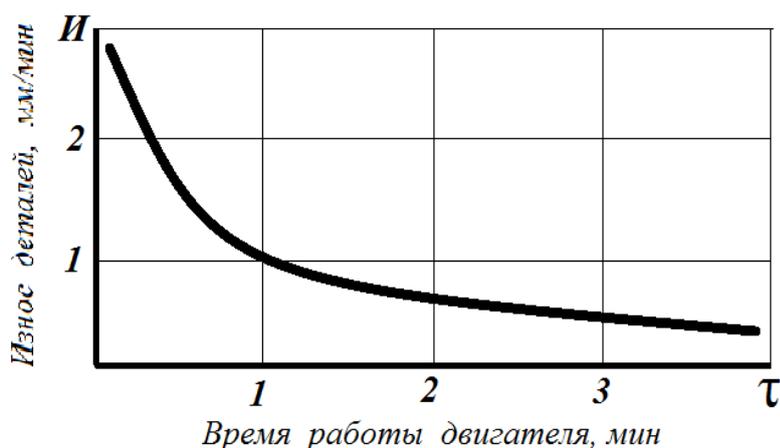


Рис. 19.2. Характер изменения износа деталей двигателя после пуска.

Таким образом, для обеспечения надежного пуска при положительных температурах, минимального износа элементов двигателя и работоспособности необходимо при эксплуатации соблюдать следующие правила:

вила:

- перед пуском обеспечить подачу масла на трущиеся поверхности (прокачать масло, прокрутить коленчатый вал стартером или вручную без подачи топлива);
- во время пуска двигателя обеспечить максимальную подачу топлива и немедленное уменьшение ее после пуска до подачи холостого хода;
- при температурах ниже 5°С нельзя пускать двигатель без предварительного его разогрева.

Прогрев двигателя характеризуется работой его без нагрузки с постепенным повышением температуры до эксплуатационных значений (80...90°С).

На износ влияет количество масла, поступающего на трущиеся поверхности, которое определяется подачей масляного насоса двигателя.

Для безаварийной работы двигателя температура масла должна быть не ниже нуля градусов при частоте вращения коленчатого вала 900 об/мин и более. При более низких температурах количество масла будет недостаточным, в результате чего не исключено повреждение поверхностей трения (подплавление подшипников, задиры цилиндров).

При температуре масла 10°С частота вращения вала двигателя не должна

превышать 1200 об/мин, а при  $t_m = 20^\circ\text{C}$  частота вращения вала должна быть равна или меньше 1550 об/мин. На любых скоростных и нагрузочных режимах рассматриваемый двигатель может работать без повышенных износов при температуре  $t_m = 50^\circ\text{C}$ . Таким образом, двигатель должен прогреваться при постепенном увеличении частоты вращения вала по мере повышения температуры масла.

Износостойкость элементов двигателя в нагрузочном режиме оценивают по скорости изнашивания основных деталей при постоянной частоте вращения и переменной подаче топлива или переменном открытии дроссельной заслонки.

С повышением нагрузок абсолютное значение износа наиболее ответственных деталей, определяющих ресурс двигателя, увеличивается. Одновременно снижается эффективность использования машины. Поэтому для определения оптимального нагрузочного режима работы двигателя следует рассматривать не абсолютные, а удельные значения износов.

Расход ресурса двигателя как по износным показателям, так и по показателям топливной экономичности на режимах малых нагрузок является экономически невыгодным. Вместе с тем при завышенной подаче топлива наблюдается резкое повышение показателей изнашивания и сокращение ресурса двигателей (на 25...30 %).

Аналогичные зависимости справедливы для двигателей различных конструкций, что свидетельствует об общей закономерности и целесообразности использования двигателей на нагрузочных режимах, близких к максимальным значениям.

В различных скоростных режимах износостойкость элементов двигателей оценивается изменением частоты вращения коленчатого вала при постоянной подаче топлива насосом высокого давления (у дизелей) или при постоянном положении дроссельной заслонки (у карбюраторных двигателей).

Изменение скоростного режима влияет на процессы смесеобразования и сгорания, а также на механические и температурные нагрузки на детали двигателя.

Изменение удельного износа опор коленчатого вала в зависимости от частоты

ты его вращения такое же, как и для цилиндропоршневой группы. Минимальный износ имеет место в диапазоне 1400... 1700 об/мин и составляет 70...80 % износа при максимальной частоте вращения.

Повышенный износ на большой частоте вращения объясняется увеличением давлений на опоры и повышением температуры рабочих поверхностей и смазочного материала, на малой частоте вращения -ухудшением условий работы масляного клина в опоре.

Таким образом, для каждой конструкции двигателя существует оптимально-скоростной режим, при котором удельный износ основных элементов будет минимальным, а работоспособность двигателя максимальной.

Температурный режим работы двигателя в эксплуатации обычно оценивают по температуре охлаждающей жидкости или масла.

Суммарный износ двигателя зависит от температуры охлаждающей жидкости (рис. 19.3). График показывает, что существует оптимальный режим температуры охлаждающей жидкости (70...90°C), при котором износ двигателя будет минимальным. Перегрев двигателя вызывает понижение вязкости масла, деформацию деталей, срыв масляной пленки, что ведет к повышению износа деталей. Большое влияние на интенсивность изнашивания гильз цилиндров оказывают коррозионные процессы (рис. 19.4).

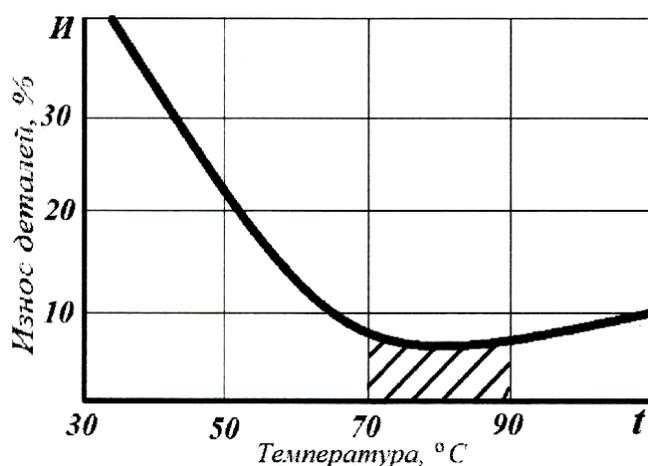


Рис. 19.3. Влияние температуры охлаждающей жидкости на износ деталей двигателя

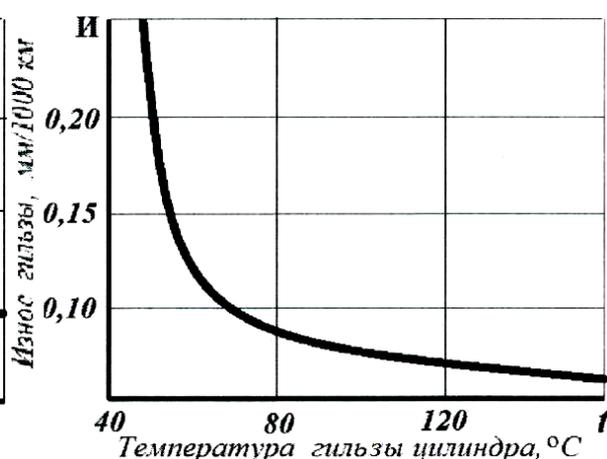


Рис. 19.4. Зависимость износа гильзы цилиндра от ее температуры

При низких температурах двигателя ( $< 70^{\circ}\text{C}$ ) отдельные участки поверхности гильз увлажняются конденсатом воды, содержащей продукты сгорания сернистых соединений и другие коррозионно-активные газы. Происходит процесс электрохимической коррозии с образованием окислов. Это способствует интенсивному коррозионно-механическому изнашиванию цилиндров. Влияние низких температур на износ двигателя можно представить следующим образом. Если принять износ при температуре масла и воды, равной  $75^{\circ}\text{C}$ , за единицу, то при  $t = 50^{\circ}\text{C}$  износ будет в 1,6 раз больше, а при  $t = 25^{\circ}\text{C}$  - в 5 раз больше.

Отсюда вытекает и одно из условий обеспечения работоспособности двигателей - работа на оптимальном температурном режиме ( $70...90^{\circ}\text{C}$ ).

На неустановившихся режимах работы двигателя износ таких деталей, как гильзы цилиндров, поршни и кольца, вкладыши коренных и шатунных подшипников, увеличивается в 1,2...1,8 раза.

Основными причинами, вызывающими увеличение интенсивности изнашивания деталей на неустановившихся режимах по сравнению с установившимися, являются повышение инерционных нагрузок, ухудшение условий работы смазки и ее очистки, нарушение нормального протекания процесса сгорания топлива. Не исключены переход от жидкостного трения к граничному с разрывом масляной пленки, а также увеличение коррозионного изнашивания.

Существенно влияет на работоспособность карбюраторного двигателя интенсивность изменения нагрузки. Изнашивания верхних компрессионных колец в 1,7 раз, а шатунных подшипников - в 1,3 раза больше, чем на установившихся режимах.

Таким образом, при эксплуатации машин необходимо обеспечивать постоянство режима работы двигателя. Если это невозможно, то переходы с одного режима на другой следует делать плавно. Это способствует повышению долговечности двигателя и элементов трансмиссии.

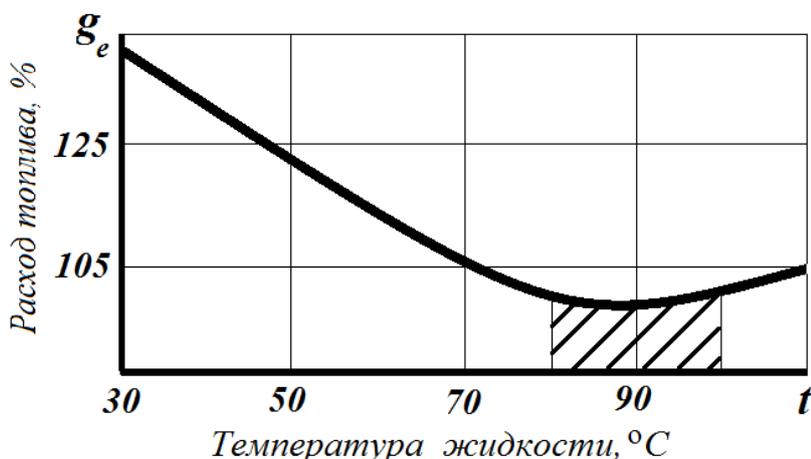
Основное влияние на работоспособность двигателя непосредственно после его остановки и при последующем пуске оказывает температура деталей, масла и охлаждающей жидкости. При высоких температурах после остановки двига-

теля смазка стекает со стенок цилиндров, что вызывает повышенный износ деталей при пуске двигателя.

После прекращения циркуляции охлаждающей жидкости в зоне высоких температур образуются паровые пробки, что ведет к деформации элементов блока цилиндров из-за неравномерного охлаждения стенок и вызывает появление трещин. Глушение перегретого двигателя ведет также к нарушению герметичности прокладки головки блока цилиндров из-за неодинакового коэффициента линейного расширения материалов блока и силовых шпилек. Во избежание указанных нарушений работоспособности рекомендуется останавливать двигатель при температуре воды не выше 70°C.

Наряду с долговечностью двигателя эффективность его использования определяется топливной экономичностью. Влияние мощностного и скоростного режимов работы двигателя на его топливную экономичность целесообразно анализировать по удельному и часовому расходу топлива на всех эксплуатационных режимах. Изменение скоростного режима больше влияет на удельный расход топлива, чем на нагрузочный.

Оптимальный скоростной режим работы по расходу топлива часто совпадает с режимом минимального износа двигателя (при  $n = 1400 \dots 1700$  об/мин). Требованиям как экономичности, так и работоспособности наиболее соответствует режим  $n = 1400 \dots 1600$  об/мин.



Аналогичные характеристики позволяют определить также оптимальные режимы работы карбюраторных двигателей. Температура двигателя влияет на удельный расход топлива

Рис. 19.5. Зависимость удельного расхода

(рис. 19.5). Как видно из

топлива от температуры охлаждающей жидкости.

рисунка, оптимальный

режим по экономичности примерно совпадает с режимом минимального изно-

са. Повышение расхода топлива при низких температурах объясняется в основном неполным его сгоранием и увеличением момента трения из-за большой вязкости масла. Повышенный нагрев двигателя сопровождается тепловыми деформациями деталей и нарушением процессов горения, что также приводит к повышенному расходу топлива. Работоспособность двигателя внутреннего сгорания обусловлены строгим соблюдением правил обкатки и рациональных режимов приработки деталей двигателя при вводе в его эксплуатацию.

В соответствии с ГОСТом серийные двигатели в начальный период эксплуатации должны пройти предварительную приработку продолжительностью до 60 ч на режимах, установленных заводом-изготовителем. Двигатели непосредственно на заводах-изготовителях и ремонтных заводах прирабатываются в течение 2...3 ч. За этот период процесс формирования поверхностного слоя деталей не завершается. В связи с этим в начальный период эксплуатации машины необходимо продолжить приработку двигателя. Например, обкатка без нагрузки нового или капитально отремонтированного двигателя трактора Т-10М составляет 3 ч, затем обкатывают машину в транспортном режиме без нагрузки в течение 5,5 ч. На последнем этапе приработки постепенно нагружают трактор при работе на различных передачах в продолжение 54 ч. Продолжительность и эффективность приработки зависят от режимов нагружения и применяемых смазочных материалов.

Работу двигателя под нагрузкой целесообразно начинать с расхода мощности  $N = 11...14,5$  кВт при частоте вращения вала 800 об/мин и, постепенно повышая, довести расход мощности до 40 кВт при номинальной частоте вращения коленчатого вала.

Наиболее эффективный смазочный материал, применяемый в процессе приработки дизелей, в настоящее время - это масло ДП-8 с присадкой 1 % объема дибензилдисульфида или дибензилгексасульфида и вязкостью 6...8 сСт при температуре 100 °С.

Значительное ускорение приработки деталей дизелей во время заводской обкатки может быть достигнуто путем применения присадки АЛП-2 к топливу.

Установлено, что путем интенсификации износа деталей цилиндропоршневой группы вследствие абразивного действия присадки можно добиться полной приработки их поверхностей и стабилизации расхода масла на угар. Заводская обкатка небольшой продолжительности (75...100 мин) с применением присадки АЛП-2 обеспечивает практически такое же качество приработки деталей, как длительная обкатка в течение 52 ч на стандартном топливе без присадки. При этом износ деталей и расход масла на угар практически одинаковы.

Присадка АЛП-2 представляет собой металлоорганическое соединение алюминия, растворенное в дизельном масле ДС-11 в соотношении 1:3. Присадка легко растворяется в дизельном топливе и отличается высокими антикоррозионными свойствами. Действие этой присадки основано на образовании в процессе сгорания мелкодисперсных твердых абразивных частиц (окиси алюминия или хрома), которые, попадая в зону трения, создают благоприятные условия приработки поверхностей деталей. Наиболее значительно влияет присадка АЛП-2 на приработку верхнего хромированного поршневого кольца, торцов первой канавки поршня и верхней части гильзы цилиндра. Учитывая высокую интенсивность изнашивания деталей цилиндропоршневой группы при обкатке двигателей с присадкой АЛП-2, необходимо при организации испытаний автоматизировать подачу топлива. Это позволит строго регламентировать подачу топлива с присадкой и тем самым исключить возможность катастрофического износа.

## **19.2. Режимы работы и работоспособность трансмиссии**

Детали трансмиссии работают в условиях высоких ударных и вибрационных нагрузок в широком диапазоне температур при повышенной влажности и значительном содержании абразивных частиц в окружающей среде. В зависимости от конструкции влияние трансмиссии на работоспособность машины изменяется в широких пределах. В лучшем случае доля отказов элементов трансмиссии составляет около 30 % общего числа отказов машины. Для тракторов время простоя, связанное с устранением отказов трансмиссии, составляет около 67 % общего времени простоев в ремонте. В порядке увеличения работоспособности

основные элементы трансмиссии машин можно распределить следующим образом:

- сцепление - 43 % от общего числа отказов трансмиссии;
- коробка передач – 35%;
- карданная передача - 16 %;
- редуктор заднего моста - 6 %.

В трансмиссии машин входят следующие основные элементы:

- фрикционные муфты сцепления; - шестеренчатые редукторы; - тормозные устройства и приводы управления.

Поэтому режимы работы и работоспособность трансмиссии удобно рассматривать применительно к каждому из перечисленных элементов.

**Фрикционные муфты сцепления.** Основными рабочими элементами муфт сцепления являются фрикционные диски (бортовые фрикционы, муфты сцепления трансмиссий машин). Высокие коэффициенты трения дисков ( $f=0,18 \dots 0,20$ ) определяют значительную работу буксования. В связи с этим механическая энергия превращается в тепловую и происходит интенсивный износ дисков. Температура деталей нередко достигает  $120 \dots 150^\circ\text{C}$ , а поверхностей дисков трения  $350 \dots 400^\circ\text{C}$ . В результате фрикционные муфты зачастую являются наименее надежным элементом силовой передачи.

Работоспособность дисков трения во многом определяется действиями оператора и зависит от качества регулировочных работ, технического состояния механизма, режимов работы и др.

**Редукторы.** Условия работы редукторов машин характеризуются высокими нагрузками. Скорость изнашивания зубьев шестерен колеблется в больших пределах. Так, например, для зубчатых колес трактора Т402.01М она составляет  $0,18 \dots 2,4$  мкм/ч. Предельным износом зубьев шестерен считается  $0,12 \dots 0,3$  модуля.

На валах редукторов наиболее интенсивно изнашиваются места подвижного соединения валов с подшипниками скольжения (шейки), а также шлицевые участки валов. Для подшипников качения скорость изнашивания составляет  $0,015 \dots 0,02$  мкм/ч, а для подшипников скольжения  $0,09 \dots 0,12$  мкм/ч.

Скорость изнашивания на шлицевых участках валов редукторов составляет 0,08...0,16 мм на 1000 ч.

Основными причинами повышенного износа деталей редукторов являются следующие:

- для зубьев шестерен и подшипников скольжения - наличие абразива и усталостное выкрашивание (питтинг);
- для шеек валов и уплотнительных устройств - наличие абразива;
- для шлицевых участков валов - пластическое деформирование.

Средние сроки службы зубчатых колес составляют 4000...6000 ч.

Интенсивность износа редукторов зависит от следующих эксплуатационных факторов: скоростного, нагрузочного, температурного режимов работы, а также от качества смазочного материала и наличия абразивных частиц в окружающей среде. Одним из основных факторов, определяющих контактные напряжения в зацеплении, является качество сборки механизма. Косвенной характеристикой контактных напряжений могут служить размеры пятна контакта зубьев.

Большое влияние на работоспособность зубчатых передач оказывают качество и состояние смазочных материалов. В процессе работы редукторов качество смазочных материалов ухудшается из-за их окисления и загрязнения продуктами износа и абразивными частицами, поступающими в картер из окружающей среды. Противоизносные свойства масел в процессе их использования ухудшаются. На периодичность замены масла влияют условия эксплуатации.

### **19.3. Работоспособность привода управления**

Условия работы приводов управления характеризуются высокими статическими и динамическими нагрузками, вибрацией и наличием абразива на трущихся поверхностях. В конструкции машин применены механическая, гидравлическая, а также комбинированная системы управления.

Механический привод представляет собой шарнирные соединения с тягами или другими исполнительными механизмами (зубчатыми рейками и др.).

Работоспособность таких механизмов определяется главным образом изно-

состоятельностью шарнирных соединений. Работоспособность шарнирных соединений зависит от твердости и количества абразивных частиц, а также от размеров и характера динамических нагрузок.

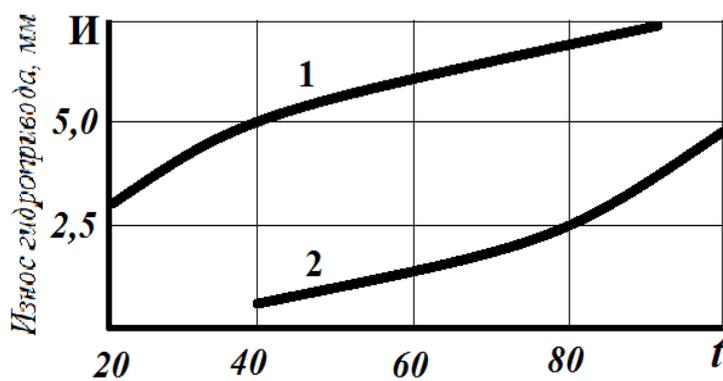
Эффективным средством увеличения работоспособности механических приводов в эксплуатации является защита шарниров от попадания абразива.

Основной причиной отказов гидросистемы является износ деталей. Интенсивность изнашивания деталей гидроприводов и их работоспособность зависят от ряда эксплуатационных факторов:

- температуры жидкости;
- степени и характера ее загрязнения;
- состояния фильтрующих устройств.

Влияние температуры на смазывающие свойства минеральных масел и износ поршня гидроцилиндра характеризуется кривыми, приведенными на рис. 19.6. Как видно из графиков, работоспособность гидросистем значительно повышается при работе в области низких температур.

С повышением температуры жидкости ускоряется также процесс окисления углеводородов и образования смолистых веществ. Эти продукты окисления,



Температура рабочей жидкости, °C

1 - при синтетической жидкости

2 - при АМГ-10

оседаая на стенках, загрязняют гидросистему, закупоривают каналы фильтров, что приводит к отказу машины. Большое число отказов гидросистемы вызвано загрязнением рабочей жидкости продуктами износа и абразивными частицами, которые вызывают повышенный износ, а в

Рис. 19.6. Износ деталей гидропривода.

некоторых случаях и заклинивание

деталей. Максимальный размер частиц, содержащихся в жидкости, определяется степенью гидропривода фильтрации.

Тонкость фильтрации жидкости в гидросистеме составляет около 40 мкм.

Наличие в гидросистеме частиц большего размера объясняется проникновением пыли через уплотнения (например, в гидроцилиндре), а также неоднородностью пор фильтрующего элемента. Интенсивность изнашивания элементов гидропривода зависит от размера загрязняющих частиц.

Значительное количество загрязняющих примесей вносится в гидросистему с доливаемым маслом. Средний эксплуатационный расход рабочей жидкости в гидросистемах машин составляет 0,025...0,05 кг/ч.

При этом с доливаемым маслом в гидросистему вносится 0,01.. 0,12 % загрязняющих примесей, что составляет 3...30 г на 25 л в зависимости от условий заправки. Инструкциями по эксплуатации рекомендуется промывка гидросистемы перед заменой рабочей жидкости. Промывают гидросистему с помощью керосина или дизельного топлива на специальных установках.

Таким образом, для увеличения работоспособности элементов гидропривода машин необходимо проведение комплекса мероприятий, направленных на обеспечение чистоты рабочей жидкости и рекомендуемого теплового режима работы гидросистемы:

- строгого соблюдения требований инструкции по эксплуатации гидросистемы;
- фильтрации масла перед заправкой гидросистемы;
- установки фильтров с тонкостью фильтрации до 15...20 мкм;
- предупреждения перегрева жидкости в процессе работы машины.

#### **19.4. Работоспособность элементов ходовой части**

По конструктивному исполнению ходовой части различают гусеничные и колесные машины. Основной причиной отказов гусеничной ходовой части является абразивный износ траков и пальцев гусениц, ведущих колес, осей и втулок катков. На интенсивность изнашивания деталей ходовой части влияет предварительное натяжение гусеничного полотна. При сильном натяжении интенсивность изнашивания повышается из-за увеличения силы трения. При слишком слабом натяжении возникает сильное биение гусеничных полотен.

Износ гусеничных цепей в большой мере зависит от условий эксплуатации

машины. Повышенный износ деталей ходовой части объясняется наличием абразива с водой в зоне трения и коррозией поверхностей деталей. Техническое состояние гусеничных полотен оценивается по износу траков и пальцев.

Основными факторами, определяющими эксплуатационные свойства колесного движителя, являются давление воздуха в шинах, схождение и развал колес. Давление в шинах влияет на работоспособность машины. Уменьшение работоспособности при пониженном давлении вызвано большими деформациями шины, перегревом ее и расслоением протектора. Избыточное давление в шинах также ведет к сокращению ее работоспособности, так как при этом возникают большие нагрузки на каркас, особенно в момент преодоления препятствия.

Отклонение величины схождения от нормы приводит к проскальзыванию элементов протектора и усиленному износу его. Увеличение угла схождения влечет за собой более интенсивный износ наружной кромки протектора, а уменьшение - внутренней. При отклонении угла развала от нормы перераспределяются давления в плоскости контакта шины с грунтом и возникает односторонний износ протектора.

### **19.5. Работоспособность электрооборудования машин**

На долю электрооборудования приходится примерно 10...20 % всех отказов машины. Наименее надежными элементами электрооборудования являются аккумуляторные батареи, генератор и релерегулятор.

Работоспособность аккумуляторных батарей зависит от таких эксплуатационных факторов, как температура электролита и сила разрядного тока. Техническое состояние батарей оценивают по их фактической емкости.

Уменьшение емкости батареи при понижении температуры объясняется повышением плотности электролита и ухудшением циркуляции его в порах активной массы пластин. Поэтому при низкой температуре окружающего воздуха необходимо утеплять батареи. Чем больше сила разрядного тока, тем большее количество электролита должно поступить внутрь пластин в единицу времени.

При большой силе разрядного тока глубина проникновения электролита в пластины уменьшается и емкость аккумуляторных батарей понижается.

Например, при силе разрядного тока 360А химическим превращениям подвергается лишь слой активной массы толщиной около 0,1мм, а емкость батареи составляет лишь 26,8 % номинального значения.

Наибольшая нагрузка на батарею имеет место при работе стартера, когда сила разрядного тока достигает 300...600 А. В связи с этим целесообразно ограничить время непрерывной работы стартера до 5 с. Существенно влияет на работоспособность батарей при низких температурах периодичность их включения. Чем меньше перерывы в работе, тем быстрее полностью разряжаются аккумуляторы. Поэтому повторное включение стартера целесообразно не раньше, чем через 30 с.

В течение срока службы емкость аккумуляторных батарей не остается постоянной. В начальный период емкость несколько увеличивается за счет разработки активной массы пластин, а затем в течение длительного периода работы остается постоянной. Снижается емкость и выходит из строя батарея из-за износа пластин. Износ пластин заключается в коррозии и деформации решеток, сульфатации пластин, выпадения активной массы из решеток и накоплении ее на дне бочка. Работоспособность аккумуляторных батарей ухудшается также вследствие их саморазрядки и понижения уровня электролита.

Саморазрядка вызывается многими факторами, способствующими образованию гальванических микроэлементов на положительно и отрицательно заряженных пластинах. В результате понижается напряжение батарей. На величину саморазрядки влияют окисление свинца катодов под действием кислорода воздуха, растворенного в верхних слоях электролита, неоднородность материала решеток и активной массы пластин, неодинаковая плотность электролита, исходная плотность его, температура электролита, а также загрязнение наружных поверхностей батарей. При температуре ниже - 5°C саморазрядка батарей практически отсутствует. С повышением температуры до + 5°C появляется саморазрядка до 0,2...0,3% емкости за сутки, а при температурах + 30°C и выше – до 1% емкости батарей. Уровень электролита понижается при высоких температурах за счет испарения воды.

Таким образом, для повышения долговечности аккумуляторных батарей в процессе их эксплуатации следует соблюдать следующие правила:

- утеплять батареи при использовании их в холодное время;
- сокращать до минимума продолжительность включения стартера с перерывами между включениями не менее 30 с;
- хранить аккумуляторные батареи при температуре около 0°C;
- строго соблюдать номинальную плотность электролита;
- исключать загрязнение наружных поверхностей аккумуляторных батарей;
- при понижении уровня электролита доливать дистиллированную воду.

Одной из основных причин выхода из строя генератора является повышение его температуры в процессе работы. Нагрев генератора зависит от конструкции и технического состояния элементов электрооборудования.

#### **19.6. Влияние эксплуатационных факторов на работоспособность технических систем**

Работоспособность сельскохозяйственных машин в процессе эксплуатации во многом зависит от ряда эксплуатационных факторов. Одним из них является качество эксплуатационных материалов.

К основным эксплуатационным материалам относятся топливо, смазочные материалы и гидравлические жидкости.

*Дизельное топливо* должно обладать определенной испаряемостью и вязкостью, иметь определенное цетановое число, а также не содержать серы и механических примесей. С повышением температуры испарения дизельного топлива увеличивается интенсивность износа деталей двигателей. Увеличение вязкости топлива ухудшает его распыл, процесс смесеобразования и сгорания, а также изнашивание прецизионных пар топливной аппаратуры. При слишком низком цетановом числе понижается воспламеняемость топлива и возрастает жесткость работы двигателя, что сопровождается высокими нагрузками и скоростью изнашивания его деталей. Излишне высокое цетановое число повышает расход топлива, увеличивает давление на выпуске и приводит к образованию нагара.

Механические примеси значительно увеличивают скорость изнашивания деталей и особенно прецизионных пар топливной аппаратуры.

Дизельное топливо должно обладать следующими свойствами:

- распыляемостью; - хорошим смесеобразованием; - испаряемостью и прокачиваемостью; - быстрой самовоспламеняемостью; - полностью сгорать, причем без дымления; - не вызывать повышенного нагаро- и лакообразования на клапанах и поршнях, закоксовывания распылителя, зависания иглы распылителя, коррозии резервуаров, баков, деталей двигателя и т. д.

На качество смесеобразования наряду с конструкцией камеры сгорания двигателя влияют свойства применяемого топлива: плотность, вязкость, давление насыщенных паров, поверхностное натяжение, фракционный состав и др.

Повышение плотности топлива сказывается на процессе смесеобразования так же, как и увеличение вязкости: возрастает длина струи, ухудшается экономичность двигателя и увеличивается дымность. При малой плотности топлива уменьшается длина струи, ухудшается процесс смесеобразования и увеличивается износ прецизионных пар насоса высокого давления, для которого топливо одновременно служит смазочным материалом. Поэтому плотность дизельного топлива должна быть оптимальной с учетом сезонности эксплуатации и других факторов и находиться в пределах при 15°C для сортов А, В, С, D, Е, F – 820–845 кг/м<sup>3</sup>, для классов 1, 2, 3, 4 – 800 – 845 кг/м<sup>3</sup>.

Причина повышенной коррозии и износов деталей двигателя – наличие в топливе сернистых соединений, органических кислот, водорастворимых кислот и щелочей. На коррозионную агрессивность дизельных топлив существенно влияют сернистые соединения. Установлено, что общий износ деталей двигателя приблизительно прямо пропорционален содержанию серы в дизельном топливе. При температуре охлаждающей жидкости в двигателе ниже 70°C возрастает степень коррозионного износа, поскольку увеличивается образование серной кислоты. Продукты сгорания топлива, содержащие сернистый и серный ангидриды, проникают через неплотности цилиндропоршневой группы в картер, где образуют с водой серную и сернистую кислоты.

Смешиваясь с маслом, кислоты ухудшают его качество, в частности антикоррозионные свойства, вызывают быстрое старение. Химическому износу подвергаются вкладыши подшипников, шейки коленчатых валов и другие детали. Особенно сильной коррозии подвержены вкладыши из свинцовистой бронзы.

В результате действия сернистых продуктов на картерное масло получают смолистые соединения, которые затем образуют нагар. При наличии сернистых соединений увеличивается нагаро- и лакообразование в цилиндропоршневой группе. Из-за содержания серы нагар становится твердым, что приводит к абразивному изнашиванию цилиндропоршневой группы. Отложение лака в зоне поршневых колец ведет к их закоксуыванию и заклиниванию. Активные сернистые соединения (элементарная сера, меркаптаны, сероводород) обладают высокой коррозионной агрессивностью, поэтому товарные топлива для ДВС не должны их содержать.

Наличие воды и механических примесей в дизельном топливе служит одной из главных причин отказов топливной аппаратуры. Вода и механические примеси могут попадать в топливо, начиная от пути следования его из нефтезавода до использования в двигателе. Большинство механических примесей имеют большую твердость и вызывают повышенный износ деталей двигателя. Особенно вредны примеси для топливных насосов высокого давления, насосов-форсунок, форсунок. В прецизионных парах зазор составляет 1,5–3 мкм, поэтому даже небольшое количество механических примесей, размер которых соизмерим с зазором плунжерных пар, вызывает их интенсивное изнашивание. При использовании засоренного топлива срок службы топливной аппаратуры сокращается в 5...6 раз.

Перед заправкой в бак машины топливо должно отстаиваться не менее 10 дней. Чистота различных слоев топлива при этом будет неодинаковой. Даже при 10-дневном отстое в нижних слоях топлива остаются мельчайшие частички механических примесей, представляющие наибольшую опасность для топливной аппаратуры. Машины необходимо заправлять топливом верхних слоев. Содержание механических примесей в дизельном топливе не допускается.

*Карбюраторное топливо* должно обладать определенной испаряемостью, детонационной стойкостью и не иметь посторонних примесей. Испаряемость бензина определяется его фракционным составом. Характерными точками фракционного состава бензина является температура испарения 10, 50 и 90% топлива. Температурой испарения 10% топлива определяется возможность легкого пуска двигателя. Чем она ниже, тем легче пуск холодного двигателя. Если эта температура меньше 60°C, то образуются паровые пробки в топливопроводах, а также засоряется кристалликами льда карбюратор. Температура испарения 50% топлива характеризует продолжительность прогрева двигателя после его пуска. Чем она выше, тем больше времени требуется на прогрев. Температура испарения 90% топлива обуславливает получение соответствующей мощности и экономичности двигателя. От них также зависит скорость изнашивания деталей цилиндропоршневой группы. Это связано с разжижением смазки и смывом масляной пленки со стенок цилиндров неиспарившейся частью бензина.

Детонационная стойкость бензина должна соответствовать конструктивным данным двигателя и обеспечивать бездетонационный режим работы. При возникновении детонации возрастают динамические нагрузки на детали цилиндропоршневой группы, резко повышается температура и ухудшается смазывание деталей, в результате чего значительно увеличивается скорость изнашивания деталей двигателя, снижаются мощность и экономичность.

Механические примеси в бензине засоряют дозирующие устройства карбюратора и увеличивают скорость изнашивания деталей шатунно-поршневой группы.

Мощность бензинового двигателя, надежность работы, его экономичность во многом зависят от качества применяемого топлива. Качество бензина зависит от его физико-химических свойств: - фракционного состава; - детонационной стойкости; - теплоты сгорания и т. д.

*Фракционный состав бензина* – один из важнейших показателей, характеризующий его качество как для экономичной, так и надежной и долговечной ра-

боты двигателя. Так, от фракционного состава бензина зависит: - запуск двигателя и время; - затрачиваемое на его прогрев; - перебои в работе двигателя, вызываемые образованием паровых пробок или обледенением карбюратора; - приемистость двигателя; расход топлива и масла; - мощность двигателя; - образование углеродистых отложений; - а также в определенной степени износ трущихся деталей.

Для характеристики фракционного состава в стандарте указываются температуры, при которых перегоняется 10, 50 и 90% бензина, а также температуры начала и конца его перегонки.

По температуре начала перегонки (для летнего бензина не ниже 35°C) и перегонки 10% бензина ( $t_{10\%}$ ) судят о наличии в нем головных (пусковых) фракций, от которых зависит легкость пуска холодного двигателя. Повышенное содержание низкокипящих фракций в бензине не всегда является положительной особенностью. В этом случае увеличивается склонность бензинов к паровым пробкам в системе топливоподачи двигателя и значительно возрастают потери бензина на испарение при хранении на нефтескладе.

После пуска двигателя интенсивность его прогрева, устойчивость работы на малой частоте вращения коленчатого вала и приемистость (интенсивность разгона автомобиля при полностью открытом дросселе) зависят главным образом от температуры перегонки 50% бензина ( $t_{50\%}$ ). Чем ниже эта температура, тем легче испаряются средние фракции бензина, обеспечивая поступление в непрогретый еще двигатель горючей смеси необходимого состава, устойчивую работу на малой частоте вращения коленчатого вала двигателя и хорошую приемистость. По температуре перегонки 90% ( $t_{90\%}$ ) и температуре конца перегонки (кипения) судят о наличии в бензине тяжелых трудноиспаряемых фракций, интенсивности и полноте сгорания рабочей смеси и мощности, развиваемой двигателем. Для обеспечения испарения всего бензина, поступающего в цилиндры двигателя, эти температуры должны быть как можно более низкими.

Концевые фракции поступают в цилиндр не испарившись, они не участвуют в сгорании, и экономичность двигателя ухудшается. Тяжелые фракции бензина,

осевшие на стенках цилиндра, смывают масло и увеличивают износ. Несгоревшее топливо откладывается на поверхностях камеры сгорания и поршней в виде нагара, который инициирует детонацию и калильное зажигание, нарушающие работу двигателя. Чем меньше  $t_{90\%}$  и  $t_{к.п.}$  бензина, тем лучше.

**Моторное масло.** Моторное масло должно надежно и длительно выполнять свои функции, обеспечивая заданный ресурс двигателя. Основные функции моторного масла в двигателях – уменьшение трения между трущимися поверхностями деталей; снижение износа трущихся поверхностей и предотвращение их заедания; охлаждение деталей; дополнительное уплотнение поршневых колец, защита деталей от коррозии и загрязнения углеродистыми отложениями.

От вязкости моторного масла при рабочих температурах в двигателе зависят качество смазывания трущихся поверхностей деталей и их износ. Вязкость моторного масла, в свою очередь, зависит от температуры, с увеличением которой она понижается, а с уменьшением – повышается. Интенсивность изменения вязкости масла при изменении температуры у разных моторных масел различна. Крутизну вязкостнотемпературной кривой оценивают по индексу вязкости. Чем выше индекс вязкости, тем лучше технико-эксплуатационные свойства моторных масел.

Очень важными эксплуатационными показателями моторного масла являются его антиокислительные и антикоррозионные свойства. Эти свойства моторных масел зависят главным образом от эффективности антикоррозионных и антиокислительных присадок, а также от состава базовых компонентов. В процессе работы масла в двигателе коррозионность значительно возрастает.

*Антикоррозионные присадки* защищают вкладыши подшипников и другие детали, выполненные из цветных металлов, образуя на их поверхности прочную защитную пленку.

*Нейтрализующая способность* – это важнейшее химическое свойство моторных масел, характеризуемое щелочным числом. Оно показывает, какое количество кислот, образующихся при окислении масла или попадающее в него из продуктов сгорания топлива, может нейтрализовать единица массы масла.

Щелочное число масла обуславливается содержанием в них моющих и диспергирующих присадок, обладающих щелочными свойствами и препятствующих отложению смолисто-асфальтовых веществ на деталях кривошипно-шатунного механизма и особенно на деталях цилиндропоршневой группы двигателей в виде лаков и нагаров.

Чем выше концентрация присадки в масле (щелочное число), тем меньше нагарообразование в двигателе. Однако концентрация присадки в масле во время работы двигателя постепенно снижается (срабатывается) и защитные свойства масла ухудшаются. Это является одним из основных признаков необходимости замены масла в двигателе.

Смазочные материалы выполняют следующие функции:

- снижение интенсивности изнашивания поверхностей трения деталей;
- предотвращение атомно-молекулярного взаимодействия материалов поверхностей трения;
- формирование на рабочих поверхностях деталей слоев оксидов, обладающих повышенной износостойкостью;
- снижение сил трения;
- равномерное распределение давления по рабочим поверхностям деталей;
- отвод теплоты из зоны трения;
- защита деталей от коррозионного воздействия окружающей среды;
- отвод продуктов изнашивания и частиц механических примесей из зоны трения;

Для масел характерна чувствительность к изменению окружающей среды (температуры, влажности и наличию абразивных частиц) и невысокий ресурс. В связи с этим для обеспечения работоспособности машин в эксплуатации необходимо контролировать состояние масел, своевременно восстанавливать их работоспособность, использовать свойства масел для восстановления формы и параметров изношенных рабочих поверхностей деталей машин.

От правильного выбора смазочного материала во многом зависит работоспособность машины, поэтому при решении задачи обеспечения надежности ма-

шин на стадиях проектирования и эксплуатации смазочные материалы надо рассматривать как самостоятельные конструктивные элементы.

В зависимости от физического состояния различают твердые, пластичные, газообразные, жидкие, смазочные материалы. Жидкие смазочные материалы (масла) при положительных температурах находятся в жидком состоянии.

Масла классифицируют по назначению и области применения:

- моторные, применяемые в двигателях внутреннего сгорания;
- автотракторные трансмиссионные, применяемые для смазывания элементов трансмиссий;

Пластичный смазочный материал представляет собой полутвердый или твердый продукт, состоящий из смеси минерального или синтетического масла, стабилизированного мылами или другими загустителями с возможным содержанием других компонентов.

Загуститель придает смазочному материалу свойства твердого тела с невысоким пределом прочности (до 5 кПа). При повышении температуры до 200...300 С<sup>0</sup> пластичные смазочные материалы переходят в жидкое состояние.

По назначению пластичные смазочные материалы делят на антифрикционные, снижающие трение и износ; - консервационные (защитные), предохраняющие металлические поверхности от коррозии; - уплотнительные, служащие для герметизации зазоров в сопряжениях.

По происхождению жидкие и пластичные смазочные материалы подразделяют на минеральные, растительные, животные и синтетические.

Минеральными называют смазочные материалы минерального происхождения, полученные смешением углеводородов в естественном состоянии или в результате обработки минеральных продуктов. Основными видами сырья для получения минеральных смазочных материалов являются нефть, каменный уголь, торф и сланцы. Растительные и животные масла получают при переработке соответственно растительного и животного происхождения. Синтетические смазочные материалы являются продуктами синтеза органических или элементо-органических соединений.

Для транспортно-технологических машин обычно применяют жидкие и пластичные смазочные материалы нефтяного происхождения. С развитием химической промышленности все шире используют синтетические смазочные материалы. Перспективны также твердые смазочные материалы, которые все шире используют в конструктивных элементах сельскохозяйственных машин.

Тип смазочного материала, его эксплуатационные свойства и режим работы сопрягаемых поверхностей определяют условия взаимодействия рабочих поверхностей при трении. Поэтому при анализе условий работы сопрягаемых поверхностей различают смазки:

- по физическому состоянию смазочного материала (жидкостная, твердая);
- по типу разделения поверхностей трения смазочным слоем (гидродинамическая, гидростатическая, газодинамическая, газостатическая, эластогидродинамическая, жидкостная, граничная, полужидкостная).

**Жидкостная** смазка - смазка, при которой полное разделение поверхностей трения деталей осуществляется жидким смазочным материалом. Эту смазку используют для некоторых типов опор скольжения, подшипников и редукторов машин.

**Твердой** называют смазку, при которой полное разделение поверхностей трения деталей, находящихся в относительном движении, осуществляется твердым смазочным материалом. Смазка этого вида в настоящее время еще не нашла широкого применения для сопряжений сельскохозяйственных машин, но является весьма перспективной.

**Гидродинамическая (газодинамическая)** смазка - это жидкостная (газовая) смазка, при которой полное разделение поверхностей трения осуществляется в результате давления, самовозникающего в слое жидкости (газа) при относительном движении поверхностей.

**Гидростатической (газостатической)** называют жидкостную (газовую) смазку, при которой полное разделение поверхностей трения деталей, находящихся в относительном движении или покое, осуществляется в результате поступления жидкости (газа) в зазор между поверхностями трения под внешним

давлением. Для этой смазки необходимы относительно сложные, дорогостоящие системы подачи смазочного материала.

**Эластогидродинамическая** смазка - это смазка, при которой характеристики трения и толщина пленки жидкого смазочного материала между двумя поверхностями, находящимися в относительном движении, обусловлены упругими свойствами материалов деталей, а также реологическими свойствами смазочного материала. Реологические свойства определяют характер течения и деформации смазочного материала, обладающего структурной вязкостью, и, таким образом, характеризуют процесс формирования смазочной пленки в зазоре.

**Граничной** называют смазку, при которой трение и износ между поверхностями, находящимися в относительном движении, обусловлены свойствами поверхностей и свойствами смазочного материала.

**Полужидкостной (смешанной)** называют смазку, при которой частично осуществляется жидкостная смазка. Таким образом, смешанная смазка занимает промежуточное положение между жидкостной и граничной смазкой.

В реальных сопряжениях при изменении режима работы (температуры, скорости или давления) происходит плавный переход от одного вида смазки к другому.

Основным свойством смазочного материала, обеспечивающим снижение сил трения, является вязкость.

**Вязкостью** называется объемное свойство газообразного, жидкого, полужидкого или полутвердого вещества оказывать сопротивление относительному перемещению слоев. Это свойство проявляется в стремлении жидкости препятствовать изменению формы поверхности детали и характеризует внутреннее трение смазочного материала.

Характер трения поверхностей деталей сопряжений и вид смазки определяются не только количеством смазочного материала и его вязкостью, но и режимом работы узла трения. В зависимости от скорости относительного перемещения рабочих поверхностей, нагрузки и соотношения этих величин в сопряжении может наблюдаться граничная, полужидкостная или жидкостная смазка.

При сравнительно легких нагрузочном и скоростном режимах работы сопряжения на поверхностях трения деталей вследствие молекулярной адсорбции образуются и прочно удерживаются тончайшие слои смазочного материала. Толщина слоя в зоне трения настолько мала, что объемные реологические свойства масла как жидкости практически не проявляются. Таким образом, создаются условия, характерные для граничной смазки. Коэффициент трения в условиях граничной смазки для металлических поверхностей приблизительно равен 0,1. Относительно высокий коэффициент трения объясняется наличием механического взаимодействия поверхностей. В таком режиме трения обычно работают опоры скольжения и некоторые элементы зубчатых передач.

При увеличении толщины слоя смазочного материала, разделяющего поверхности трения, уменьшается механическое взаимодействие выступов неровностей. При этом снижается также молекулярная составляющая силы трения. В результате наблюдается значительное уменьшение коэффициента трения и создаются условия взаимодействия поверхностей, характерные для полужидкостной смазки.

Для повышения работоспособности сопряжения необходимо стремиться к формированию условий жидкостной смазки и ее разновидностей (гидродинамической и эластогидродинамической смазки), что позволит значительно сократить энергетические затраты на преодоление сил трения и обеспечит наиболее стабильные условия взаимодействия деталей. Для сопряжений сельскохозяйственных машин наиболее характерны следующие виды смазки: гидродинамическая, эластогидродинамическая, граничная и мешанная.

*Механизм смазочного действия масел.* Минеральные масла состоят из цепных молекул, содержащих углеводородные пары нескольких типов. Их характеризует палочкообразная конфигурация молекул масла; - склонность цепных молекул к параллельной ориентации осей; - гидродинамические условия их ориентации в потоке при переходе от граничной смазки к гидродинамической.

Тонкие слои масел вследствие их свойства несжимаемости уравнивают внешнее давление. Чем больше давление, тем меньше толщина слоя масла, спо-

собного уравновесить дополнительное внешнее давление. Следовательно, толщина слоя масла характеризует потенциальные возможности смазочного материала в уравновешивании внешнего давления. Расклинивающее действие жидкости препятствует уменьшению ее слоя при увеличении давления. Установлено равновесное расклинивающее давление масел, которое зависит от их физико-механических свойств и характера контактирующих поверхностей.

Вблизи твердой поверхности детали существует электромагнитное силовое поле. Оно оказывает воздействие на молекулы смазочного материала, вызывая направленную адгезию граничных пленок масла и изменяя ориентацию его молекул. По мере удаления от поверхности детали влияние силового поля ослабевает. При этом изменяется строение смазочной пленки и восстанавливаются объемные свойства масла.

В тонких смазочных слоях на расстоянии  $0,1 \dots 0,2$  мкм от твердой поверхности вязкость масел обычно повышается вследствие изменения ориентации осей молекул. Способность смазочного материала к изменению ориентации молекул характеризует эффективность его смазочного действия.

Силовое поле вблизи поверхности детали возникает вследствие повышенной полярной активности поверхностных слоев твердого материала, вызванной неуравновешенностью атомарных сил, действующих в них.

В результате полярной активности материала на поверхности трения образуются тонкие пленки адсорбированных молекул масла. Для увеличения сил сцепления адсорбированных слоев масла с поверхностью трения в его состав вводят поверхностно-активные вещества (ПАВ):

- органические кислоты и их мыла, спирты, смолы.

Для ПАВ характерно несовпадение центров положительных и отрицательных зарядов в их молекулах. Благодаря этому свойству молекулы, называемые полярными, притягиваются к твердой поверхности и удерживаются на ней длительное время.

Молекулы масел обычно имеют удлиненную форму, причем их длина в 5 - 10 раз превышает диаметр. Конец молекулы, вступающей во взаимодействие с ме-

таллом, называют полярно-активным. У органических кислот и их мыл полярно-активной частью является карбоксильная группа  $\text{COOH}$ , у спиртов - гидроксил  $\text{OH}$ .

Различают два вида адсорбции молекул масла к покровностителя: химическую и физическую.

*Химическая* адсорбция (хемосорбция) сопровождается образованием химических соединений пленок оксидов при взаимодействии полярно-активных концов молекул масла с молекулами материала поверхности.

При *физической* адсорбции взаимодействие ограничивается формированием молекулярных связей. В большинстве случаев эти два вида адсорбции наблюдаются одновременно с преобладанием какого либо из них. Хемосорбция в отличие от физической адсорбции имеет избирательный характер и больше проявляется на участках с нарушением регулярности кристаллической решетки металла включениями и дислокациями. Под действием сил молекулярного притяжения молекулы масла приобретают определенную ориентацию, поэтому смазочная способность масла улучшается.

Молекулы масла, адсорбированные на поверхности трения, обладают способностью перемещаться. При большом числе молекул в зоне верхних слабо ориентированных и закрепленных слоев молекулы перемещаются в те зоны, где их меньше, приобретая более упорядоченную ориентацию. Подвижность молекул зависит от вида адсорбции. При хемосорбции подвижность молекул значительно ограничивается.

С повышением температуры масла межмолекулярные расстояния возрастают, молекулярные связи ослабевают, происходит дезориентация адсорбированного слоя молекул, активизируется подвижность молекул и ухудшаются смазочные свойства масла. Для различных масел нарушение адсорбции происходит при температуре  $40...150^{\circ}\text{C}$ .

При образовании на поверхности трения ультрамикроскопических трещин поверхностно-активные молекулы масла проникают внутрь этих трещин. Ширина трещин соизмерима с размерами молекул, поэтому силы молекулярного

взаимодействия оказывают на материал твердой поверхности расклинивающее действие. Давление молекул масла на стенки трещин может достигать 100 МПа.

В таких условиях смазочный материал оказывает отрицательное воздействие на процесс изнашивания. Это явление получило название *адсорбционнорасклинивающего эффекта* (эффект Ребиндера).

Академиком П.А. Ребиндером было установлено, что активные смазочные материалы повышают пластическое течение тонкого поверхностного слоя металла при трении деталей в условиях значительных давлений. В результате взаимодействия, например, жидкой смазочной среды, содержащей полярные компоненты, с материалом поверхностного слоя детали в условиях пластического деформирования может происходить разрыхление металла на поверхности. Причиной разрыхления металла является адсорбция активных молекул смазочного материала на ювенильных участках поверхности, обнажающихся при деформировании. При трении такое адсорбционное разрыхление (пластификация) поверхности вызывает снижение предела текучести материала детали в слоях толщиной до 0,1 мкм. Это облегчает приработку и снижает интенсивность изнашивания поверхностей.

В начале 1960-х г. исследование механизма взаимодействия смазочных материалов с металлами деталей в процессе трения привело к открытию *эффекта трибополимеризации*. Этот эффект заключается в том, что в процессе трения металлических поверхностей в присутствии углеводородной смазочной среды наблюдается образование аморфных высокомолекулярных продуктов, которые были названы полимерами трения.

Полимерные пленки, образующиеся на поверхностях трения, обеспечивают противозадирные и противоизносные свойства материалов.

Продукты трибополимеризации - полимеры трения — обеспечивают поверхностным слоям материалов деталей положительный градиент механических свойств, что, в свою очередь, вызывает резкое снижение интенсивности изнашивания деталей сопряжения.

В качестве смазочных материалов, создающих условия возникновения эффекта трибополимеризации, применяют масла и их отдельные фракции, индивидуальные углеводороды (цетан) и другие органические соединения. Для активизации процесса адсорбционной пластификации к маслам добавляют специальные полярно-активные присадки.

Механизм смазочного действия пластичных смазочных материалов имеет аналогичный характер, поскольку при рабочей температуре смазочные материалы переходят в вязкотекучее состояние. Масла, используемые в качестве основы пластичных смазочных материалов, по физико-химическим свойствам не отличаются от обычных масел, применяемых для смазывания элементов сельскохозяйственных машин. Поэтому описанный механизм действия масел характерен и для пластичных смазочных материалов.

Способность смазочного материала выполнять заданные функции в различных условиях эксплуатации машины характеризуется совокупностью эксплуатационных свойств. Эксплуатационные свойства масел оценивают с помощью соответствующих показателей.

**Трансмиссионные масла** используются для смазывания агрегатом трансмиссий, т. е. механических и гидромеханических передач машин различного назначения. Механические передачи, смазываемые трансмиссионными маслами - это коробки передач, раздаточные коробки, ведущие мосты автомобилей, трансмиссии тракторов и т. д. - т. е. зубчатые (цилиндрические прямозубые и косозубые шестерни, конические зубчатые передачи), гипоидные, спирально-конические зубчатые передачи. В гидромеханических трансмиссиях трансмиссионные масла являются рабочим телом, передающим крутящий момент с двигателя на исполнительный агрегат.

Условия работы агрегатов трансмиссий достаточно напряженные. Удельные нагрузки в зацеплении обычно составляют 0,5...1,5ГПа, но подчас повышаются до 2ГПа. Для гипоидных передач эта величина выше, как минимум вдвое. Скорости скольжения в зубчатых передачах составляют от 1,5...3 до 9...12м/с, а для гипоидных передач скорость скольжения достигает 15 м/с и более; для чер-

вячных редукторов - 20...25м/с. Температуры в контакте зубьев шестерен при таких условиях достигают 150-200<sup>0</sup>С. В то же время начальная объемная температура трансмиссий, работающих на открытом воздухе, может быть очень низкой (от -10 до -60<sup>0</sup>С). В гидромеханических трансмиссиях при меньших (в 1,5...3 раза) нагрузках и практически тех же скоростях (1,5...5м/с) вследствие высоких скоростей потоков масла от быстро вращающихся рабочих колес (скорости масла доходят до 80...100м/с) генерируются большие температуры, а контакт потоков масла с воздухом стимулирует усиленное пенообразование.

Основные виды повреждений рабочих поверхностей агрегатов трансмиссии:

- заедание; - износ; - питтинг.

Такие условия работы трансмиссий определяют требования к трансмиссионным маслам. Они должны прежде всего обладать достаточными противозносными и противозадирными свойствами, иметь высокий индекс вязкости и необходимый уровень вязкости при рабочей температуре масла (для обеспечения жидкостного режима смазки), достаточно низкой температурой застывания, не оказывать коррозионного воздействия на детали узла трения, иметь хорошие защитные свойства и высокую термоокислительную способность. Масла для гидромеханических трансмиссий должны быть маловязкими, чтобы уменьшить потери на внутреннее трение при высоких скоростях потоков масла.

Трансмиссионные масла работают в условиях высоких удельных нагрузок относительных скоростей скольжения (в гипоидных передачах), при граничном или полужидкостном режиме смазки, в довольно широком диапазоне температур. Поэтому для предупреждения износа, снижения коэффициента трения масла должны обладать, прежде всего, очень прочной масляной пленкой, высокими смазочными свойствами. Кроме этого, трансмиссионные масла должны обеспечивать “холодный пуск” трансмиссий при низких температурах воздуха и хорошую текучесть масла для попадания его в масляные подшипники короб передач, ведущих мостов.

Остальные свойства трансмиссионных масел аналогичны моторным:

- высокие антикоррозионные; - антиокислительные; - антипенные и др.

Трансмиссионные масла готовят очень тщательно, добавляя в высокоочищенные основы (минеральные или синтетические) комплексы присадок. Их нельзя делать из остатков перегонки нефти простым разбавлением до нужной вязкости, как, например, изготавливали масло под названием “Нигрол”, которое при нагреве до 40°С и выше теряло свои смазочные свойства (“текло как вода”). Невозможно приготовить высококачественное масло, используя плохо очищенную масляную основу с высокоэффективными присадками. То же относится к высококачественной масляной основе с низкокачественными присадками.

К маслам для гипоидных передач требования более жесткие по сравнению с маслами, работающими в механических (зубчатых) передачах, поэтому их составы несколько отличаются.

Масла, предназначенные для механических передач, не могут быть использованы для гипоидных, а масла для последних наоборот - могут использоваться.

Под действием температур, нагрузок, металлов, кислорода воздуха трансмиссионные масла окисляются, загрязняются, срабатываются присадки, что может стать причиной повышенного износа агрегатов трансмиссий.

**Гидравлическая жидкость** обладает определенными вязкостно-температурными и противоизносными свойствами, а также не должна иметь загрязнений. Применение жидкостей с высокой или низкой вязкостью приводит к увеличению скорости изнашивания деталей гидропривода и нарушению его работы.

Особенно сильно на надежность гидропривода влияют загрязнения. Они способствуют образованию стойкой пены в жидкости, которая служит причиной неисправностей и отказов гидропривода.

Посторонние частицы неорганического происхождения (кварц, гранит и др.) способствуют интенсивному абразивному изнашиванию деталей гидропривода, а металлические частицы (продукты износа или подобные им загрязнения) - образованию растворимого в жидкости мыла, что обуславливает возникновение устойчивой эмульсии.

В результате значительно снижается вязкость жидкости, увеличивается ее утечка в насосах, распределителях и уплотнениях, а также ухудшаются смазывающие свойства жидкости, что повышает скорость изнашивания деталей гидропривода.

#### Контрольные вопросы.

1. Что является основным количественным показателем работоспособности двигателя внутреннего сгорания?
2. Чем объясняется повышенный износ на большой частоте вращения коленчатого вала двигателя?
3. Как оценивают износостойкость элементов двигателя внутреннего сгорания в нагрузочном режиме?
4. Как зависит суммарный износ двигателя от температуры охлаждающей жидкости?
5. Какие детали входят в трансмиссии машин следующие основные элементы?
6. Что представляют собою врикционные муфты сцепления?
7. Чем характеризуются условия работы редукторов машин?
8. Какие правила следует соблюдать для повышения долговечности аккумуляторных батарей в процессе их эксплуатации?
9. Какие функции выполняют смазочные материалы?
10. Что представляют собою жидкостная, гидродинамическая и эластогидродинамическая смазки?
11. Какими свойствами обладает гидравлическая жидкость?

## **Глава 20. Повышение работоспособности технических систем и транспортно - технологических машин**

Надежность работы технических систем и транспортно - технологических машин в эксплуатации зависит от ряда факторов. Эти факторы условно можно разделить на две группы:

- *субъективные факторы*, зависящие от индивидуальных особенностей исполнителя-конструктора, изготовителя, эксплуатационника, и

- *объективные факторы*, характер которых определяется климатическими условиями и случайными воздействиями внешней среды.

К числу наиболее существенных субъективных факторов относят выбор конструктивного решения при проектировании машины, подбор материалов деталей, определение оптимальных рабочих режимов работы машин, организацию технического обслуживания и ремонта машин.

Данные факторы можно разделить на конструктивные, технологические и эксплуатационные. Конструктивные факторы связаны с разработкой и проектированием машин и их элементов.

Технологические факторы определяются характером процесса изготовления изделий. Эксплуатационные факторы влияют на надежность машин в процессе их работы в эксплуатации. Они включают в себя как объективные факторы, обусловленные влиянием внешней среды, так и субъективные, связанные с организацией системы технического обслуживания и ремонтов, обеспечения запасными частями, квалификацией обслуживающего персонала.

К объективным факторам относят различные климатические, почвенные, метеорологические, биологические, механические и другие воздействия.

По *характеру влияния на надежность машин* различают факторы, снижающие и повышающие уровень надежности. Факторы, повышающие надежность машин, связаны с целенаправленной деятельностью человека, и их относят к числу субъективных факторов.

В число факторов, снижающих надежность машин, входят объективные факторы субъективные, связанные с погрешностями проектирования, изготовления и использования машин. Для существенного повышения надежности машин необходимо проведение комплекса различных мероприятий.

### **20.1. Конструктивные мероприятия повышения надежности**

Основные конструктивные мероприятия, направленные на повышение надежности машин, могут быть сведены в такие группы:

1. Упрощение конструктивной схемы машины, уменьшение числа составляющих элементов.
2. Замена элементов, влияющих на снижение надежности машины, более надежными.
3. Выбор долговечных материалов деталей и оптимальных их сочетаний в сопряжениях.

Обеспечение элементов машины повышением запасов прочности деталей. Этот путь ограничивается требованиями к снижению материалоемкости, энергоемкости, стоимости и массы машины. Защита элементов машины от разрушающих действий окружающей среды.

Установка различных датчиков и контрольно-измерительных устройств, сигнализирующих об изменении технического состояния и о возникновении отказов основных элементов машины.

Повышение уровня ремонтпригодности машины более рациональной компоновкой ее элементов, обеспечивающей свободный доступ к наименее надежным сборочным единицам. Обеспечение простоты регулировки и замены быстроизнашивающихся деталей. Обеспечение благоприятных условий работы деталей и смазки трущихся поверхностей. Создание оптимальных температурных режимов работы сопряжений.

Создание эффективных устройств для очистки воздуха, топлива и смазки. Введение системы бездефектного проектирования для предотвращения ошибок при разработке конструкторской документации. Проведение испытаний машин и их элементов. Организация при конструкторских бюро заводов служб надеж-

ности, контролирующей уровень надежности изделий и разрабатывающих рекомендации по повышению долговечности и безотказности машин.

Одним из основных путей повышения надежности сельскохозяйственных транспортных и технологических машин является оптимальная компоновка конструктивной схемы машины. Это позволяет уменьшить влияние производственных недостатков и эксплуатационных факторов.

Как известно, что более надежны изделия, имеющие простые конструктивные схемы и решения, выполненные из материалов с хорошо проверенными в эксплуатации свойствами и требующие минимального технического обслуживания в эксплуатации.

При подборе материалов деталей и рационального их сочетания исходят из необходимости обеспечения заданной долговечности при минимальной стоимости. В то же время учитывают условия работы, вид изнашивания, назначение детали.

Детали современных машин и оборудования в зависимости от назначения изготавливают из конструкционных, износостойких, фрикционных, антифрикционных, антикоррозионных и других материалов. Наиболее широко в настоящее время используют качественную конструкционную и низколегированную сталь, серый чугун, а также сплавы на основе алюминия, ковкий чугун и др.

Из качественных конструкционных сталей наиболее широкое распространение получила сталь 45, из низколегированных – стали 12ХНЗА, 18ХГТ, 20ХНЗА, 25ХГТ, 30ХГТ 40Х и др., из серых чугунов - СЧ15, СЧ18, СЧ21.

Перспективными материалами для деталей машин являются низколегированные и модифицированные чугуны:

- низколегированные, подвергаемые цементации стали 18ХГТ, 25ХГТ, 20ХСНТ, 18ХНТФ (для шестерен и шлицевых валов);

- среднеуглеродистые низколегированные закаливаемые стали 38ХГСА, 45ХНМФА, 45ХМФА, 45ГРФА, 50ГСШ, 50ХФАШ (для подшипников скольжения); сплавы на основе алюминия (для головок и блоков цилиндров, кожухов муфт сцепления, корпусов гидронасосов);

- полимерные материалы (для втулок, подшипников скольжения, сальников, шестерен, крышек, ручек, деталей тормозных устройств и др.).

Внезапные отказы при эксплуатации машин возникают, как правило, в результате превышения предельно допустимых нагрузок. Уровень безотказности машины определяют соотношением наиболее вероятной (типичной) максимальной нагрузки на деталь и предельно допустимой расчетной нагрузки.

Одним из путей повышения безотказности машины является увеличение запаса прочности ее элементов. Запас прочности может быть повышен увеличением размеров деталей или подбором материалов с более высокими пределами прочности, усталости и других механических характеристик.

Предпочтительно снижение нагруженности деталей за счет рациональной формы и параметров их рабочих поверхностей, что также повышает запас прочности и безотказность элементов машины. Для предохранения дорогостоящих деталей от поломки при резком увеличении нагрузки в конструкции машин предусматривают установку предохранительных муфт или легкозаменяемых деталей с пониженным запасом прочности.

На интенсивность изнашивания элементов машин в эксплуатации большое влияние оказывают особенности окружающей среды:

- влажность,
- запыленность и наличие абразивных частиц в пыли,
- температура окружающего воздуха.

В связи с этим одним из путей повышения безотказности и долговечности сельскохозяйственных транспортных и технологических машин является проведение мероприятий по устранению вредного влияния перечисленных факторов. К числу таких мероприятий относят герметизацию узлов элементов, установку защитных кожухов, предохраняющих рабочие поверхности от попадания влаги и абразивной пыли, применение коррозионно-стойких материалов, создание надежных, герметичных систем смазки.

Большое значение для повышения долговечности трущихся деталей машин имеет разработка герметичных конструкций уплотнений включая создание дол-

говечных сальниковых уплотнений. В результате исследования надежности большого числа вариантов сальников в настоящее время отработана конструкция и рецептура материала. Для изготовления сальников рекомендуется применять резину на основе фторкаучуков, резинопровковые композиции вместо ранее применяемых пробковых уплотнений и вулканизированный паронит вместо обычного.

Частой причиной отказа является выход из строя торцового уплотнительного кольца крыльчатки системы охлаждения двигателя

Изготовленное из текстолита марки ВЧ это кольцо не обеспечивает достаточной герметичности и износостойкости. Значительно повышается надежность торцового уплотнения путем применения уплотнительного кольца из материала НАМИ ГС-ТАФ, свойства которого не изменяются в течение длительного периода работы, а износостойкость в 2...3 раза превышает износостойкость текстолитового кольца.

Важным мероприятием, направленным на повышение надежности машин и эффективности их использования в эксплуатации, является установка датчиков и контрольно-измерительных приборов. Оценка технического состояния основных элементов машины при работе в эксплуатации позволяет предвидеть момент отказа того или иного элемента и своевременно принять меры для восстановления его работоспособности.

В результате удается сократить до минимума простои, связанные с устранением отказа и предотвратить поломки и неисправности, вызванные отказом.

Техническое состояние машины и время устранения отказа зависят от ремонтпригодности изделий. Поэтому при разработке конструкции машин и оборудования необходимо обеспечить возможность легкого доступа к месту повреждения, наличие диагностических средств оценки технического состояния и определения причин отказа, возможность и удобство проведения регулировочных и смазочных работ.

Большое значение для повышения надежности элементов машины имеет обеспечение благоприятных условий работы деталей и сопряжений. Интенсив-

ность изнашивания деталей зависит от температур трущихся поверхностей и условий смазки. Температуру в узлах трения снижают с помощью водяной, воздушной или комбинированной системы охлаждения. Условия теплообмена механизма с окружающим воздухом улучшают различными конструктивными решениями: созданием теплоизолирующих прорезей (в головках блока цилиндров и на поршнях), установкой в бобышках поршней пластинок из инвара, увеличением поверхности теплоотдачи введением ребер и изменением формы теплоотдающей поверхности.

Применение современных высококачественных смазочных материалов с присадками улучшают условия смазки трущихся деталей. У современных двигателей все основные сопряжения смазываются под давлением. Исследования показали, что минимально допустимые давления масла при номинальном режиме работы двигателя составляют 0,3 МПа (3,0 кгс/см<sup>2</sup>). При давлении ниже 0,3 МПа (3,0 кгс/см<sup>2</sup>) в подшипниках с повышенным износом возникают неустойчивые колебания, ведущие к нарушению масляной пленки и задирам. Для обеспечения достаточного давления масла необходимо увеличить подачу масляного насоса, что вызывает необходимость повышения надежности основных его деталей. Подачу смазки под давлением и ее фильтрацию все шире применяют в узлах трения трансмиссий. Ряд ответственных узлов ходовой части гусеничных машин переводят с консистентной смазки на жидкостную (втулки цапф рам, подшипники опорных катков и др.).

Большое внимание в настоящее время уделяется созданию эффективных устройств для очистки воздуха, топлива и смазки.

Основная масса абразивной пыли, значительно увеличивающей интенсивность изнашивания деталей, поступает в двигатель с воздухом через воздухоочиститель. Большое внимание уделяют разработке новых воздухоочистителей инерционно-масляного типа и совершенствованию их конструкции. Степень очистки воздуха существующих инерционно-масляных воздухоочистителей достигает на максимальных расходах воздуха 98,3...98,8 %. В последнее время разработаны эффективные двухступенчатые воздухоочистители сухого типа с

эжекционным отсосом пыли. У этих воздухоочистителей в качестве первой ступени очистки воздуха использована инерционная решетка, а второй ступенью служит сменный фильтрующий элемент из высокопористого картона. Степень очистки воздуха от пыли двухступенчатым воздухоочистителем сухого типа с эжекционным отсосом пыли достигает 99,6...99,9 %. Срок службы таких воздухоочистителей на автомобиле составляет 30...40 тыс. км при наработке до технического обслуживания 12...20 тыс. км.

Для очистки топлива используют бумажные фильтрующие элементы БФДТ. Эффективными устройствами для очистки масла от абразивных частиц и продуктов износа являются полнопоточные масляные центрифуги, магнитные пробки в картерах, масляные фильтры в трансмиссии.

Перспективными направлениями считаются применение центробежной очистки масла в полостях шатунных шеек коленчатых валов, использование подшипников с одноразовой смазкой (в полуосях задних колес, шарнирах рулевого управления), разработка систем централизованной смазки основных элементов машин.

Работоспособность технических систем и транспортно-технологических машин определяется также уровнем организации процессов проектирования и производства на заводе-изготовителе. Научная организация труда конструкторов и рабочих, введение систем бездефектного проектирования, изготовления и сдачи продукции с первого предъявления позволяют существенно повысить качество и надежность изделий.

Для осуществления систематического контроля уровня надежности выпускаемой продукции и разработки мероприятий по повышению долговечности и безотказности элементов машин на заводах создаются службы надежности.

Службы надежности заводов выполняют следующие функции:

- рассчитывают надежность машин и элементов;
- анализируют рекламации, поступившие на завод, и устанавливают причины отказов и неисправностей элементов машин; исследуют влияние эксплуатационных факторов на надежность машин и элементов;

- разрабатывают мероприятия по повышению надежности машин и элементов в ходе их проектирования и изготовления;

- осуществляют взаимосвязь между эксплуатационниками, конструкторами и изготовителями машин.

## **20.2. Технологические мероприятия повышения работоспособности машин**

Расчетный уровень надежности, заложенный в машину на стадии проектирования в конструкторском бюро, должен быть обеспечен в процессе изготовления деталей и элементов, сборки и регулировки машин. Снижение уровня надежности машин на стадии производства может быть следствием одной из следующих причин:

- детали изготовлены из материалов, имеющие скрытые дефекты, или из материалов, не обеспечивающих заданную прочность;

- принятый технологический процесс изготовления деталей не может обеспечить заданный уровень их эксплуатационных свойств;

- в технологическом процессе изготовления деталей допускаются нарушения вследствие плохой организации производства;

- недостаточной квалификации рабочих;

- при изготовлении деталей используется устаревшее оборудование и т. д.

Для обеспечения надежности машин в процессе производства нужно решать следующие вопросы:

1. Организовать и контролировать тщательный подбор материалов деталей в соответствии с требованиями технической документации, а также контролировать их качества для своевременного обнаружения скрытых дефектов или несоответствия физико-механических свойств требуемым свойствам.

2. Повышать износостойкость и коррозионностойкость деталей нанесением покрытий.

3. Повышать требования к точности основных размеров деталей и к качеству их поверхности.

4. Применять автоматизированные станки с программным управлением, обеспечивающих высокую точность и стабильность характеристик качества

изделий, для изготовления деталей машин.

5. Совершенствовать входной, текущий и выходной контроль качества изготовления деталей, введение системы бездефектного изготовления продукции.

6. Введение автоматизированной системы управления производством. Значительное повышение надежности машин может быть достигнуто повышением прочностных характеристик материалов с помощью механической, термической или химико-термической обработки деталей. Для улучшения прочностных характеристик стальных деталей необходимо проводить их термическую обработку: - цементацию; - цианирование; - нитроцементацию; - азотирование.

Проведение термической и химико-термической обработки деталей имеет исключительно важное значение для повышения их долговечности.

По сравнению с другими способами химико-термической обработки азотирование обладает рядом преимуществ:

- дает более высокую поверхностную твердость;
- обеспечивает малую деформацию и незначительное изменение размеров деталей;
- значительно увеличивает износостойкость деталей;
- повышает усталостную прочность деталей путем создания в поверхностном слое напряжений сжатия.

Подвергнутые азотированию нормализованные коленчатые валы двигателя ЯМЗ-238 из сталей 50ГСШ и 50ХФА превосходят в 1,9 раза по усталостной прочности коленчатые валы, прошедшие нормализацию в поковке, и в 1,4 раза валы, прошедшие закалку шеек ТВЧ.

Улучшенные в поковке коленчатые валы из стали 42ХМФА после жидкостного азотирования превосходят по усталостной прочности в 1,3 раза валы из той же стали и с той же предварительной термической обработкой, но прошедшие закалку шеек ТВЧ и накатывание галтелей.

Закалка деталей ТВЧ так же, как и улучшение, является эффективным процессом повышения их надежности. Особенно эффективны эти методы для деталей, изготовленных из сталей повышенного качества, типа стали 50ХФА и

сталей электрошлакового переплава. Так, например, поверхностная закалка изделий из чугуна повышает их износостойкость в 2,5...3,5 раза, закалка ТВЧ повышает в 2 раза усталостную прочность стали 45.

Закалка шеек коленчатых валов, изготовленных из стали 50ГСШ, рафинированной синтетическими шлаками, позволяет снизить число закалочных и шлифовочных микротрещин практически в 3 раза. Значительное упрочнение коленчатых валов может быть достигнуто путем закалки шеек и галтелей.

При этом усталостная прочность на изгиб нормализованных коленчатых валов повышается на 25%, так как при использовании сталей 50Г, 50ГСШ и других марок наличие в них посторонних включений приводит к образованию на галтелях микротрещин и снижает усталостную прочность вала.

Прочностные характеристики деталей, работающих при переменных нагрузках, могут быть повышены с помощью поверхностного пластического деформирования. Пружины, рессоры, шестерни, шатуны и другие детали подвергают дробеструйной обработке. Коленчатые валы тракторных двигателей и поворотные цапфы, оси и полуоси упрочняют обкаткой шариками и роликами. Рабочие поверхности втулок верхних головок шатунов, гильз, цилиндров, отверстий в корпусах коробок передач и задних мостов, балансиров обрабатывают раскаткой и дорнованием.

Для повышения износостойкости и усталостной прочности деталей применяют методы электрохимической обработки. Такая обработка позволяет удалить концентраторы напряжения и обеспечивает возможность одновременной обработки всей поверхности детали сложной конфигурации. При этом обнаруживают дефекты металла и погрешности штамповки. Усталостная прочность шатунов, подвергнутых электрохимической обработке, повышается более чем на 50 %.

Весьма эффективно повышение долговечности деталей нанесением на рабочие поверхности износостойких и коррозионностойких покрытий. Хромирование рабочих поверхностей гильз цилиндров и шеек коленчатых валов позволяет повысить ресурс деталей в 2...3 раза.

Для повышения коррозионной стойкости на детали наносят покрытия электролитическими или химическими методами. Коррозионную стойкость повышают цинкованием, кадмированием, никелированием, фосфатированием, лужением, а также с помощью комбинирования процессов. Кроме того, износостойкость и коррозионную стойкость деталей повышают наплавкой на рабочие поверхности твердых сплавов, таких как ЭП-616, ЭП-616А, ПГ-ХН80СРЧ и др. Наплавку широко применяют при восстановлении и упрочнении изношенных деталей.

Для заливки сложных корпусных деталей (например, блоков, головок блоков цилиндров) требуется достаточно жидкий чугун с точным химическим составом. Это необходимо для обеспечения во всех сечениях отливок перлитной структуры с мелким и средним по размерам пластинчатым графитом. Для таких отливок используют специальные чугуны (типа СЧ21), легированные хромом, никелем, медью и титаном. Кроме того, для повышения однородности структуры материала в различных сечениях отливок и устранения отбела применяют модифицирование чугуна присадкой 75-процентного ферросилиция. Дальнейшее повышение механических свойств чугуна получают увеличением присадки стали в шихте до 11% и снижением содержания в чугуне углерода и кремния до 5...5,7%. Описанные мероприятия позволяют повысить среднее значение предела прочности чугуна на изгиб до 489 МПа (48,9 кг/мм<sup>2</sup>) и приблизить его механические свойства к свойствам чугунов более качественных марок (СЧ24 и др.).

Остаточные напряжения, возникающие в корпусных деталях в процессе их изготовления, приводят к значительным деформациям и впоследствии осложняют ремонт машин. Для предотвращения деформации блоков цилиндров, головок блоков и других базовых деталей производят искусственное старение их отливок продолжительностью 10...12 ч в проходных электропечах при температуре 550...600°С.

Для устранения коробления коленчатых валов двигателей в процессе обработки часто применяют холодную правку, вызывающую остаточные напряжения, которые в дальнейшем ведут к деформациям и снижают надежность двига-

теля. Для устранения указанных недостатков рекомендуется при изготовлении коленчатых валов и других ответственных деталей применять более совершенную технологию, позволяющую исключить холодную правку и свести к минимуму остаточные напряжения.

Работоспособность машин и их элементов во многом определяет строгое соблюдение технологии производства. Несоблюдение режимов обработки материалов и деталей приводит к сокращению сроков службы и к снижению надежности изделий. Технологические процессы изготовления деталей должны строго соответствовать технической документации. Контроль за этим осуществляют работники технологической службы и отдела технического контроля.

Для повышения технологической дисциплины необходимо воспитывать у рабочих и инженерно-технических работников уважение к техническим документам. Необходимо постоянно совершенствовать систему технической документации и контролировать правильность документов.

Значительное повышение качества нормативно-технической документации может быть достигнуто применением типовых чертежей втулок, осей, шестерен и других изделий, а также введением бескопирного размножения чертежей с помощью электрографических установок. Необходимо постоянно повышать квалификацию и совершенствовать профессиональное мастерство рабочих и инженерно-технических работников завода.

Повышение точности основных размеров деталей зависит от уровня и технического состояния используемых станков и приспособлений. С повышением точности изготовления деталей уменьшаются начальные зазоры в подвижных сопряжениях и улучшаются условия их смазки, более жестко регламентируются натяги в неподвижных соединениях, что значительно повышает износостойкость деталей и долговечность элементов машин.

Обеспечение высоких геометрических характеристик качества поверхности возможно срезанием неровностей поверхности тонким шлифованием, хонингованием, полированием с применением синтетических алмазов, снятием неровностей путем поверхностного пластического деформирования при обкатыва-

нии, раскатывании, дорновании, алмазном выглаживании и виброобкатывании алмазным или твердосплавными наконечниками: - электрохимической;  
- электромеханической: - или электромагнитной обработкой.

Чистовая обработка методом пластического деформирования обеспечивает высокую чистоту обрабатываемой поверхности и позволяет избежать появления концентраторов напряжений (рисок, надрезов и т. п.). Упрочнение поверхностного слоя металла при пластическом деформировании вызывает увеличение поверхностной твердости, пределов текучести и упругости, возникновение остаточных напряжений сжатия увеличения площади контактирования трущихся поверхностей скруглением микронеровностей.

Для повышения чистоты и точности изготовления особо ответственных деталей вместо операции суперфиниширования рекомендуется применять обработку с помощью алмазной эластичной ленты АЭЛ73/50РЭ, что позволяет получить поверхность с параметром  $Ra = 0,32...0,16$  мкм.

Вид обработки определяется геометрическими параметрами детали, ее материалом и функциональным назначением. К наиболее перспективным методам обработки поверхностей деталей отнесена виброобкатка, обеспечивающая наибольшую износостойкость.

Автоматизация процессов производства позволяет в значительной степени уменьшить отклонения размеров деталей, обусловленные субъективными факторами, связанными с участием в производстве человека.

Применение автоматизированных станков с программным управлением обеспечивает стабильность качества деталей, высокую точность соблюдения заданного технологического режима. Все это позволяет значительно увеличить надежность элементов машин.

Отдельные сборочные единицы выпускают на специализированных предприятиях, и на завод-изготовитель они поступают в виде готовых изделий. При производстве этих изделий могут быть допущены отклонения от заданной технологии изготовления, а следовательно, отклонения характеристик от номинального значения. Кроме того, продукция специализированных предприятий

может не сразу поступить в производство. Нарушение правил транспортировки и хранения изделий ведет к существенному изменению их свойств.

По этим причинам необходимо проводить входной контроль комплектующих изделий, поступающих на завод машин.

Текущий контроль качества изделий проводят на различных стадиях изготовления и сборки элементов машин. Методику текущего контроля разрабатывают применительно к конкретным изделиям на основе статистических методов контроля качества.

Значительное повышение качества и надежности элементов машин может быть достигнуто путем введения системы бездефектного изготовления продукции. При этой системе продукция или техническая документация сдается с первого предъявления. При обнаружении хотя бы одного дефекта контролер возвращает всю продукцию изготовителю для разбраковки. Контролеров освобождают от обязанности разбраковывать продукцию, их основной задачей является анализ причин брака и его профилактика. Большое значение в этом случае приобретают статистические методы контроля качества продукции.

Применение этих методов позволяет существенно сократить продолжительность и объем контрольных операций с сохранением необходимой достоверности результатов контроля.

Для обеспечения эффективной работы отдел технического контроля должен располагать необходимыми контрольно-измерительными приборами, инструментами.

Обкаточные (приработочные) испытания позволяют сократить продолжительность этапа приработки, характеризующегося повышенной интенсивностью отказов. При разработке программы испытаний важно правильно установить режим нагружения элементов машины. Правильно организованные обкаточные испытания позволяют значительно повысить безотказность машины в начальный период ее работы и увеличить общий срок службы машины. Кроме того, для оценки качества машин проводят приемочные испытания, а также испытания опытных образцов изделий. При разработке методики и проведении

испытаний необходимо обеспечить комплексное воздействие различных факторов в условиях, близких к эксплуатационным. В процессе испытаний опытных образцов выявляют сборочные единицы, лимитирующие надежность машины в целом.

Обеспечение уровня надежности, заданного на этапе конструирования, в значительной степени связано с организацией производства. Существенное повышение уровня организации производства достигается введением автоматизированной системы управления.

Автоматизированная система управления производством позволяет выбрать наиболее рациональный вариант технологического процесса.

При этом с помощью ЭВМ рассчитывают режимы резания, технические нормы времени, приспособления, мерительные и сложные режущие инструменты. Кроме того, по материально-техническому обеспечению производства рассчитывают потребность в материалах; по оперативно-производственному планированию разрабатывают оптимальные варианты сетевых графиков и технологических маршрутов, рассчитывают суточную потребность деталей и учет готовой продукции; по бухгалтерскому учету рассчитывают расход заработной платы, материалов, инструментов и др.

Внедрение автоматизированной системы управления производством позволяет организовать ритмичный выпуск продукции со стабильными характеристиками качества и надежности.

### **20.3. Эксплуатационные мероприятия повышения рабоспособности технических систем**

На надежность машин в эксплуатации существенно влияют как объективные, так и субъективные факторы. Учитывая это, можно сформулировать следующие основные направления совершенствования системы технической эксплуатации машин:

- повышение квалификации обслуживающего персонала;
- строгое соблюдение рекомендаций инструкции по эксплуатации машины;
- обеспечение нормальных режимов работы машины; - соблюдение правил транспортировки и хранения машин; - оптимизация режимов и периодически-

сти технического обслуживания (ТО); - совершенствование организации технического обслуживания и ремонтов машин; - проведение диагностики; - совершенствование системы сбора, обработки и анализа информации о надежности машин; - разработка рекомендаций по повышению надежности машин и их элементов.

Квалификацией обслуживающего персонала определяется качество подготовки машины к работе, ее техническое состояние, а также качество ремонта и технического обслуживания машин. Квалифицированный специалист совершает меньше ошибок, связанных с неправильной регулировкой, смазкой, применением излишних физических усилий и др. Высокая квалификация позволяет значительно быстрее обнаружить и устранить отказы, возникшие в процессе работы машины. Влияние недостаточной квалификации персонала уменьшается с введением централизованной системы смазки, с уменьшением числа быстроизнашивающихся элементов, требующих замены или регулировки.

Несоблюдение обслуживающим персоналом правил технической эксплуатации машин всегда приводит к отказам и неисправностям, а в ряде случаев и к авариям.

Система технического обслуживания и планово-предупредительного ремонта включает мероприятия, направленные на поддержание работоспособности машин в процессе эксплуатации. Оптимизация периодичности проведения ТО и ремонта, строгое обоснование объемов работ при ТО, а также бесперебойное снабжение эксплуатационных предприятий запасными частями и материалами - все это позволяет значительно повысить безотказность и долговечность машин в эксплуатации.

Хорошо организованная система технической эксплуатации предусматривает проведение диагностики технического состояния и прогнозирование надежности машин. Своевременное проведение профилактических мероприятий, направленных на восстановление первоначальных свойств, позволяет в значительной мере увеличить надежность машин.

В инструкции по эксплуатации, прилагаемой заводом-изготовителем к каждой машине, приведены основные рекомендации по технической эксплуатации машины. Эти рекомендации установлены в результате тщательных исследований, и несоблюдение их в эксплуатации значительно снижает долговечность и безотказность машины, а порой может привести и к авариям. Особое внимание в инструкции по эксплуатации следует уделять рекомендациям по применению топлив, смазочных материалов и жидкостей гидросистем. Заправка гидросистем жидкостями, не предусмотренными инструкцией по эксплуатации, является наиболее распространенным нарушением и приводит к отказам элементов и выходу машины из строя.

При замене масел необходимо тщательно промывать соответствующую сборочную единицу и удалять абразивные частицы и продукты износа. Абразивные частицы попадают в механизмы машины вместе с производственной грязью (стружкой, продуктами износа и др.) при ремонте, из окружающего воздуха во время работы, при небрежной заправке машины и частичной разборке ее в процессе технического обслуживания и устранения отказов. Снижение количества абразивных частиц, попадающих в механизмы, достигается повышением культуры технической эксплуатации и ремонта, совершенствованием технологических процессов мойки и очистки деталей при ремонте, применением более совершенных моечных установок и моющих средств, внедрением эффективных систем контроля качества очистки деталей. Существуют различные по конструкции и обеспечиваемой степени очистки деталей очистные сооружения и моечные средства, включающие продувку, прокачку, сушку, очистку деталей от стружки и др. В качестве фильтрующих элементов в моечных установках применяют магнитосетчатые, щелевые и тканевые фильтры.

Эффективными моющими средствами являются холодные и горячие растворы, разработанные институтом ЭКТИавтопром. В состав холодного моющего раствора входит 10% (по объему) деароматизированного керосина, 5 г/л триполифосфата, 5 г/л поташа, 8 г/л ОП-7 или ОП-Ю. Раствор готовят на водной основе. Горячий моющий раствор состоит из 7 г/л триполифосфата, 3 г/л

кальцинированной соды, 2 г/л метилсиликата натрия, 0,1...0,2 г/л сульфанола НП-3 и воды.

Широкое применение для промывки картеров двигателей от остатков смазочного материала нашли следующие составы: - 90% керосина или дизельного топлива в смеси с 10% бензина, ацетона или дихлорэтана; - 90% уайт-спирита в смеси с 10% дихлорэтана; - 50% масла АС в смеси с 50% уайт-спирита или 25...30%-ным раствором жидкости МЛ-52.

Существенно влияет на надежность машин качество применяемых смазочных материалов. При использовании некачественных масел в двигателях образуется большое количество смолистого шлака и твердых продуктов сгорания, которые откладываются на деталях поршневой группы, системы смазки, во внутренних полостях и деталях двигателя. На поверхностях поршней образуется большое количество нагара и плотная окисная пленка. Это приводит к резкому ухудшению работы маслоъемных колец, увеличению пропуска масла к компрессионным кольцам и в камеру сгорания, к повышенному расходу масла и прогрессивному нагарообразованию.

Ухудшение условий смазки ведет к возникновению задиров на трущихся поверхностях деталей поршневой группы и интенсивному образованию продуктов износа. Быстрое загрязнение фильтров продуктами износа и абразивными частицами приводит к тому, что к подшипникам коленчатого вала через перепускной клапан поступает нефилтрованное масло, в результате чего на вкладышах подшипников образуются риски и задиры.

Все сказанное вызвало необходимость исследовать, как влияют различные присадки на свойства смазочных материалов. В результате исследований установлено, что для обеспечения требуемых свойств смазочных материалов необходимо использовать различные композиции присадок, обладающих противозносными, антиокислительными и моющими свойствами. К числу таких композиций отнесены ВНИИНП-360 + ПМС + ВНИИНП-354 и ДФ-11 + ПМС-200А. На основе указанных композиций присадок нефтеперерабатывающая промышленность выпускает моторные масла МЮВ<sub>2</sub> и МЮГ<sub>2</sub>, широко используемые

для автотракторных дизелей. Эти масла обладают хорошими моющими и диспергирующими свойствами. В процессе работы они обеспечивают достаточную чистоту деталей поршневой группы, картерного пространства и хорошую работу системы фильтрации. Все это существенно повышает ресурс дизеля. Сроки замены указанных масел и периодичность обслуживания системы очистки масла увеличиваются в 2 раза, а для двигателей с турбонаддувом - в 2...4 раза.

Одним из основных условий обеспечения заданного уровня безотказности и долговечности машин и оборудования является *обеспечение нормальных режимов работы машин*.

Это особенно важно при эксплуатации машин в сложных климатических условиях или на особо тяжелых работах. Перегрузка элементов машин, неправильные регулировки зазоров в подшипниках, шестернях, тормозах, муфтах сцепления и других узлах нарушают температурный режим работы трущихся поверхностей деталей, ухудшают условия смазки и резко увеличивают интенсивность изнашивания деталей. Наиболее высокие нагрузки на детали машин из-за неблагоприятных условий смазки наблюдаются при пуске двигателя и включении элементов трансмиссии машины, находящейся в переохлажденном состоянии (при температуре ниже + 5°C).

Для обеспечения нормальных условий эксплуатации машин в зимнее время на базах механизации необходимо устраивать крытые стоянки, для подогрева масла применяют специальные электрические подогреватели. Для машин, хранящихся на открытых площадках, используют системы воздушного подогрева с помощью теплогенераторов и газовых горелок.

Большое значение для обеспечения надежности машин имеет *соблюдение правил их транспортировки и хранения*. Последнее особенно важно для машин сезонного использования (снегоочистителей, легких экскаваторов, катков и др). Транспортировать и хранить машины и оборудование следует в строгом соответствии с рекомендациями инструкции по эксплуатации.

При длительном хранении неокрашенные поверхности машин покрывают слоем пластинногосмазочного материала, нарушенные лакокрасочные покры-

тия восстанавливают. Электрооборудование, резину, приборы и сменное рабочее оборудование хранят в специальных закрытых помещениях.

Среди эксплуатационных факторов, влияющих на надежность машин, важное значение имеет *организация технического обслуживания и ремонтов техники на базах механизации.*

Организационные и технологические факторы, определяющие условия эксплуатации, являются фоном, на котором проявляются свойства надежности, заложенные в конструкции машин. В системе эксплуатации машин применяют различные организационные формы технического обслуживания и ремонтов.

На предприятиях с небольшим числом единиц средств механизации техническое обслуживание и ремонт выполняют, как правило, водители-механики (машинисты) без разделения труда.

Такая организация работ сопровождается большими простоями техники, достигающими 20...25% сменного времени, и снижением производительности машин вследствие низкого качества ремонта. Кроме того, при такой форме организации профилактического обслуживания и ремонтов возникают трудности во внедрении механизации и автоматизации операций. Это является отрицательной чертой, так как только механизацией операций технического обслуживания машин удастся снизить их трудоемкость на 30...40% и тем самым значительно сократить продолжительность простоев машин.

Более перспективной является система технического обслуживания и ремонтов машин, основанная на узкой специализации и разделении труда. Эту систему широко применяют в авиации, в горнорудной промышленности, на железнодорожном и автомобильном транспорте.

Узкая специализация ремонтных рабочих и обслуживающего персонала в сочетании с разделением труда позволяет значительно повысить качество технического обслуживания и ремонта, сократить продолжительность простоев и уменьшить затраты на проведение операций по поддержанию работоспособности машин.

Такая форма организации планово-предупредительного обслуживания и ремонта техники позволяет внедрять на базах механизации эффективные методы ремонта машин. Так, например, значительная экономия может быть получена в результате применения агрегатно-узлового метода ремонта, позволяющего значительно снизить продолжительность простоев машин и повысить эффективность их использования.

Важным направлением совершенствования системы технического обслуживания и ремонтов машин является оснащение предприятий современными техническими средствами.

#### Контрольные вопросы.

1. От чего зависят объективные и субъективные факторы обеспечения надежности технических систем?
2. Перечислите основные конструктивные мероприятия, направленные на повышение надежности машин?
3. Когда и почему возникают внезапные отказы при эксплуатации машин?
4. Что оказывают большое влияние на интенсивность изнашивания элементов машин в эксплуатации?
5. От чего зависят техническое состояние машины и время устранения отказа?
6. Каковы причины снижения уровня надежности технических систем и машин в целом на стадии производства?
7. Какие вопросы необходимо решать в процессе производства для обеспечения надежности машин?
8. Что определяется квалификацией обслуживающего персонала?
9. Какое значение имеет соблюдение правил транспортировки и хранения при обеспечении надежности машин?
10. К чему приводит ухудшение условий смазки?

## **Глава 21. Эксплуатационные мероприятия повышения работоспособности технических систем**

### **21.1. Перечень мероприятий**

На работоспособность машин в эксплуатации существенно влияют как объективные, так и субъективные факторы. Учитывая это, можно сформулировать следующие основные направления совершенствования системы технической эксплуатации машин:

- повышение квалификации обслуживающего персонала;
- строгое соблюдение рекомендаций инструкции по эксплуатации машины;
- обеспечение нормальных режимов работы машины;
- соблюдение правил транспортировки и хранения машин;
- оптимизация режимов и периодичности технического обслуживания (ТО);
- совершенствование организации технического обслуживания и ремонтов машин;
- проведение диагностики; совершенствование системы сбора, обработки и анализа информации о надежности машин;
- разработка рекомендаций по повышению надежности машин и их элементов.

Квалификацией обслуживающего персонала определяется качество подготовки машины к работе, ее техническое состояние, а также качество ремонта и технического обслуживания машин. Квалифицированный специалист совершает меньше ошибок, связанных с неправильной регулировкой, смазкой, приложением излишних физических усилий и др.

Высокая квалификация позволяет значительно быстрее обнаружить и устранить отказы, возникшие в процессе работы машины. Влияние недостаточной квалификации персонала уменьшается с введением централизованной системы смазки, с уменьшением числа быстро изнашивающихся элементов, требующих замены или регулировки.

Несоблюдение обслуживающим персоналом правил технической эксплуатации машин всегда приводит к отказам и неисправностям, а в ряде случаев и к авариям. Система технического обслуживания и планово-предупредительного ремонта включает мероприятия, направленные на поддержание работоспособности машин в процессе эксплуатации.

Оптимизация периодичности проведения ТО и ремонта, строгое обоснование объемов работ при ТО, а также бесперебойное снабжение эксплуатационных предприятий запасными частями и материалами – все это позволяет значительно повысить безотказность и долговечность машин в эксплуатации.

Хорошо организованная система технической эксплуатации предусматривает проведение диагностики технического состояния и прогнозирование надежности машин. Своевременное проведение профилактических мероприятий, направленных на восстановление первоначальных свойств, позволяет в значительной мере увеличить работоспособность машин.

В инструкции по эксплуатации, прилагаемой заводом-изготовителем к каждой машине, приведены основные рекомендации по технической эксплуатации машины. Эти рекомендации установлены в результате тщательных исследований, и несоблюдение их в эксплуатации значительно снижает долговечность и безотказность машины, а порой может привести и к авариям. Особое внимание в инструкции по эксплуатации следует уделять рекомендациям по применению топлив, смазочных материалов и жидкостей гидросистем. Заправка гидросистем жидкостями, не предусмотренными инструкцией по эксплуатации, является наиболее распространенным нарушением и приводит к отказам элементов и выходу машины из строя.

При замене масел необходимо тщательно промывать соответствующую сборочную единицу и удалять абразивные частицы и продукты износа. Абразивные частицы попадают в механизмы машины вместе с производственной грязью (стружкой, продуктами износа и др.) при ремонте, из окружающего воздуха во время работы, при небрежной заправке машины и частичной разборке ее в процессе технического обслуживания и устранения отказов. Снижение количе-

ства абразивных частиц, попадающих в механизмы, достигается повышением культуры технической эксплуатации и ремонта, совершенствованием технологических процессов мойки и очистки деталей при ремонте, применением более совершенных моечных установок и моющих средств, внедрением эффективных систем контроля качества очистки деталей.

Существуют различные по конструкции и обеспечиваемой степени очистки деталей очистные сооружения и моечные средства, включающие продувку, прокачку, сушку, очистку деталей от стружки и др. В качестве фильтрующих элементов в моечных установках применяют магнитосетчатые, щелевые и тканевые фильтры.

Эффективными моющими средствами являются холодные и горячие растворы, разработанные институтом ЭКТИавтопром. В состав холодного моющего раствора входит 10% (по объему) деароматизированного керосина, 5 г/л триполифосфата, 5 г/л поташа, 8 г/л ОП-7 или ОП-Ю. Раствор готовят на водной основе. Горячий моющий раствор состоит из 7 г/л триполифосфата, 3 г/л кальцинированной соды, 2 г/л метилсиликата натрия, 0,1...0,2 г/л сульфанола НП-3 и воды.

Широкое применение для промывки картеров двигателей от остатков смазочного материала нашли следующие составы: 90 % керосина или дизельного топлива в смеси с 10% бензина, ацетона или дихлорэтана; 90% уайт-спирита в смеси с 10% дихлорэтана; 50% масла АС в смеси с 50% уайт-спирита или 25...30%-ным раствором жидкости МЛ-52.

Существенно влияет на надежность машин качество применяемых смазочных материалов. При использовании некачественных масел в двигателях образуется большое количество смолистого шлака и твердых продуктов сгорания, которые откладываются на деталях поршневой группы, системы смазки, во внутренних полостях и деталях двигателя. На поверхностях поршней образуется большое количество нагара и плотная окисная пленка. Это приводит к резкому ухудшению работы маслоъемных колец, увеличению пропуска масла к компрессионным кольцам и в камеру сгорания, к повышенному расходу

масла и прогрессивному нагарообразованию.

Ухудшение условий смазки ведет к возникновению задиров на трущихся поверхностях деталей поршневой группы и интенсивному образованию продуктов износа. Быстрое загрязнение фильтров продуктами износа и абразивными частицами приводит к тому, что к подшипникам коленчатого вала через перепускной клапан поступает нефильТРованное масло, в результате чего на вкладышах подшипников образуются риски и задиры.

Все сказанное вызвало необходимость исследовать, как влияют различные присадки на свойства смазочных материалов. В результате исследований установлено, что для обеспечения требуемых свойств смазочных материалов необходимо использовать различные композиции присадок, обладающих противоизносными, антиокислительными и моющими свойствами. К числу таких композиций отнесены ВНИИНП-360 + ПМС +ВНИИНП-354 и ДФ-11+ПМС-200А. На основе указанных композиций присадок нефтеперерабатывающая промышленность выпускает моторные масла МЮВ<sub>2</sub> и МЮГ<sub>2</sub>, широко используемые для автотракторных дизелей. Эти масла обладают хорошими моющими и диспергирующими свойствами. В процессе работы они обеспечивают достаточную чистоту деталей поршневой группы, картерного пространства и хорошую работу системы фильтрации. Все это существенно повышает ресурс дизеля. Сроки замены указанных масел и периодичность обслуживания системы очистки масла увеличиваются в 2 раза, а для двигателей с турбонаддувом - в 2...4 раза.

Одним из основных условий обеспечения заданного уровня безотказности и долговечности машин и оборудования является *обеспечение нормальных режимов работы машин*. Это особенно важно при эксплуатации машин в сложных климатических условиях или на особо тяжелых работах. Перегрузка элементов машин, неправильные регулировки зазоров в подшипниках, шестернях, тормозах, муфтах сцепления и других узлах нарушают температурный режим работы трущихся поверхностей деталей, ухудшают условия смазки и резко увеличивают интенсивность изнашивания деталей. Наиболее высокие нагрузки на детали машин из-за неблагоприятных условий смазки наблюдаются при пуске

двигателя и включении элементов трансмиссии машины, находящейся в переохлажденном состоянии (при температуре ниже + 5°C).

Для обеспечения нормальных условий эксплуатации машин в зимнее время на базах механизации необходимо устраивать крытые стоянки, для подогрева масла применяют специальные электрические подогреватели. Для машин, хранящихся на открытых площадках, используют системы воздушного подогрева с помощью теплогенераторов и газовых горелок.

Большое значение для обеспечения надежности машин имеет *соблюдение правил их транспортировки и хранения*. Последнее особенно важно для машин сезонного использования. Транспортировать и хранить машины и оборудование следует в строгом соответствии с рекомендациями инструкции по эксплуатации. При длительном хранении неокрашенные поверхности машин покрывают слоем пластинного смазочного материала, нарушенные лакокрасочные покрытия восстанавливают. Электрооборудование, резину, приборы и сменное рабочее оборудование хранят в специальных закрытых помещениях.

Среди эксплуатационных факторов, влияющих на работоспособность машин, важное значение имеет *организация технического обслуживания и ремонтов техники на базах механизации*. Организационные и техно-логические факторы, определяющие условия эксплуатации, являются фоном, на котором проявляются свойства надежности, заложенные в конструкции машин. В системе эксплуатации машин применяют различные организационные формы технического обслуживания и ремонтов. На предприятиях с небольшим числом единиц средств механизации техническое обслуживание и ремонт выполняют, как правило, водителями механики (машинисты) без разделения труда. Такая организация работ сопровождается большими простоями техники, достигающими 20...25% сменного времени, и снижением производительности машин вследствие низкого качества ремонта. Кроме того, при такой форме организации профилактического обслуживания и ремонтов возникают трудности во внедрении механизации и автоматизации операций. Это является отрицательной чертой, так как только механизацией операций технического обслуживания машин удается

снизить их трудоемкость на 30...40% и тем самым значительно сократить продолжительность простоев машин.

Более перспективной является система технического обслуживания и ремонтов машин, основанная на узкой специализации и разделении труда. Эту систему широко применяют в авиации, в горнорудной промышленности, на железнодорожном и автомобильном транспорте. Узкая специализация ремонтных рабочих и обслуживающего персонала в сочетании с разделением труда позволяет значительно повысить качество технического обслуживания и ремонта, сократить продолжительность простоев и уменьшить затраты на проведение операций по поддержанию работоспособности машин. Такая форма организации планово-предупредительного обслуживания и ремонта техники позволяет внедрять на базах механизации эффективные методы ремонта машин.

### **21.2. Техническое диагностирование состояние машины**

*Техническое диагностирование* - это процесс определения технического состояния объекта с предельной точностью. Результатом диагностирования является заключение о техническом состоянии объекта с указанием при необходимости места, вида и причин неисправности.

*Диагностирование* - один из элементов планово-предупредительной системы технического обслуживания и ремонта машин.

*Основная его цель* - достижение максимальной эффективности эксплуатации машин и, в частности, сведение до минимума затрат на их техническое обслуживание и ремонт. Для этого своевременно и квалифицированно оценивают техническое состояние машины и разрабатывают рациональные рекомендации по дальнейшему использованию и ремонту ее сборочных единиц (обслуживанию, ремонту, дальнейшей эксплуатации без обслуживания, замене сборочных единиц, материалов и т. п.).

Диагностирование проводят как в условиях эксплуатации машин, так и при их ремонте. В условиях эксплуатации машин техническое диагностирование (эксплуатационное) осуществляют при обкатке, эксплуатации, техническом обслуживании, ремонте и хранении.

В период обкатки контролируют окончание и качество приработки соединенных механизмов машин, устанавливают возможность эксплуатации машин, определяют начальные значения параметров, которые являются исходными при последующих плановых проверках машин.

В период производственной эксплуатации машин машинист непрерывно осуществляет диагностирование машин по штатным встроенным приборам и устройствам, по внешним признакам - шуму, вибрации механизмов. Кроме этого машинист контролирует ряд параметров в конце смены согласно заводской инструкции (угар масла, натяжение ременных и цепных передач, состояние тросов и гусениц, давление в шинах и др.).

При ежедневном техническом обслуживании определяют готовность машины к работе в течение смены. В процессе диагностирования при ТО-1, ТО-2 проводят частичное диагностирование. При этом устанавливают возможность работы машины до следующего одноименного технического обслуживания.

При сезонном техническом обслуживании определяют готовность машины к осенне-зимним или весенне-летним условиям эксплуатации.

При ТО-3 полностью диагностируют машину, определяют остаточный ресурс агрегатов и при необходимости устанавливают вид и объем ремонтных работ.

В период хранения диагностирование осуществляют с целью обеспечить сохранность машин.

При оценке технического состояния технологических и транспортных машин используют как субъективные (органолептические), так и объективные (инструментальные) методы.

*Субъективные методы диагностирования* осуществляют слушиванием, осмотром, осязанием и обонянием.

*О с л у ш и в а н и е м* выявляют места и характер стуков, шумов, перебоев в работе двигателя, отказов в трансмиссии и ходовой системы (по скрежету и шуму), неисправности (по шуму прорываемого воздуха) и т. п.

Осмотром устанавливают места подтекания воды, масла, топлива, цвет отработанных газов, давление из сапуна, биение вращающихся частей, натяжение цепных передач, состояние рабочих органов машин и т. д.

Осызанием определяют места и степень ненормального нагрева, биения, вибрации деталей, вязкость и липкость жидкости и т. п.

Обонянием выявляют по характерному запаху отказ муфт сцепления, поворота, тормозных устройств, течь бензина, электролита, отказ электропроводки и т. п.

С помощью субъективных методов выявляют лишь качественные отклонения состояния того или иного механизма от нормы. В практике их широко применяют для предварительной (ориентировочной) оценки технического состояния отдельных сборочных единиц и машины в целом.

**Объективные методы диагностирования** дают точную оценку сборочной единицы, машины. Они основаны на использовании как специальных контрольно-диагностических средств (оборудования, приборов, инструмента, приспособлений), так и устанавливаемых непосредственно на машинах или входящих в комплект инструмента машиниста.

Объективное диагностирование разделяют на прямое и косвенное.

Прямое диагностирование - это процесс определения технического состояния объекта по его структурным параметрам (зазорам в подшипниковых узлах, в клапанном механизме, между отжимными рычагами и подшипником отводки сцепления, в верхних и нижних головках шатунов кривошипно-шатунного механизма, ходу рычагов и педалей механизма управления поворотом, сцепления и тормозов, провисанию гусеничных полотен, биению валов, размерам деталей, доступных для непосредственного измерения и др.).

Прямое диагностирование сборочных единиц и машин в целом осуществляют по структурным параметрам с помощью универсальных измерительных инструментов: калибров, щупов, масштабной линейки, штангенциркулей, микрометров, зубомеров, нормалемеров и др. Это позволяет получать точные результаты.

Недостаток прямого диагностирования состоит в том, что он во многих случаях требует разборки объекта диагностирования. Последнее значительно увеличивает трудоемкость работ и нарушает приработку сопряженных поверхностей. Поэтому в практике прямое диагностирование, как правило, проводят в тех случаях, когда структурные параметры объекта диагностирования можно измерить без разборки сопряженных поверхностей (детали рабочих органов, передаточных механизмов, механизмов управления и т. д.).

Косвенное диагностирование - это процесс определения фактического состояния объекта диагностирования по косвенным, или, как их называют, диагностическим, параметрам без разборки механизмов машины.

В качестве косвенных показателей используют изменение герметичности рабочих объемов, параметров рабочих процессов (давление в смазочной системе, в цилиндре двигателя внутреннего сгорания в конце такта сжатия, начала впрыска топлива форсункой в цилиндре двигателя, развиваемое плунжерной парой топливного насоса и др., структурных шумов, содержания продуктов износа в масле, мощности, расхода топлива и др.).

Сам процесс диагностирования проводят с помощью манометров, вакуумметров, пьезометров, расходомеров, пневматических калибраторов, дымомеров и многих других специальных приборов.

Так, общее состояние цилиндропоршневой группы двигателей оценивают с помощью индикатора расхода газов КИ-13671 по количеству газов, прорывающихся из камер сгорания в картер. Герметичность воздушного впускного тракта, компрессию цилиндров дизельных двигателей контролируют индикатором герметичности КИ-13948, а начало подачи топлива - моментоскопом КИ-4941.

Давление начала впрыскивания топлива через форсунку контролируют с помощью приспособления для проверки форсунки на двигателе КИ-16301А, а качество распыла топлива - с помощью прибора для испытания и регулирования форсунок КИ-15706.

Производительность масляного насоса гидросистемы, давление срабатывания автоматов золотников распределителя и предохранительного клапана про-

веряют с помощью прибора для проверки гидросистемы технологических машин КИ-5473. Стуки и шумы механизмов и агрегатов выявляют автостетоскопом ТУ17 МО.082.017. Генераторы постоянного и переменного тока, реле-регуляторы, стартеры и аккумуляторные батареи по параметрам тока и напряжения проверяют переносным прибором для проверки автотракторного электрооборудования Ц-4324 и т. д. Полный объем работ, выполняемых при диагностировании машин, а также порядок их проведения и контрольно-диагностические средства изложены в картах проверки технического состояния машин.

В практике все больше внимания уделяют техническому диагностированию машин непосредственно в процессе их эксплуатации (работы) с помощью встроенных в их конструкцию датчиков (преобразователей), специальных лючков, глазков, штуцеров и т. д.

На машины устанавливают, как правило, недорогие, сравнительно простые приборы, позволяющие непрерывно контролировать работу сборочных единиц машин, наблюдать за их техническим состоянием. Это приборы, контролирующие загрузку двигателя, температуру охлаждающей жидкости и масла, давление в системах, частоту вращения коленчатого вала, работу аккумуляторов и др.

Используя периодический внешний осмотр и проверку отдельных механизмов простейшими методами и средствами по параметрам (уровень масла в картере двигателя, уровень охлаждающей жидкости, давление в шинах, натяжение ремennых и цепных передач и др.) в сочетании с применением встроенных контрольных средств, систематически наблюдают за состоянием функциональных свойств составных частей машины в период ее работы. Чем больше встроенных средств, обеспечивающих непрерывный контроль за показателями работы машин, и чем более полно контролируют работу механизмов простейшими методами, тем она надежнее и эффективнее в работе.

***Прогнозирование технического состояния*** - один из основных элементов технической диагностики. Основная его цель - установление сроков безотказ-

ной работы составных частей сборочной единицы или машины в целом до очередного технического обслуживания или ремонта, а также определение остаточного ресурса.

Под остаточным ресурсом понимают наработку сопряжения, сборочной единицы или машины как системы в целом после контрольного осмотра (технического обслуживания, ремонта и т. д.) до предельного (выбракованного) состояния.

Прогнозирование обеспечивает возможность более полно использовать ресурс машины, а также повысить их надежность.

Среднестатистическое прогнозирование основано на разработке и вверении единых допустимых значений параметров технического состояния, а также единой периодичности обслуживания для одноименных составных частей однотипных машин.

Сущность этого метода заключается в сопоставлении результатов замера значений параметров технического состояния составных частей сборочных единиц с допустимыми или предельными значениями. При этом для мастера-диагноста допустимые значения параметров технического состояния являются нормативными и позволяют делать общее заключение о состоянии объекта диагностирования, не проводя никаких расчетов. Так, если измеренное значение параметра больше допустимого (зазора в кривошипно-шатунном механизме, угара картерного масла, давления в масляной системе двигателя, зазора в подвижных сопряжениях и т.д.), то объект требует технического обслуживания или ремонта. Если же измеренное значение меньше допустимого или равно ему, то объект не требует технического обслуживания и ремонта до очередной проверки.

Для среднестатистического прогнозирования характерно то, что ресурс параметра технического состояния составных частей машин используется полностью только в том случае, если к моменту контроля он достигает предельных значений. В остальных случаях имеют место недоиспользование ресурса или отказ. Последнее является существенным недостатком среднестатистического

прогнозирования. Однако относительная простота и доступность этого метода делают его весьма распространенным.

Прогнозирование по реализации основано на выявлении скорости изменения параметров технического состояния сборочных единиц машин с помощью непосредственных измерений их значений и последующей обработки результатов с учетом изменения состояния одноименных составных частей. Цель такого прогнозирования - выявление остаточного ресурса конкретной сборочной единицы на момент контроля.

### 21.3. Хранение машин

*Хранение машин* представляет собой комплекс организационно-технических мероприятий, направленных на сохранение работоспособности машин после нерабочего периода. Если машина не подвергается специальной обработке к хранению, то при длительном бездействии ее детали медленно разрушаются.

Разрушению подвержены металлические части, резиновые детали (покрышки, камеры, транспортные ленты, шланги и др.), деревянные части, изоляция и различные поверхности. При неправильном хранении машин их естественный износ происходит очень интенсивно. Исследования показали, что коррозия незащищенных машин, неокрашенных и находящихся на открытом воздухе, может достигать  $200 \text{ г/м}^2$  в год.

Существует три способа хранения машин:

- закрытый;
- открытый;
- комбинированный.

При закрытом способе машины хранят в закрытых помещениях (гаражах, сараях). Это лучший способ хранения машин, так как в этом случае машины и их элементы надежно предохраняют от атмосферных и климатических воздействий. Однако закрытый способ требует больших капитальных вложений на хранение одной машины, что ограничивает его применение.

При открытом способе машины хранят на открытых оборудованных площадках с твердым покрытием или под навесом. При этом следует отметить, что навес существенно не улучшает условий хранения машин, так как мало

предохраняет их от воздействия атмосферных осадков.

Как показывает опыт, на открытых площадках можно добиться надлежащей сохранности машин. Но при этом обязательно надо соответствующим образом подготавливать машины и оборудовать открытые площадки необходимыми службами.

При комбинированном способе часть сложных и дорогих машин хранят в закрытых помещениях, а более простые - под навесом или на открытых площадках. Соотношение и виды машин, хранящихся открытым и закрытым способами, зависят от местных климатических условий, наличия закрытых помещений и в каждом отдельном случае определяется техническим руководством производственной организации.

В зависимости от продолжительности нерабочего периода машин различают:

- межсменное;
- кратковременное;
- длительное хранение.

*Межсменное хранение.* Машины хранят с перерывом в использовании до 10 дней. Организуют его на площадках сектора хранения машин производственной организации, пунктов ежесменного хранения машин или непосредственно на месте проведения работ.

Машины на межсменное хранение устанавливают непосредственно после окончания работ комплектно без снятия с них сборочных единиц и деталей. При подготовке машин к этому виду хранения выполняют ежесменное техническое обслуживание (ЕТО), закрывают все отверстия, щели и полости, через которые могут попасть атмосферные осадки во внутренние полости машин, устанавливают рычаги и педали механизма управления в положение, исключающее произвольное включение в работу машины и ее составных частей, и отключают аккумуляторные батареи. В холодное время года дополнительно сливают воду из системы охлаждения.

**Кратковременное хранение.** Машины, которые не используют от 10 дней до 2 мес, хранят на площадках сектора хранения, принадлежащего конкретной организации.

Машины устанавливают непосредственно после окончания работ комплектно без снятия с них сборочных единиц и деталей. При подготовке машин к кратковременному хранению, в процессе его проведения и при снятии машин с кратковременного хранения проводят техническое обслуживание.

**Техническое обслуживание** при подготовке к кратковременному хранению включает очистку и мойку, доставку машин на закрепленные места хранения, герметизацию отверстий, щелей и полостей от проникновения влаги и пыли, консервацию составных частей, установку машин на подставки или прокладки и отключение аккумуляторных батарей. При кратковременном хранении машин при низких температурах или более 1 мес транспортные ленты (полотняные и прорезиненные) и аккумуляторные батареи снимают и сдают на склад.

Техническое обслуживание в процессе кратковременного хранения и при снятии машины с него такое же, как при проведении аналогичных технических обслуживаний при длительном хранении.

**Длительное хранение.** Оно предусматривает хранение машин с перерывом в использовании более 2 мес. Территориально его организуют на площадках сектора хранения машин производственной организации. Машины на длительное хранение устанавливают не позднее 10 дней с момента окончания работ. Перед постановкой машин на длительное хранение проверяют их техническое состояние и при необходимости устраняют неисправности. На длительное хранение машины ставят только в исправном состоянии. При подготовке машин к длительному хранению в процессе его проведения и при снятии машин с длительного хранения проводят специальные технические обслуживания.

**Техническое обслуживание машин при подготовке к длительному хранению** включает очистку и мойку, консервацию внутренних поверхностей объектов (полостей, картеров, гидравлических и других циркуляционных систем), доставку на закрепленные места хранения, снятие с машин и подготовку сбо-

рочных единиц, подлежащих хранению, на специально оборудованных складах, герметизацию отверстий, щелей и полостей от проникновения влаги и пыли, консервацию наружных поверхностей машин и их составных частей, восстановление поврежденного лакокрасочного покрытия и установку машин на подставки или подкладки.

Очистка машин от грязи, пыли, подтеков нефтепродуктов - важная операция технического ухода как при эксплуатации, так и при подготовке их к хранению и при расконсервации. Грязь на деталях задерживает влагу и создает условия, благоприятные для возникновения коррозии. Защитную смазку нельзя наносить на неочищенные детали машины, так как коррозия в этом случае возникает под слоем смазки. Очищают машины на специальных моечных площадках, обеспечивающих нейтрализацию сточных вод.

Моют машины с помощью агрегатов для технического обслуживания АТО-А, АТО-С или АТО-П, используя одно из следующих моющих средств, для струйной очистки машин:

- МЛ-51; - лабомид-101; - лабомид-102; - МС-6 или МС-8.

Консервацию внутренних поверхностей картеров, емкостей, гидравлических, топливных и других циркуляционных систем проводят непосредственно после остановки машин. Эта операция включает в себя удаление старых масел и смазок, промывку полостей, в которых они находились, и заполнение их рабоче-консервационными маслами с последующей проработкой механизмов или проворачиванием движущихся частей (вручную или с помощью привода), а также прокачиванием рабоче-консервационного масла через консервируемые системы. Рабоче-консервационные масла готовят непосредственно в производственных организациях, добавляя 5% присадки АКОР-1 (ингибитора коррозии) к требуемому количеству рабочего масла, заливаемого в картеры или другие емкости или системы. Приготавливают консервационные масла в отдельных емкостях, тщательно смешивая рабочие масла с маслорастворимым ингибитором коррозии при температуре не более 60 °С. Окончание перемешивания определяют по однородности смеси.

Консервируют внутренние поверхности изделий с помощью агрегатов АТО-А, АТО-П, АТО-С. Последние обеспечивают сбор отработанных масел и подачу консервационных масел и смазок в корпуса, картеры и циркуляционные системы.

Снятие с машин сборочных единиц проводят при хранении машин на открытых площадках. Снимают следующие составные части:

- электрооборудование;
- втулочно-роликовые цепи;
- приводные ремни;
- составные части из резины;
- полимерных материалов и текстиля (шланги гидросистем, трубопроводы, тенты, мягкие сиденья, полотняно-планчатые транспортеры и др.);
- стальные тросы;
- инструменты и приспособления.

К снятым составным частям прикрепляют бирки с указанием инвентарного номера машины.

При хранении машин в закрытом помещении допускается снимать с машин составные части (кроме аккумуляторных батарей) не снимать с машин при условии их консервации и герметизации.

Сборочные единицы, снятые с машины, подготавливают и сдают на склад.

Электрооборудование (фары, генератор, стартер, магнето, аккумуляторные батареи) очищают, обдувают сжатым воздухом, клеммы покрывают защитной смазкой. Аккумуляторные батареи полностью заливают электролитом, проводят контрольно-тренировочный цикл, затем насухо протирают, закрывают отверстия крышек баков пробками и ставят на хранение в неотапливаемое вентилируемое помещение. В период хранения ежемесячно проверяют плотность электролита при плотности электролита ниже  $1,23 \text{ г/см}^3$ , при температуре хранения ниже  $0^\circ\text{C}$  или при плотности электролита менее  $1,12 \text{ г/см}^3$ , при температуре выше  $0^\circ\text{C}$  аккумуляторные батареи подзаряжают.

Втулочно-роликовые цепи очищают и промывают от грязи, проваривают не менее 20 мин в подогретом до температуры ВО...90°C моторном масле, просушивают в ванне с сетчатым дном и после стекания остатков масла цепи свертывают в рулоны, укладывают в ящики и сдают для хранения на склад.

Стальные тросы очищают от грязи, смазывают, наматывают на барабаны или сматывают в бухты и отправляют на склад для хранения. Канаты очищают от грязи металлическими щетками или специальными приспособлениями.

В корпусе такого приспособления установлено разъемное кольцо, профилированное по сечению очищаемого троса. Трос протягивают через это приспособление или, наоборот, приспособление перемещают относительно заправленного в него троса. Смазывают обычно с помощью механизированной установки, пропуская трос через ванну с подогретой смазкой.

Части из резины и текстиля, снимаемые с машин на период хранения, должны храниться на складе с малой естественной освещенностью и с принудительной или естественной циркуляцией воздуха.

Перед хранением составные части из резины очищают от грязи, промывают теплой мыльной водой, обдувают воздухом и укладывают на стеллажи, соблюдая при этом определенные специфические правила.

Если резиновые изделия соприкасаются по значительным поверхностям (хранение покрышек совместно с камерами, листовой резины и т. п.), их пересыпают и протирают тальком. Пневматические шины со слегка накаченными камерами и сами камеры хранят на стеллажах в вертикальном положении. Резиновые шланги и рукава со спиралью укладывают на стеллажи во всю длину. Шланги, рукава и трубки без спирали, а также транспортерные ленты свертывают в бухту. Приводные ремни помещают на вешалках. Резиновые изделия хранят в специально затененных подвальных или полуподвальных помещениях при температуре воздуха 5...15°C и относительной влажности 50...80%.

Пневматические шины разрешается хранить на машинах в разгруженном состоянии, установленных на подставках. Давление в шинах при закрытом и открытом хранении снижают до 70% нормального. Поверхности пневматических

шин, оставленных на машинах, покрывают мелоказеиновым составом или алюминиевой краской АКС-3 или АКС-4. Мелоказеиновый состав готовят непосредственно перед окрашиванием. В него входят неочищенный мел (75%), казеиновый клей (20%), гашеная известь (4,5%), кальцинированная сода (0,25%) и фенол (0,25%). 1 кг компонентов растворяют в 2,5 л теплой воды, состав наносят кистью в два слоя.

Гибкие шланги гидросистем также разрешается хранить на машине. При этом их покрывают защитным составом.

Герметизации подлежат отверстия, образовавшиеся после снятия составных частей машин, а также различные щели и полости (заливные горловины баков и редукторов, заслонки карбюраторов, отверстия сапунов, выхлопные трубы двигателей и др.). При этом их плотно закрывают крышками, пробками, заглушками и другими специальными устройствами.

Для свободного выхода воды из систем охлаждения и конденсата сливные устройства оставляют открытыми. Капоты и двери кабин плотно закрывают и опломбировывают.

Поврежденные лакокрасочные покрытия подкрашивают. Перед окраской поверхности металлических деталей очищают от ржавчины, жировых пятен и старой поврежденной краски. Зачищенные поверхности обезжиривают и затем окрашивают в тот же цвет.

Консервацию наружных поверхностей рабочих органов, деталей и механизмов передач, узлов трения и трансмиссий, штоков гидроцилиндров, шлицевых соединений, карданных валов, подшипников, звездочек, цепных передач, винтовых и резьбовых соединений и внешне сопрягаемых механически обработанных поверхностей машин проводят непосредственно перед постановкой на место длительного хранения. Для консервации наружных поверхностей машин и отдельных сборочных единиц используют микровосковой состав марок ЗВВД-13 (на водной основе) и ПЭВ-74 (на органической основе), битум нефтяной строительный и рабоче-консервационные масла.

Срок защитного действия микровосковых составов ЗВД-13 и ПЭВ-74 при открытом хранении до 12 мес. Битум растворяют в любом неэтилированном бензине в соотношении 1:2 или 1:3 и добавляют 1...2% олифы. Срок защитного действия при открытом хранении 10...12 мес. Срок защитного действия рабочие-консервационных масел 12 мес.

Машины устанавливают на подставки или подкладки в положение, исключающее перекос и изгиб рам и других сборочных единиц и обеспечивающее разгрузку пневматических колес и рессор.

Для навесных и полунавесных машин должны быть специальные подставки, обеспечивающие устойчивость при хранении и удобство при навешивании.

Между шинами и опорной поверхностью должен быть просвет 8...10 см. Рычаги и педали механизма управления устанавливают в положение, исключающее произвольное включение в работу машин и их составных частей.

Наружные детали, цепи, канаты, ремни, пружины по возможности освобождают от нагрузок.

Рукояти и стрелы одноковшовых экскаваторов и кранов укладывают на специальные стойки и козлы.

***Техническое обслуживание во время хранения машин*** включает проверку:

- правильности установки машин на подставках или подкладках, комплектности (с учетом снятых составных частей машины, хранящихся на складе);
- давления воздуха в шинах; надежности герметизации отверстий, щелей и полостей;
- состояния антикоррозионных покрытий и состояния защитных устройств (целостность и прочность крепления).

Правильность хранения машин на открытых площадках и под навесами проверяют не реже 1 раза в 2 мес, а после сильного ветра, снегопада и обильного дождя - не позднее следующего дня.

В закрытых помещениях машины проверяют не реже 2 раз за время хранения.

***Техническое обслуживание при снятии машин с хранения*** включает:

- снятие их с подставок;
- очистку и при необходимости расконсервацию (рабоче-консервационные масла в картерах, емкостях и системах оставляют для дальнейшего их использования в эксплуатации машин);
- снятие герметизирующих устройств;
- установку на машины снятых сборочных единиц;
- регулировку составных частей и машины в целом;
- а также очистку, консервацию и сдачу на склад подставок, заглушек, чехлов, бирок и т. п.

Машины после длительного хранения осматривает специальная комиссия с последующим закреплением за ними машинистов и соответствующим оформлением паспортов.

Сектор хранения машин размещают на территории эксплуатационной базы производственной организации. В нем располагают: закрытые помещения, навесы и открытые оборудованные площадки для хранения машин, а также для сборки и регулировки машин и комплектования сборочных единиц; склад для хранения составных частей, снимаемых с машин; площадки для списанных и подлежащих списанию машин; оборудованные посты очистки и мойки машин, а также для нанесения антикоррозионных покрытий; грузоподъемное оборудование, механизмы, приспособления и подставки для установки машин и снятия их с хранения; противопожарное оборудование и инвентарь, освещение и ограждение.

При выборе мест хранения учитывают природно-климатические особенности - направление господствующих ветров (направление ветра должно быть вдоль машин), обеспечение отвода дождевых и талых вод (уклон должен быть не менее 3°) и др.

Согласно Правилам противопожарной безопасности места хранения техники располагают не ближе 50м от жилых и производственных зданий и не более 150м от хранения огнеопасных материалов. Обычно такие места защищают от

снежных заносов со стороны ветров лесопосадками из мелколиственных деревьев и кустарников. Возможно и ограждение мест хранения машин.

**Открытые площадки для хранения машин** располагают на незатапливаемых участках. По их периметру создают водоотводные канавы, поверхность площадок должна быть ровной, с уклоном 2...3° для стока воды, с твердым сплошным или в виде отдельных полос (асфальтовое, бетонное или из местных строительных материалов) покрытием, способным выдерживать нагрузку передвигающихся и находящихся на хранении машин.

Машины хранят на обозначенных местах по группам, видам и маркам, с соблюдением расстояний между ними и между рядами. На открытых площадках минимальные расстояния между машинами в ряду должны быть не менее 0,7 м, а расстояние между самими рядами - не менее 6 м. Ширина полос зависит от габаритов и способов установки машин. Как правило, ширина полос при однорядном размещении на них машин 2...5 м, а при двухрядном - 4...10 м.

Закрытые помещения должны быть приспособлены для заезда в них сложной крупногабаритной техники и обеспечивать изоляцию хранящихся машин от атмосферных осадков.

При хранении машин в закрытых помещениях расстояние между машинами в ряду и от машин до стены помещения должно быть не менее 0,7 м, а минимальное расстояние между рядами 1 м.

Площадку для мойки машин, как правило, размещают вне зоны хранения машин. Она должна быть рассчитана на заезд крупногабаритных технологических машин и иметь эстакаду, насосную станцию с моечной установкой, грязеотстойник с бензомаслоуловителем и маслобензосборный колодец.

### Контрольные вопросы.

1. Что необходимо делать при замене масел?
2. Какие эффективные моющие средства вы знаете?
3. Как влияет на надежность машин качество применяемых смазочных материалов?
4. Что является одним из основных условий обеспечения заданного уровня безотказности и долговечности машин и оборудования?
5. Что такое техническое диагностирование и основная его цель?
6. Как осуществляются субъективные методы диагностирования?
7. Что дают объективные методы диагностирования?
8. Что такое прямое и косвенное диагностирование?
9. Как и для чего проводится прогнозирование технического состояния?
10. На чем основано среднестатистическое диагностирование?
11. Перечислите способы хранения машин.
12. Что включает в себя техническое обслуживание во время хранения машин?

## ПРИЛОЖЕНИЯ

### Приложение 1. Таблица 1

Дифференциальная функция (функция плотности вероятности)

закона нормального распределения.  $f_0 = (t_{\text{сп}}^{\text{ин}} - T_{\text{сп}}) / \sigma$

$f_0$	Сотые доли									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0,0	0,40	40	40	40	40	40	40	40	40	40
0,1	0,40	40	40	40	40	40	39	39	39	39
0,2	0,39	39	39	39	39	39	39	39	39	39
0,3	0,38	38	38	38	38	38	37	37	37	37
0,4	0,37	37	37	36	36	36	36	36	36	35
0,5	0,35	35	35	35	35	34	34	34	34	34
0,6	0,33	33	33	33	33	32	32	32	32	31
0,7	0,31	31	31	31	30	30	30	30	29	29
0,8	0,29	29	29	28	28	28	28	27	27	27
0,9	0,27	26	26	26	26	25	25	25	25	24
1,0	0,24	24	24	24	23	23	23	23	22	22
1,1	0,22	22	21	21	21	21	20	20	20	20
1,2	0,19	19	19	19	19	18	18	18	18	17
1,3	0,17	17	17	17	16	16	16	16	15	15
1,4	0,15	15	15	14	14	14	14	14	13	13
1,5	0,13	13	13	12	12	12	12	12	12	11
1,6	0,11	11	11	11	10	10	10	10	10	10
1,7	0,09	09	09	09	09	09	09	08	08	08
1,8	0,08	08	08	08	07	07	07	07	07	07
1,9	0,07	06	06	06	06	06	06	06	06	06
2,0	0,05	05	05	05	05	05	05	05	05	05
2,1	0,04	04	04	04	04	04	04	04	04	04
2,2	0,04	04	03	03	03	03	03	03	03	03
2,3	0,03	03	03	03	03	03	03	02	02	02
2,4	0,02	02	02	02	02	02	02	02	02	02
2,5	0,02	02	02	02	02	02	02	02	01	01
2,6	0,01	01	01	01	01	01	01	01	01	01
2,7	0,01	01	01	01	01	01	01	01	01	01
2,8	0,01	01	01	01	01	01	01	01	01	01
2,9	0,01	01	01	01	01	01	01	01	01	01
3,0	0,00	00	00	00	00	00	00	00	00	00

где  $t$  - любое значение опытных данных. При интервальной обработке опытных данных (разбивка опытных данных на интервалы) для определения данной функции за  $t$  принимается значение *середины*  $i$  – го интервала:  $t = t_{\text{сп}}^{\text{ин}}$

## Приложение 2. Таблица 2

Интегральная функция (функция распределения)  
закона нормального распределения

$$F_o = (t_{\text{кон}}^{\text{ин}} - T_{\text{ср}}) / \sigma$$

F <sub>o</sub>	Сотые доли									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0,0	0,50	50	51	51	52	52	52	53	53	54
0,1	0,54	54	55	55	56	56	56	57	57	58
0,2	0,58	58	59	59	60	60	60	61	61	61
0,3	0,62	62	63	63	63	64	64	64	65	65
0,4	0,66	66	66	67	67	67	68	68	68	69
0,5	0,69	70	70	71	71	71	71	72	72	72
0,6	0,73	73	73	74	74	74	75	75	75	75
0,7	0,76	76	76	77	77	77	78	78	78	79
0,8	0,79	79	79	80	80	80	81	81	81	81
0,9	0,82	82	82	82	83	83	83	83	84	84
1,0	0,84	84	85	85	85	85	86	86	86	86
1,1	0,86	87	87	87	87	88	88	88	88	88
1,2	0,89	89	89	89	89	89	90	90	90	90
1,3	0,90	91	91	91	91	91	91	92	92	92
1,4	0,92	92	92	92	93	93	93	93	93	93
1,5	0,93	93	94	94	94	94	94	94	94	94
1,6	0,95	95	95	95	95	95	95	95	95	96
1,7	0,96	96	96	96	96	96	96	96	96	96
1,8	0,96	97	97	97	97	97	97	97	97	97
1,9	0,97	97	97	97	97	97	98	98	98	98
2,0	0,98	98	98	98	98	98	98	98	98	98
2,1	0,98	98	98	98	98	98	98	99	99	99
2,2	0,99	99	99	99	99	99	99	99	99	99
2,3	0,99	99	99	99	99	99	99	99	99	99
2,4	0,99	99	99	99	99	99	99	99	99	99
2,5	0,99	99	99	99	99	99	1,00	1,00	1,00	1,00

где t - любое значение опытных данных.

При интервальной обработке опытных данных (разбивка опытных данных на интервалы) для построения данной функции за t принимается значение **конца** i – го интервала.

$$t = t_{\text{кон}}^{\text{ин}}$$

### Приложение 3. Таблица 3

Дифференциальная функция (функция плотности вероятности)

закона распределения Вейбулла.  $f_o = 0,9 (t_{cp}^{III} - C) / (T_{cp} - C)$

f <sub>o</sub>	Значение параметра " b "										
	1,5	1,6	1,8	2,0	2,2	2,4	2,6	2,8	3,0	3,2	3,5
0,1	0,46	0,39	0,28	0,20	0,17	0,13	0,10	0,06	0,03	0,01	0,00
0,2	0,61	0,57	0,47	0,38	0,33	0,28	0,23	0,17	0,12	0,07	0,00
0,3	0,70	0,67	0,61	0,55	0,49	0,43	0,38	0,32	0,26	0,20	0,12
0,4	0,74	0,73	0,71	0,68	0,63	0,59	0,54	0,49	0,45	0,40	0,34
0,5	0,74	0,76	0,78	0,78	0,77	0,73	0,71	0,68	0,66	0,63	0,59
0,6	0,73	0,76	0,80	0,84	0,85	0,85	0,86	0,86	0,87	0,87	0,89
0,7	0,70	0,73	0,80	0,86	0,89	0,93	0,97	1,00	1,04	1,08	1,13
0,8	0,66	0,70	0,77	0,84	0,90	0,96	1,03	1,09	1,15	1,21	1,31
0,9	0,61	0,65	0,72	0,80	0,87	0,95	1,02	1,09	1,17	1,24	1,36
1,0	0,54	0,59	0,66	0,74	0,81	0,88	0,96	1,03	1,10	1,17	1,28
1,1	0,49	0,53	0,59	0,66	0,72	0,78	0,84	0,90	0,96	1,02	1,11
1,2	0,44	0,47	0,52	0,57	0,61	0,65	0,69	0,73	0,77	0,81	0,87
1,3	0,39	0,41	0,45	0,48	0,49	0,51	0,53	0,54	0,56	0,58	0,60
1,4	0,33	0,35	0,38	0,39	0,39	0,39	0,38	0,38	0,38	0,37	0,36
1,5	0,29	0,30	0,31	0,32	0,30	0,28	0,27	0,25	0,23	0,21	0,18
1,6	0,25	0,25	0,26	0,25	0,23	0,20	0,18	0,15	0,13	0,11	0,07
1,7	0,21	0,21	0,21	0,19	0,16	0,14	0,11	0,09	0,06	0,03	0,00
1,8	0,17	0,16	0,16	0,14	0,12	0,10	0,07	0,05	0,03	0,01	
1,9	0,15	0,14	0,13	0,10	0,08	0,06	0,05	0,03	0,01	0,00	
2,0	0,13	0,12	0,10	0,07	0,06	0,04	0,03	0,01	0,00		
2,1	0,10	0,09	0,07	0,05	0,04	0,03	0,02	0,01			
2,2	0,09	0,08	0,05	0,04	0,03	0,02	0,01	0,00			
2,3	0,07	0,06	0,04	0,02	0,01	0,00	0,00				
2,4	0,06	0,05	0,03	0,02	0,01	0,00					
2,5	0,05	0,04	0,02	0,01	0,00						

**Приложение 4. Таблица 4**

Интегральная функция (функция распределения) закона Вейбулла

$$F(t) = \left( \frac{0,9 (t_{Ki} - C)}{T_{cp} - C} \right)^b$$

F(t)	Значение параметра "b"												
	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0	2,1	2,2
0,1	0,10	0,08	0,06	0,05	0,04	0,03	0,03	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01
0,2	0,18	0,16	0,14	0,12	0,10	0,09	0,07	0,06	0,05	0,05	0,04	0,03	0,03
0,3	0,26	0,23	0,21	0,19	0,17	0,15	0,14	0,12	0,11	0,10	0,09	0,08	0,07
0,4	0,33	0,31	0,28	0,26	0,24	0,22	0,21	0,19	0,18	0,16	0,15	0,14	0,12
0,5	0,39	0,37	0,35	0,33	0,32	0,30	0,28	0,27	0,25	0,24	0,22	0,21	0,20
0,6	0,45	0,43	0,42	0,40	0,39	0,37	0,36	0,34	0,33	0,32	0,30	0,29	0,28
0,7	0,50	0,49	0,48	0,47	0,46	0,44	0,43	0,43	0,41	0,40	0,39	0,38	0,37
0,8	0,55	0,54	0,54	0,53	0,52	0,51	0,50	0,50	0,49	0,48	0,47	0,47	0,46
0,9	0,59	0,59	0,59	0,58	0,58	0,57	0,57	0,57	0,56	0,56	0,56	0,55	0,55
1,0	0,63	0,63	0,63	0,63	0,63	0,63	0,63	0,63	0,63	0,63	0,63	0,63	0,63
1,1	0,67	0,67	0,67	0,68	0,68	0,68	0,69	0,69	0,70	0,70	0,70	0,71	0,71
1,2	0,70	0,71	0,71	0,72	0,73	0,73	0,74	0,74	0,75	0,76	0,76	0,77	0,78
1,3	0,73	0,74	0,75	0,76	0,76	0,77	0,78	0,79	0,80	0,81	0,82	0,82	0,83
1,4	0,75	0,77	0,78	0,79	0,80	0,81	0,82	0,83	0,84	0,85	0,86	0,87	0,88
1,5	0,78	0,79	0,80	0,82	0,83	0,84	0,85	0,86	0,87	0,89	0,90	0,90	0,91
1,6	0,80	0,81	0,83	0,84	0,86	0,87	0,88	0,89	0,90	0,91	0,92	0,93	0,94
1,7	0,82	0,83	0,85	0,86	0,88	0,89	0,90	0,92	0,93	0,94	0,94	0,95	0,96
1,8	0,84	0,85	0,87	0,88	0,90	0,91	0,92	0,93	0,94	0,95	0,96	0,97	0,97
1,9	0,85	0,87	0,89	0,90	0,91	0,93	0,94	0,95	0,96	0,97	0,97	0,98	0,98
2,0	0,87	0,88	0,90	0,92	0,93	0,94	0,95	0,96	0,97	0,98	0,98	0,99	0,99
2,1	0,88	0,90	0,91	0,93	0,94	0,95	0,96	0,97	0,98	0,98	0,99	0,99	0,99
2,2	0,89	0,91	0,92	0,94	0,95	0,96	0,97	0,98	0,98	0,99	0,99	0,99	1,00
2,3	0,90	0,92	0,93	0,95	0,96	0,97	0,98	0,99	0,99	0,99	0,99	1,00	
2,4	0,91	0,93	0,94	0,96	0,97	0,98	0,98	0,99	0,99	0,99	1,00		
2,5	0,92	0,94	0,95	0,96	0,97	0,98	0,99	0,99	0,99	1,00			
2,6	0,93	0,94	0,96	0,97	0,98	0,99	0,99	0,99	1,00				
2,7	0,93	0,95	0,96	0,97	0,98	0,99	0,99	1,00					
2,8	0,94	0,96	0,97	0,98	0,99	0,99	0,99	1,00					
2,9	0,95	0,96	0,97	0,98	0,99	0,99	1,00						
3,0	0,95	0,97	0,98	0,99	0,99	0,99	1,00						

**Продолжение Приложение 4. Таблица 4**

Интегральной функции закона распределения Вейбулла.

F(t)	Значение параметра "b"									
	2,3	2,4	2,5	2,6	2,7	2,8	2,9	3,0	3,1	3,2
0,1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,2	0,02	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
0,3	0,06	0,05	0,05	0,04	0,04	0,03	0,03	0,03	0,02	0,02
0,4	0,11	0,10	0,10	0,09	0,08	0,07	0,07	0,06	0,06	0,05
0,5	0,18	0,17	0,16	0,15	0,14	0,13	0,13	0,12	0,11	0,10
0,6	0,27	0,25	0,24	0,23	0,22	0,21	0,20	0,19	0,19	0,18
0,7	0,36	0,35	0,34	0,33	0,32	0,31	0,30	0,29	0,28	0,27
0,8	0,45	0,44	0,44	0,43	0,42	0,41	0,41	0,40	0,39	0,39
0,9	0,54	0,54	0,54	0,53	0,53	0,53	0,52	0,52	0,51	0,51
1,0	0,63	0,63	0,63	0,63	0,63	0,63	0,63	0,63	0,63	0,63
1,1	0,71	0,72	0,72	0,72	0,73	0,73	0,73	0,74	0,74	0,74
1,2	0,78	0,79	0,79	0,80	0,81	0,81	0,82	0,82	0,83	0,83
1,3	0,84	0,85	0,85	0,86	0,87	0,88	0,88	0,89	0,90	0,90
1,4	0,89	0,89	0,90	0,91	0,92	0,92	0,93	0,94	0,94	0,95
1,5	0,92	0,93	0,94	0,94	0,95	0,96	0,96	0,97	0,97	0,97
1,6	0,95	0,95	0,96	0,97	0,97	0,98	0,98	0,98	0,99	0,99
1,7	0,97	0,97	0,98	0,98	0,98	0,99	0,99	0,99	0,99	1,00
1,8	0,98	0,98	0,99	0,99	0,99	0,99	1,00	1,00	1,00	
1,9	0,99	0,99	0,99	1,00	1,00	1,00				
2,0	0,99	0,99	1,00							
2,1- 3,0	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00

где  $t$  - любое значение опытных данных.  $C$  – величина смещения опытных данных.

При интервальной обработке опытных данных (разбивка опытных данных на интервалы)

для определения данной функции за  $t$  принимается значение

конца  $i$  – го интервала:  $t = t_{k(i)}$

**Приложение 5. Таблица 5**

Параметр " b" закона распределения Вейбулла

Значение V	0,68	0,64	0,61	0,58	0,55	0,52	0,50	0,48	0,46	0,44	0,43
Параметр b	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0	2,1	2,2	2,3	2,4	2,5
Значение V	0,41	0,40	0,39	0,38	0,36	0,35	0,34	0,33	0,32	0,31	
Параметр b	2,6	2,7	2,8	2,9	3,0	3,1	3,2	3,3	3,4	3,5	

**Приложение 6. Таблица 6**

Значение коэффициента Ирвина  $\lambda_{\text{табл}}$

Повторность информации	25	30	35	40	45	50	100
Коэффициент $\lambda_{\text{табл}}$	1,25	1,2	1,18	1,15	1,13	1,1	1

**Приложение 7. Таблица 7**

Вероятность совпадения Р % по критерию согласия  $\chi^2$

№ строки	Р %	95	90	80	70	50	30	20	10
1	$\chi^2_{\text{теор}}$	0,00	0,02	0,06	0,15	0,45	1,07	1,64	2,71
2		0,10	0,21	0,45	0,71	1,39	2,41	3,22	4,60
3		0,35	0,58	1,00	1,42	2,37	3,66	4,64	6,25
4		0,71	1,06	1,65	2,20	3,36	4,88	5,99	7,78
5		1,14	1,61	2,34	3,00	4,35	6,06	7,29	9,24
6		1,64	2,20	3,07	3,83	5,35	7,23	8,56	10,6

**Приложение 8. Таблица 8**

Значение коэффициента Стьюдента в зависимости от различных значений доверительной вероятности  $\beta$

Число информации	Доверительная вероятность $\beta$					
	0,7	0,8	0,9	0,95	0,98	0,99
	Коэффициент Стьюдента $t_k$					
3	1,336	1,886	2,920	4,30	6,96	9,92
5	1,190	1,533	2,130	2,77	3,75	4,60
8	1,119	1,415	1,895	2,36	3,00	3,50
10	1,100	1,383	1,833	2,26	2,82	3,25
12	1,088	1,363	1,796	2,20	2,72	3,11
15	1,076	1,345	1,761	2,14	2,62	2,98
20	1,066	1,328	1,729	2,09	2,54	2,86
25	1,059	1,318	1,711	2,06	2,49	2,80
30	1,055	1,310	1,697	2,04	2,46	2,75
40	1,050	1,303	1,684	2,02	2,42	2,70
50	1,048	1,294	1,676	2,01	2,40	2,68
60	1,046	1,296	1,671	2,00	2,39	2,66
70	1,046	1,294	1,668	1,99	2,38	2,65
80	1,045	1,290	1,664	1,98	2,37	2,64
100	1,044	1,284	1,657	1,97	2,36	2,64

### Приложение 9. Таблица 9

Квантили закона нормального распределения  $N_K$

F(t), $\sum P_i$	Сотые доли									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0,5	0,000	0,025	0,050	0,075	0,100	0,126	0,151	0,176	0,202	0,227
0,6	0,253	0,279	0,305	0,332	0,358	0,385	0,412	0,440	0,468	0,496
0,7	0,524	0,553	0,583	0,613	0,643	0,675	0,706	0,739	0,772	0,806
0,8	0,842	0,878	0,915	0,954	0,994	1,036	1,080	1,126	1,175	1,227
0,9	1,282	1,341	1,405	1,476	1,555	1,645	1,751	1,881	2,054	2,326

### Приложение 10. Таблица 10

Квантили закона распределения Вейбулла  $N_K^B$

F(t), $\sum P_i$	Значение параметра "b"											
	1,5	1,6	1,8	2,0	2,2	2,4	2,6	2,8	3,0	3,2	3,5	4,0
0,01	0,05	0,06	0,08	0,10	0,12	0,15	0,17	0,20	0,22	0,24	0,27	0,31
0,03	0,10	0,11	0,14	0,18	0,21	0,23	0,26	0,28	0,31	0,34	0,37	0,42
0,05	0,14	0,16	0,19	0,23	0,26	0,29	0,31	0,34	0,37	0,40	0,43	0,48
0,07	0,17	0,19	0,23	0,25	0,30	0,33	0,36	0,39	0,42	0,45	0,47	0,52
0,10	0,22	0,25	0,29	0,33	0,36	0,37	0,41	0,44	0,47	0,50	0,53	0,57
0,15	0,30	0,33	0,38	0,42	0,45	0,48	0,50	0,53	0,56	0,59	0,60	0,63
0,20	0,37	0,39	0,44	0,47	0,50	0,53	0,55	0,58	0,61	0,63	0,65	0,69
0,25	0,44	0,46	0,50	0,54	0,58	0,61	0,63	0,65	0,66	0,68	0,70	0,73
0,30	0,50	0,53	0,56	0,60	0,62	0,64	0,67	0,69	0,71	0,73	0,75	0,77
0,35	0,57	0,59	0,62	0,66	0,68	0,69	0,71	0,73	0,75	0,77	0,79	0,81
0,40	0,64	0,66	0,69	0,72	0,73	0,75	0,76	0,78	0,80	0,81	0,83	0,85
0,45	0,71	0,73	0,75	0,76	0,78	0,80	0,81	0,83	0,84	0,84	0,86	0,88
0,50	0,78	0,80	0,82	0,83	0,84	0,85	0,86	0,88	0,89	0,89	0,90	0,91
0,55	0,86	0,87	0,89	0,90	0,90	0,91	0,91	0,92	0,93	0,93	0,94	0,95
0,60	0,94	0,95	0,95	0,96	0,96	0,96	0,97	0,97	0,97	0,98	0,98	0,98
0,65	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,02	1,02	1,02	1,02	1,02	1,02
0,70	1,13	1,12	1,11	1,10	1,10	1,09	1,08	1,07	1,06	1,06	1,05	1,05
0,75	1,25	1,23	1,21	1,18	1,17	1,16	1,14	1,12	1,11	1,11	1,10	1,09
0,80	1,37	1,35	1,30	1,27	1,25	1,23	1,21	1,19	1,17	1,16	1,15	1,13
0,85	1,55	1,51	1,45	1,39	1,37	1,34	1,31	1,28	1,25	1,23	1,21	1,18
0,90	1,74	1,68	1,59	1,52	1,47	1,43	1,40	1,36	1,32	1,29	1,27	1,23
0,93	1,92	1,84	1,72	1,63	1,58	1,53	1,48	1,43	1,39	1,35	1,32	1,28
0,95	2,08	1,99	1,84	1,73	1,67	1,61	1,55	1,50	1,44	1,41	1,37	1,32
0,97	2,31	2,19	2,01	1,87	1,80	1,73	1,65	1,58	1,52	1,47	1,43	1,37
0,99	2,77	2,60	2,34	2,15	2,05	1,95	1,84	1,75	1,66	1,61	1,55	1,46

**Приложение 11. Таблица 11**

Таблица квантилей закона распределения Вейбулла -  $H_K^B$  (сокращенная)

F(t); $\Sigma P_i$	Значение параметра "b"												
	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0	2,1	2,2
0,025	0,02	0,04	0,02	0,04	0,07	0,09	0,10	0,11	0,13	0,16	0,19	0,20	0,21
0,05	0,05	0,07	0,08	0,10	0,12	0,14	0,16	0,17	0,19	0,21	0,23	0,23	0,24
0,075	0,07	0,09	0,11	0,13	0,15	0,17	0,19	0,21	0,23	0,25	0,27	0,28	0,29
0,10	0,11	0,13	0,15	0,18	0,20	0,22	0,25	0,27	0,29	0,31	0,33	0,35	0,36
0,90	2,30	2,13	2,00	1,90	1,81	1,74	1,68	1,63	1,59	1,55	1,52	1,50	1,48
0,925	2,66	2,43	2,26	2,12	2,01	1,92	1,84	1,78	1,72	1,67	1,63	1,60	1,57
0,95	3,00	2,71	2,49	2,33	2,19	2,08	1,99	1,91	1,84	1,78	1,73	1,69	1,65
0,975	3,51	3,13	2,84	2,63	2,45	2,31	2,19	2,09	2,01	1,94	1,87	1,83	1,78
0,995	4,60	4,01	3,57	3,24	2,98	2,77	2,60	2,46	2,34	2,23	2,15	2,09	2,03
F(t); $\Sigma P_i$	Значение параметра "b"												
	2,3	2,4	2,5	2,6	2,7	2,8	2,9	3,0	3,1	3,2			
0,025	0,22	0,23	0,24	0,25	0,26	0,27	0,28	0,29	0,32	0,34			
0,05	0,26	0,28	0,31	0,32	0,34	0,35	0,36	0,37	0,38	0,39			
0,075	0,31	0,33	0,35	0,36	0,37	0,38	0,40	0,42	0,44	0,45			
0,10	0,37	0,39	0,41	0,42	0,44	0,45	0,46	0,47	0,49	0,51			
0,90	1,45	1,42	1,40	1,38	1,37	1,35	1,33	1,32	1,29	1,25			
0,925	1,52	1,50	1,48	1,46	1,45	1,44	1,41	1,39	1,37	1,34			
0,95	1,61	1,58	1,55	1,53	1,51	1,48	1,46	1,44	1,41	1,38			
0,975	1,69	1,67	1,65	1,62	1,59	1,56	1,54	1,52	1,49	1,46			
0,995	1,97	1,90	1,84	1,80	1,76	1,72	1,69	1,66	1,63	1,42			

**Приложение 12. Таблица 12**

Коэффициенты  $\Gamma_1$  и  $\Gamma_3$  для двухсторонних доверительных границ

Число информации N	Доверительная величина $\beta$					
	$\beta = 0,8$		$\beta = 0,9$		$\beta = 0,95$	
	$\Gamma_1$	$\Gamma_3$	$\Gamma_1$	$\Gamma_3$	$\Gamma_1$	$\Gamma_3$
20	1,37	0,77	1,51	0,72	1,64	0,67
25	1,33	0,79	1,44	0,74	1,55	0,70
30	1,29	0,80	1,39	0,76	1,48	0,72
40	1,24	0,83	1,32	0,78	1,40	0,75
50	1,21	0,84	1,28	0,80	1,35	0,77
60	1,19	0,86	1,25	0,82	1,31	0,79
70	1,18	0,86	1,23	0,83	1,29	0,80
80	1,16	0,87	1,21	0,84	1,27	0,81
100	1,14	0,88	1,19	0,86	1,23	0,83

## Библиографический список

1. Александровская Л.Н. и др. Современные методы обеспечения безотказности сложных технических систем./ Учебное пособие. М.: Логос. 2001. С. 208.
2. Апатенко А.С. Контроль деталей транспортных и технологических комплексов./ Учебное пособие для студентов высших учебных заведений. Том Измерение и контроль линейных размеров. Москва, 2007. С. 107.
3. Апатенко А.С. Ремонт цилиндров и гильз двигателей внутреннего сгорания./ Методические рекомендации / Москва, 2011. - 30с.
4. Апатенко А.С., Быков В.В., Голубев И.Г., Евграфов В.А., Голубев М.И. Технология и организация восстановления деталей и сборочных единиц при сервисном сопровождении./ Учебное пособие. Том Часть 1. Москва, 2017. С.144.
5. Апатенко А.С. Разработка технологических процессов восстановления изношенных деталей машин природообустройства./ Методические указания. Москва. 2013. С. 61.
6. Бочаров В.С., Волков Д.П. Основы качества и надежности строительных машин. М.: Машиностроение, 2003. С. 254.
7. Богомолов А.А., Бунин М.В., Севрюгина Н.С. Структура и семантика вариационной оптимизации транспортных машин и технологических процессов в общей теории систем. / Монография. Белгород, 2009. С. 82.
8. Белобрагин, В.Я. Основы технического регулирования / В.Я. Белобрагин. – Учебное пособие. Стандарты и качество. Москва. 2005. С.320.
9. Берновский, Ю.Н. Стандартизация: Учебное пособие / Ю.Н. Берновский. - М.: Форум, 2012. - 368 с.
10. Вдовин С.М. Система менеджмента качества организации: [учеб.пособие] / С.М. Вдовин, Т.А. Салимова, Л.И. Бирюкова. - М.: ИН-ФРА-М, 2012 - 297 с.
11. Гличев А.В. Основы управления качеством продукции. М.: Изд. «Стандарты и качество», 2001. 418 с.
12. ГОСТ 27.002-15. Надежность в технике. М.: Изд-во стандартов.1990. 12с.
13. ГОСТ 8.513-84 ГСИ. Поверка средств измерений. Организация и порядок проведения.

14. ГОСТ Р 40.001-95. Правила по проведению сертификации систем качества в РФ.
15. ГОСТ Р 1.0-2004. Стандартизация в РФ. Основные положения.
16. ГОСТ Р 27.403-2009. Государственная система обеспечения единства измерений. Межгосударственный стандарт штангенциркули. Технические условия.
17. ГОСТ 2.601-2006. Единная система конструкторской документации. Эксплуатационные документы.-М.: ФГУП «Стандартинформ». 2007. С. 36.
18. Дидманидзе О.Н., Митягин Г.Е., Карев А.М., Пильщиков В.Л. Основы работоспособности технических систем./ Учебное пособие. Москва, 2016. С. 188.
19. Дидманидзе О.Н., Парлюк Е.П., Пуляев Н.Н. Основы работоспособности и надежности технических систем./ Учебное пособие. Москва, 2020. С. 232.
20. Дидманидзе О.Н., Тойгамбаев С.К. Взаимосвязь качества технической эксплуатации и эффективности использования машин в растениеводстве Республики Казахстан.– М.: Монография. Издательство «Спутник +». 2021. С. 162.
21. Дидманидзе О.Н., Новиков В.С., Очковский Н.А., Корнеев В.М., Кравченко И.Н., Кононенко А.С., Гаджиев А.А. Технология ремонта машин./ Учебник для студентов высших учебных заведений, обучающихся по специальности 311900 "Технология обслуживания и ремонта машин в агропромышленном комплексе" / Серия Учебники и учебные пособия для высших учебных заведений Том 2. Москва, 2006. С.284.
22. Дидманидзе О.Н., Чепурин А.В., Карев А.М., Кушнарев С.Л. Надежность технических систем./ Учебное пособие 2-е издание, переработанное и дополненное. Москва, 2016. С. 232.
23. Дидманидзе О.Н., Коротких Ю.С., Пуляев Н.Н. Общий курс транспорта./ Монография. Москва, 2019. С. 90.
24. Дидманидзе О.Н., Митягин Г.Е., Дзюба Ю.В. Техническая эксплуатация автомобилей в АПК./ Учебное пособие. Москва, 2006. С. 210.
25. Евграфон В.А., Орлов Б.Н., Апатенко А.С., Новиченко А.И., Орлов Н.Б. учет надежности при формировании технологических комплексов машин и

оборудования природообустройства./ Учебное пособие. Рекомендовано УМО вузов РФ по образованию в области природообустройства и водопользования в качестве учебного пособия для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки 151000, 190109, 190600/Москва, 2014. С.80.

26. Евграфов В.А., Апатенко А.С., Новиченко А.И. Взаимосвязь эксплуатационно-технологических свойств машин и качества их технической эксплуатации в природообустройстве./ Монография / Москва, 2015. С.115.

27. Зорин В.А. Основы работоспособности технических систем./ Учебник для ВУЗов. М.: ООО «Магистр-Пресс», 2005. С. 536.

28. Зорин В.А. Основы работоспособности технических систем./ Учебник для студентов, высших учебных заведений, обучающихся по специальности "Сервис транспортных и технологических машин и оборудования (по отраслям)" направления подготовки "Эксплуатация наземного транспорта и транспортного оборудования" Сер. Учебник. Москва. 2009.

29. Зорин В.А. Севрюгина Н.С. Основы работоспособности технических систем. / Практикум. Учебное пособие. Б.: Белгород 2013. С. 149.

30. Зорин В.А., Бочаров В.С. Надежность машин./Учебник для вузов. ОГТУ. Орел. 2003. С. 548.

31. Крагельский И.В. и др. Основы расчетов на трение и износ./ М.: Машиностроение. 1977. С.526.

32. Карапетян М.А., Мочунова Н.А. Воздействие ходовых систем тракторных агрегатов на плодородие почв./ Монография. Москва, 2017. С.147.

33. Карапетян М.А., Пряхин В.Н. Механизация и автоматизация сельскохозяйственного производства./ Учебное пособие. Москва. 2013. С. 216.

34. Карапетян М.А., Выбрик Е.И., Елистратов А.И. Расчет тракторов и автомобилей./ Учебное пособие. Москва. 2013. С. 138.

35. Кравченко И.Н., Зорин В.А., Пучин Е.А., Бондарева Г.И. Основы надежности машин: учебное пособие для вузов в двух частях. Том Часть 2. М.: ООО «Типография «Момент». / Москва, 2007. С. 260.

36. Курчаткин В.В. и др. Надежность и ремонт машин. / Учебник для студен.

высших учебных заведений. М.: Колос. 2000. С. 776.

37. Карапетян М.А., Тойгамбаев С.К., Гамидов А.Г. Технология восстановления деталей технологических машин./ Учебное пособие. Издательство «Мегаполис». Москва. 2021. С. 135.

38. Левшин А.Г., Зубков В.В., Хлепитько М. Н. Организация и технология испытаний сельскохозяйственной техники. -М.: Учебное пособие для студентов вузов. / А. Г. Левшин, В. В. Зубков, М. Н. Хлепитько. МСХ РФ. Москва. 2004.

39. Проников А.С. Надежность машин./ учебное пособие. Машиностроение. Москва. 2003. С. 592.

40. Пучин Е.А., Дидманидзе О.Н., Лезин П.П., Лисунов Е.А., Кравченко И.Н. Надежность технических систем./ Учебник для студентов вузов, обучающихся по специальностям 311900 "Технология обслуживания и ремонта машин в агропромышленном комплексе" и 150200 "Автомобили и автомобильное хозяйство" направления подготовки дипломированных специалистов 653300 "Эксплуатация транспорта и транспортного оборудования" / Серия Учебники и учебные пособия для студентов высших учебных заведений. Москва, 2005. С. 353.

41. Российская энциклопедия самоходной техники. Справочное и учебное пособие для специалистов отрасли «Самоходные машины и механизмы»./ Т.1,2 под ред. В.А. Зорина. Просвещение. Москва. 2001. С. 892.

42. Севрюгина Н.С. Теория формирования техникой безопасности полного жизненного цикла транспортных и технологических машин. / Монография. Белгород, 2012. С. 179.

43. Саньков В. М., Евграфов В.А., Юрченко Н.И. Основы эксплуатации транспортных и технологических машин и оборудования./ Учебное пособие. Колос. Москва. 2001. с. 256.

44. Тойгамбаев С.К. Применение инструментальных материалов при резании металлов: Учебное пособие -М.: Ред. Изд. Отд. МГУП. 2007.-205с.

45. Тойгамбаев С.К., Шнырев А.П., Голиницкий П.В. Метрология стандартизация сертификация. Учебник. – М.: Издат. «Компания Спутник +», 2017. 375с.

46. Тойгамбаев С.К., Шнырев А.П., Мынжасаров Р.И. Надежность технологических машин: Учебное пособие. - М.: Редакционно-издательский отдел. МГУП. 2008. - 194с.

47. Тойгамбаев С.К. Технология производства деталей транспортных и технологических машин природообустройства. – М.: Учебник. Рекомендован НМС при ФУМО по УГСН для ВУЗов. РГАУ-МСХА им. К. А. Тимирязева Изд. “Спутник+”. 2020г. - 484с.

48. Тойгамбаев С.К., Апатенко А.С., Матвеев С.А, Техническая эксплуатация транспортно-технологических машин и оборудования./ Учебное пособие. Рекомендован Федеральным УМО по УГСН МАДИ для ВУЗов. Изд. “Спутник+” г. Москва 2021г. - 236с.

49. Тойгамбаев С.К., Апатенко А.С. Анализ износа деталей транспортных и технологических машин./ Учебно -методическое пособие / Москва, 2020. С. 37.

50. Тойгамбаев С.К., Апатенко А.С. Обработка результатов информации по надежности транспортных и технологических машин методом математической статистики./ Методические пособие. Москва, 2020. С. 25.

51. Тойгамбаев С.К. Выбор теоретического закона при оценке показателей надежности транспортных и технологических машин. / Методические пособие. Москва, 2020. С. 49.

52. Трение, изнашивание и смазка: Справочник в 2 кн. М.: Машиностроение, 1979.

53. Шнырев А.П., Тойгамбаев С.К., Сергеев Г.А., Казимирчук А.Ф. Основы технологии изготовления деталей транспортных и технологических машин: Учебное пособие. – М.: Редакционно-издательский отдел. МГУП. 2008. - 242с.

54. Шнырев А.П., Тойгамбаев С.К. Основы надежности транспортных и технологических машин. М.: Компания Спутник+, 2006, 133 с.

55. Шнырев А.П., Тойгамбаев С.К. Основы теории надежности транспортных и технологических машин. –М.: Учебное пособие./ Изд. «Спутник+». Москва. 2008. с.132.

## Содержание

Введение.....	5
Глава 1 Качество продукции.....	7
1.1. Основные понятия о качестве продукции.....	7
1.2. Основные факторы повышения качества изделия.....	9
1.3. Оценки качества изделия.....	11
1.4. Система управления качеством продукции.....	14
1.5. Контроль качества.....	19
Глава 2. Состояние технических средств и транспортно-технологических машин при эксплуатации.....	27
2.1. Понятия и определения.....	27
2.2. Критерии предельного состояния объекта.....	30
2.3. Три группы элементов предельного состояния.....	33
2.4. Оценка длительности эксплуатации объекта.....	34
Глава 3. Основные понятия о трении сопрягаемых поверхностей деталей.....	36
3.1. Определение и понятия трения.....	36
3.2. Адгезионная теория трения.....	40
3.3. Молекулярная теория трения.....	42
3.4. Молекулярно-механическая теория.....	42
3.5. Тепловые процессы при трении.....	47
3.6. Влияние смазочного материала на процесс трения.....	49
3.7. Условия, определяющие характер трения.....	52
3.8. Трение эластомерных материалов.....	54
Глава 4. Виды изнашивания деталей машин.....	56
4.1. Виды изнашивания.....	56
4.2. Механическое изнашивание.....	60
4.3. Абразивное изнашивание.....	60
4.4. Абразивное изнашивание полимеров.....	65
4.5. Гидроабразивное изнашивание.....	66

4.6. Газообразивное изнашивание.....	66
4.7. Эрозионное изнашивание.....	66
4.8. Усталостное изнашивание.....	67
4.9. Изнашивание при заедании.....	71
4.10. Коррозионно-механическое изнашивание.....	75
4.11. Электрохимическая коррозия.....	80
4.12. Окислительное изнашивание.....	81
4.13. Изнашивание при действии электрического тока.....	81
4.14. Водородное изнашивание.....	81
4.15. Избирательный перенос.....	83
4.16. Факторы, влияющие на характер и интенсивность изнашивания элементов машин.....	86
Глава 5. Классификация отказов техники и ее элементов.....	93
Глава 6. Показатели и нормирование надежности.....	102
6.1. Виды показателей надежности.....	102
6.2. Оценочные показатели надежности.....	102
Глава 7. Система сбора информации о надежности технических средств и транспортно-технологических машин в период эксплуатации.....	105
7.1. Цель и задачи сбора информации.....	105
7.2. Методика проведения экспертного опроса.....	107
Глава 8. Методы обработки информации о надежности.....	113
8.1. Понятие о статистической совокупности, генеральной совокупности и выборке.....	115
Глава 9. Испытания технических систем и транспортно-технологических машин на надежность.....	119
9.1 Цели и задачи испытаний.....	119
9.2. Планы испытаний на надежность машин.....	120
9.3. Методика планирования испытаний по плану N U T.....	123
9.4. Методика планирования испытаний ограниченной продолжительности.....	126

9. 5. Ускоренные испытания на надежность.....	128
Глава 10. Обработка данных информации о показателях надежности объекта методом математической статистикой.....	130
10.1. Последовательность действий обработки данных информации.....	131
10.2. Пример определения изменения параметра надежности (наработки на отказ) тракторов Т402.01 математической статистикой...	135
Глава 11. Определение показателей надежности вероятностным методом.....	140
11.1. Применение теоретических законов.....	140
11.2. Закон нормального распределения (ЗНР).....	142
11.3. Закон распределения Вейбулла (ЗРВ).....	144
11.4. Критерии согласия опытных и теоретических распределений показателей надежности.....	146
11.4.1. Определение критерия согласия Пирсона $\chi^2$ .....	147
11.5. Доверительные границы рассеивания значений показателя надежности.....	149
11.5.1. Определение доверительного интервала.....	149
11.5.2. При законе нормального распределения.....	150
11.5. 3. При законе распределения Вейбулла .....	153
11.6. Примеры определения доверительной вероятности и доверительного интервала рассеивания значений изучаемого показателя надежности....	154
11.7. Определение относительной ошибки переноса характеристик показателя надежности на другие объекты.....	160
11.8. Определение теоретического закона при анализе статистических данных показателей надежности.....	161
11.8.1 Определение числовых значений (характеристик) статистического ряда.....	164
11.8.2 Определение теоретического закона распределения изучаемого параметра надежности (ТЗР).....	164
11.8.3 Определение наличия "выпадающих точек" информации.....	165

11.8.4. Определение значения дифференциальной функции закона нормального распределения $f_i$ .....	166
11.8.5. Определение интегральной функции закона нормального распределения.....	166
11.8.6. Определение интегральной функции закона распределения Вейбулла.....	167
11.8.7. Определение критерия согласия Пирсона $\chi^2$ (хи-квадрат).....	167
11.8.8. Определение доверительных границ рассеивания среднего значения изучаемого параметра надежности.....	169
11.9. Определение относительной ошибки несовпадения опытных данных (данных информации) и значений, получаемых в соответствии с выбранным теоретическим законом.....	170
Глава 12. Использование теоретических законов при практических расчетах.....	171
12.1. Применение усеченного закона нормального распределения (ЗНР).....	171
12.2. Применение закона Вейбулла.....	177
Глава 13. Понятие безотказности технических систем и транспортно-технологических машин.....	189
13.1. Оценочные показатели безотказности.....	189
13.1.1 Вероятность безотказной работы.....	189
13.2. Средняя наработка на отказ.....	195
13.3. Поток отказов.....	197
13.4. Экономические показатели безотказности.....	199
Глава 14. Понятие о долговечности технических систем и транспортно-технологических машин.....	201
14.1. Оценочные показатели долговечности.....	201
14.2. Средний ресурс или средний срок службы.....	202
14.3. Определение остаточного ресурса детали.....	203
14.4. Определение остаточного ресурса сопряжения.....	205

14.5. Определение остаточного ресурса сопряжения вероятностным методом.....	209
14.6. Определение остаточного ресурса методом индивидуального прогнозирования.....	213
14.7. Определение полного ресурса соединения и допустимых без ремонта размеров соединяемых деталей.....	217
14.8. Определение остаточного ресурса сопряжения с заменой одной детали.....	220
14.9. Гамма-процентный ресурс.....	224
14.9.1. Нахождение значения гамма-процентного ресурса в процессе испытаний или эксплуатации.....	228
14.9.2. Определение значения гамма-процентного ресурса вероятностным методом.....	231
14.10. Назначенный ресурс или срок службы.....	234
14.11. Экономические показатели долговечности.....	234
14.12. Анализ износа деталей технических систем и транспортно - технологических машин при их дефектовке.....	235
Глава 15. Ремонтпригодность технических систем и транспортно - технологических машин.....	252
Глава 16. Понятие о сохраняемости технических систем и транспортно -технологических машин.....	263
16.1 Оценочные показатели сохраняемости.....	263
16.2. Показатели надежности восстанавливаемых объектов.....	266
Глава 17. Комплексные показатели надежности.....	270
Глава 18. Надежность сложной системы.....	274
18.1. Структурная схема надежности.....	274
18.2. Определение безотказной работы системы (изделия).....	276
18.3. Резервирование ненадежных элементов системы (изделия).....	279
Глава 19. Работоспособность основных сборочных единиц технических систем и транспортно – технологических машин.....	284

19.1. Двигатель внутреннего сгорания.....	284
19.2. Режимы работы и работоспособность трансмиссии.....	292
19.3. Работоспособность привода управления.....	294
19.4. Работоспособность элементов ходовой части.....	296
19.5. Работоспособность электрооборудования машин.....	297
19.6. Влияние эксплуатационных факторов на работоспособность технических систем.....	299
Глава 20. Повышение работоспособности технических систем и транспортно - технологических машин.....	317
20.1. Конструктивные мероприятия повышения надежности.....	318
20.2. Технологические мероприятия повышения работоспособности машин.....	324
20.3. Эксплуатационные мероприятия повышения работоспособности технических систем.....	331
Глава 21. Эксплуатационные мероприятия повышения работоспособности технических систем.....	338
21.1. Перечень мероприятий.....	338
21.2. Техническое диагностирование состояние машины.....	343
21.3. Хранение машин.....	349
Приложения.....	360
Библиографический список.....	368
Содержание.....	373

*Учебное издание*

*Учебник*

**Тойгамбаев Серик Кокибаевич  
Дидманидзе Отари Назирович  
Апатенко Алексей Сергеевич  
Парлюк Екатерина Петровна  
Севрюгина Надежда Савельевна**

**РАБОТОСПОСОБНОСТЬ  
ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

*Учебник*

Издательство «Спутник +»

109428. Москва, Рязанский проспект, д. 8А.

Тел.: (495) 730-47-74, 778-45-60, (с 9.00 до 18.00).

Подписано в печать 17.07.2022. Формат 60×90/16.

Бумага офсетная. Усл. печ. л. 23,5. Тираж 1000 экз. Заказ.

Отпечатано в ООО «Издательство «Спутник +».