

ФГБОУ ВО СТАВРОПОЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

---

# ОСНОВЫ НАДЕЖНОСТИ МАШИН

---

Учебное пособие для вузов

Ставрополь 2019

УДК 631.3-192  
ББК 34.41  
О-75

**Авторский коллектив:**

А. Т. Лебедев, А. В. Захарин, П. А. Лебедев, Н. А. Марьин, Павлюк Р. В.,  
Жевора Ю. И., Искендеров Р. Р.

**Основы надежности машин** : учебное пособие для вузов /  
О-75 А. Т. Лебедев, А. В. Захарин, П. А. Лебедев, и др. ; Ставропольский  
государственный аграрный университет. - Ставрополь :  
2019. - 120 с.

В учебном пособии приведены основные определения и понятия надежности, изложена методика статистической обработки информации по износам деталей, справочные данные для определения теоретического закона распределения износов. Представлена методика определения полного ресурса соединения и допустимых без ремонта размеров сопригаемых деталей в местах их наибольшего износа.

Для студентов направлений подготовки 35.03.06 - «Агроинженерия», 23.03.03 - «Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов» изучающих дисциплины «Надежность и ремонт машин», «Основы теории надежности» и «Работоспособность технических систем».

УДК 631.3-192  
ББК 34.41

## ОГЛАВЛЕНИЕ

|                                                                                                    |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <i>Введение</i> .....                                                                              | 5  |
| <b>1. Основные понятия и положения<br/>надежности технических систем</b> .....                     | 6  |
| <b>2. Расчет показателей надежности<br/>сельскохозяйственной техники</b> .....                     | 13 |
| 2.1. Основные положения.....                                                                       | 13 |
| 2.2. Показатели безотказности .....                                                                | 18 |
| 2.2.1. Теоретические предпосылки<br>и общая методика расчёта .....                                 | 18 |
| 2.2.2. Пример расчета количественных показателей<br>безотказности двигателя ЯМЗ-236 .....          | 21 |
| 2.3. Показатели долговечности .....                                                                | 29 |
| 2.3.1. Теоретические предпосылки<br>и общая методика расчета ... ..                                | 29 |
| 2.3.3. Пример расчета количественных показателей<br>долговечности двигателя ЯМЗ-236 .....          | 33 |
| 2.4. Показатели ремонтпригодности .....                                                            | 38 |
| 2.4.1. Теоретические предпосылки<br>и общая методика расчёта ... ..                                | 38 |
| 2.4.2. Пример расчета количественных показателей<br>ремонтпригодности двигателя ЯМЗ-236 .....      | 41 |
| 2.5. Расчет расхода запасных частей.....                                                           | 47 |
| 2.5.1. Теоретические предпосылки<br>и общая методика расчета ... ..                                | 47 |
| 2.5.2. Пример расчета норм расхода запасных частей.....                                            | 48 |
| <b>3. Статистический анализ износов деталей</b> .....                                              | 52 |
| 3.1. Теоретическое обоснование .....                                                               | 52 |
| 3.2. Общая последовательность определения<br>коэффициентов годности и восстановления деталей. .... | 59 |
| 3.3. Пример определения коэффициентов годности<br>и восстановления деталей .....                   | 61 |
| 3.4. Определение показателей безотказности<br>деталей методом сумм.....                            | 74 |

## 1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ПОЛОЖЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Термины и определения, используемые в теории надежности, регламентированы ГОСТ 27.002–89 «Надежность в технике. Термины и определения» [2].

**Надежность** – свойство объекта выполнять заданные функции, сохраняя во времени и в заданных пределах значения установленных эксплуатационных показателей.

**Объект** – техническое изделие определенного целевого назначения, рассматриваемое в периоды проектирования, производства, испытаний и эксплуатации и ремонта.

Объектами могут быть различные системы и их элементы.

**Система (техническая система)** – совокупность совместно действующих элементов, предназначенная для самостоятельного выполнения заданных функций.

**Элемент** – простейшая составная часть изделия.

Понятия элемента и системы трансформируются в зависимости от поставленной задачи. Например, станок, при установлении его собственной надежности рассматривается как система, состоящая из отдельных элементов – механизмов, деталей и т.п., а при изучении надежности технологической линии – как элемент.

Надежность объекта характеризуется следующими основными состояниями и событиями (рис. 1.1).

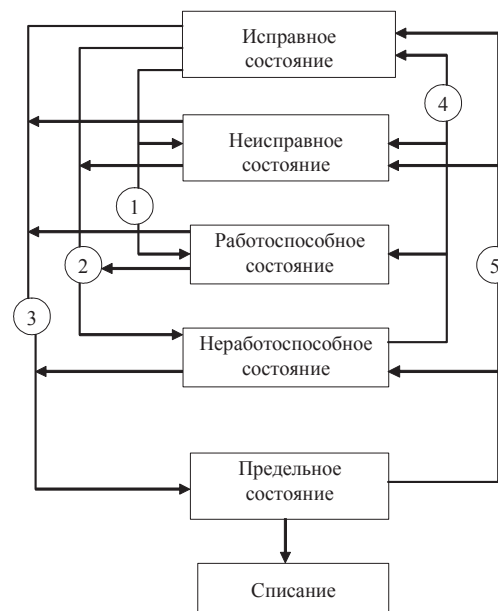
**Исправность** – состояние объекта, при котором он соответствует всем требованиям, установленным нормативно-технической документацией (НТД).

**Работоспособность** – состояние объекта, при котором он способен выполнять заданные функции, сохраняя значения основных параметров, установленных НТД.

Основные параметры характеризуют функционирование объекта при выполнении поставленных задач.

Понятие **исправности** шире, чем понятие **работоспособности**. Работоспособный объект обязан удовлетворять лишь тем требованиям НТД, выполнение которых обеспечивает нормальное применение объекта по назначению. Таким образом, если объект нерабо-

тоспособен, то это свидетельствует о его неисправности. С другой стороны, если объект неисправен, то это не означает, что он неработоспособен.



**Рис. 1.1. Схема основных состояний объекта и событий:**

1 – повреждение; 2 – отказ; 3 – переход объекта в предельное состояние; 4 – восстановление; 5 – ремонт

**Неисправность** – состояние объекта, при котором он не удовлетворяет хотя бы одному из требований нормативно-технической и (или) конструкторской документации.

**Неработоспособность** – состояние объекта, при котором значение хотя бы одного параметра, характеризующего способность выполнять заданные функции, не соответствует требованиям нормативно-технической и (или) конструкторской документации.

**Предельное состояние** – состояние объекта, при котором его применение по назначению недопустимо или нецелесообразно.

Применение (использование) объекта по назначению прекращается в следующих случаях:

- при неустранимом нарушении безопасности;

- при неустранимом отклонении величин заданных параметров;
- при недопустимом увеличении эксплуатационных расходов.

Для некоторых объектов предельное состояние является последним в его функционировании, т.е. объект снимается с эксплуатации; для других – определенной фазой в эксплуатационном графике, требующей проведения ремонтно-восстановительных работ.

В связи с этим, объекты могут быть:

- невосстанавливаемые, для которых работоспособность в случае возникновения отказа, не подлежит восстановлению;
- восстанавливаемые, работоспособность которых может быть восстановлена, в том числе и путем замены.

К числу невосстанавливаемых объектов можно отнести, например: подшипники качения, полупроводниковые изделия, зубчатые колеса и т.п. Объекты, состоящие из многих элементов, например, станок, автомобиль, электронная аппаратура, являются восстанавливаемыми, поскольку их отказы связаны с повреждениями одного или немногих элементов, которые могут быть заменены.

В ряде случаев один и тот же объект в зависимости от особенностей, этапов эксплуатации или назначения может считаться восстанавливаемым или невосстанавливаемым.

Система сбора и обработки информации о надежности серийно выпускаемых новых и отремонтированных изделий машиностроения представляет собой совокупность организационно-технических мероприятий по получению необходимых и достоверных сведений о надежности объектов.

Сбор и обработку информации о надежности объектов выполняют с целью усовершенствования конструкции, технологии изготовления, сборки и испытаний объектов, обеспечивающих повышение надежности; разработки мероприятий по совершенствованию диагностирования, технического обслуживания и текущих ремонтов; повышения качества капитальных ремонтов и снижения затрат на их проведение; оптимизации норм расхода запасных частей.

*Основными задачами системы сбора и обработки информации являются:*

- определение показателей надежности объектов;
- выявление конструктивных и технологических недостатков объектов, приводящих к снижению их надежности;

- выявление деталей и сборочных единиц, лимитирующих надежность машины в целом;
- изучение причин и закономерностей возникновения неисправностей и отказов;
- установление влияния условий и режимов эксплуатации на надежность объекта;
- корректировка нормируемых показателей надежности;
- обоснование норм и расчет необходимого резерва запасных частей
- определение эффективности мероприятий по повышению надежности объектов.

В ходе разработки конструкции информация о надежности объектов поступает из лабораторий, проводящих стендовые испытания опытных образцов, а также с заводов, полигонов, испытательных станций, хозяйств, где машины проходят опытную эксплуатацию.

Важным источником информации о надежности в гарантийный период эксплуатации объекта служат рекламации от потребителей техники.

Основной источник информации о надежности объекта – подконтрольная эксплуатация, в ходе которой фиксируют данные об отказах. Полученную информацию направляют на завод-изготовитель или ремонтный завод в виде донесений об отказе изделия, которое содержит информацию об изделии, условиях его эксплуатации, характере и причинах отказа, трудоемкости восстановления.

На основе донесений составляют сводные перечни видов отказов изделий, оценки показателей надежности, сводную ведомость расхода запасных частей и другие документы.

*Информация о надежности объекта должна быть:*

- достоверной (истинной, правильной, отражающей объективные факторы без домыслов и догадок);
- полной (исчерпывающей, содержащей все существенные сведения, которые учитывают во время принятия решений);
- однородной (относящейся к одинаковым объектам, эксплуатирующимся примерно в одинаковых условиях);
- дискретной (разделена по отдельным признакам);
- своевременной (могла использоваться для изменения конструкций, корректировки технологического процесса изготовления, ремонта машины и технического обслуживания).

Все показатели надежности сельскохозяйственной техники относят к категории случайных величин, которые рассчитывают методами теории вероятностей и математической статистики.

Статистическую оценку показателей надежности дают совокупности объектов, объединенных единым признаком или свойством. Например, детали можно группировать в совокупности по различным признакам: размерам, отклонениям формы, износам; машины – по долговечности и т. д. Различают статистическую, генеральную и выборочную совокупности.

*Статистическая совокупность* – это совокупность, состоящая из однородных объектов, обладающих качественной общностью.

*Генеральная совокупность* – это совокупность объектов, подлежащих исследованию. Однако исследовать все объекты генеральной совокупности обычно не представляется возможным. Поэтому для этого из генеральной совокупности выбирают определенное число объектов, которое называют выборочной совокупностью или выборкой.

*Выборочная совокупность* (выборка) – определенное число объектов, отобранных из генеральной совокупности для получения объективных сведений о генеральной совокупности.

Выборка должна быть подобна генеральной совокупности, чтобы на основании ее можно было достаточно уверенно судить об интересующем признаке генеральной совокупности. Выборка должна быть представительной, каждый объект – отобран случайно и все объекты – иметь одинаковую вероятность попасть в выборку.

Для объективной оценки *генеральной совокупности* очень важен объем выборки, т. е. число объектов наблюдений, составляющих выборку.

В случае же изучения менее однородного материала метод получения выборки и ее объем приобретают решающее значение. Так, при испытаниях машин объем выборки оценивают числом одновременно испытываемых машин с учетом полученных от каждой из них точек информации. Малый объем выборки в этом случае может привести к значительным ошибкам и сделать полученные результаты непригодными для практического использования. Слишком большое число одновременно испытываемых машин, хотя и приведет к более высокой точности расчетов, но будет неприемлемым из-за экономических соображений ввиду высокой стоимости испытаний каждой машины. Поэтому в данном случае необходимо

искать оптимальное решение, при котором объем выборки, обеспечивая достаточную точность конечных результатов, не будет слишком большим, а сами испытания – дорогостоящими.

Если во время испытаний у каждого объекта выборочной совокупности будет зафиксирован интересующий исследователя показатель надежности, то полученную таким образом информацию называют *полной*.

Если же испытания ограничивают по времени или наработке объектов, и за это время (или наработку) не у всех объектов выборочной совокупности зафиксирован показатель надежности, то такую информацию называют *усеченной*.

При этом возможны также случаи преждевременного снятия с испытаний объектов, у которых не зафиксирован показатель надежности, и время или наработка которых не достигли заранее оговоренных условиями испытаний значений. Досрочное снятие машин с испытаний возможно при хозяйственной необходимости, авариях, пожарах и других непредвиденных обстоятельствах. Полученную по такой методике испытаний информацию называют *многократно усеченной*, а преждевременно снятые с испытаний машины – *приостановленными*.

После проведения испытаний на основе полученной информации осуществляют расчет показателей надежности интересующих исследований.

Сама **надежность выступает** как комплексное свойство, включающее в себя в зависимости от назначения объекта или условий его эксплуатации *ряд простых свойств: безотказность, долговечность, ремонтпригодность, сохраняемость*.

**Безотказность** – свойство объекта непрерывно сохранять работоспособность в течение некоторой наработки или в течение некоторого времени.

**Наработка** – продолжительность или объем работы объекта, измеряемая в любых неубывающих величинах (единица времени, число циклов нагружения, километры пробега и т. п.).

**Долговечность** – свойство объекта сохранять работоспособность до наступления предельного состояния при установленной системе технического обслуживания и ремонтов.

**Ремонтпригодность** – свойство объекта, заключающееся в его приспособленности к предупреждению и обнаружению причин возникновения отказов, поддержанию и восстановлению ра-

ботоспособности путем проведения ремонтов и технического обслуживания.

**Сохраняемость** – свойство объекта непрерывно сохранять требуемые эксплуатационные показатели в течение (и после) срока хранения и транспортирования.

В зависимости от объекта надежность может определяться всеми перечисленными свойствами или частью их. Например, надежность колеса зубчатой передачи, подшипников определяется их долговечностью, а станка – долговечностью, безотказностью и ремонтпригодностью.

## 2. РАСЧЕТ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ТЕХНИКИ

---

### 2.1. Основные положения

**Показатель надежности** – количественная характеристика одного или нескольких свойств (безотказности, долговечности, ремонтпригодности, сохраняемости), составляющих надежность объектов.

**Показатель надежности** количественно характеризует, в какой степени данному объекту присущи определенные свойства, обуславливающие надежность. Одни показатели надежности (например, технический ресурс, срок службы) могут иметь размерность, ряд других (например, вероятность безотказной работы, коэффициент готовности) являются безразмерными.

В соответствии с ГОСТ 27.002 показатели надежности подразделяются на единичные и комплексные, расчетные, экспериментальные, экстраполированные, а также групповые и индивидуальные.

**Единичный показатель надежности** – показатель, характеризующий одно из свойств (например, долговечность или безотказность), составляющих надежность объекта.

**Комплексный показатель надежности** – показатель, характеризующий одновременно несколько свойств (два и более), составляющих надежность объекта.

Для сельскохозяйственной техники важны все четыре свойства надежности (безотказность, долговечность, ремонтпригодность и сохраняемость), которые оценивают в отдельности единичными и в совокупности комплексными показателями надежности. Для такого объекта, как, например, электролампа, важен показатель долговечности (единичный показатель) и не представляет интереса показатель ремонтпригодности. Поэтому надежность электроламп оценивают только единичным показателем надежности.

**Расчетный показатель надежности** – это показатель надежности, значения которого определяют расчетным методом.

**Экспериментальный показатель надежности** – показатель надежности, точечную или интервальную оценку которого определяют по данным эксплуатации.

**Экстраполированный показатель надежности** – показатель надежности, точечную или интервальную оценку которого определяют на основании результатов расчетов, испытаний и (или) эксплуатационных данных путем экстраполирования на другую продолжительность эксплуатации и другие условия эксплуатации.

**Групповой показатель надежности** служит для оценки надежности совокупности изделий данного типа (вида, марки, модели).

**Индивидуальный показатель** предназначен для оценки надежности каждого изделия данного типа.

Расчету подлежат основные количественные показатели надежности, утвержденные ГОСТ 13377–85.

Гарантированная вероятность расчета  $P$  должна быть не менее 0,8 для мобильных машин сельскохозяйственного производства.

Поэтому выборочная совокупность машин, принимаемая для расчетов показателей надежности, должна составлять  $10 \leq N_0 \leq 50$ .

Расчет показателей проводим для наработки машины до первого капитального ремонта.

Наблюдаемую наработку разбиваем на  $n$  интервалов. Количество интервалов определяется по формуле

$$n = \sqrt{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k m_{ij}}. \quad (2.1)$$

Величину интервала наработки определяем как

$$\Delta t = \frac{t_{\max}}{n}. \quad (2.2)$$

и округляем в пределах  $\pm 100$  час.

На основании донесений об отказе составляем сводную ведомость отказов. Расчет показателей надежности проводим отдельно: по безотказности, долговечности, ремонтпригодности.

Показатели надежности представляются в двух формах (определениях):

- статистическая (выборочные оценки);
- вероятностная.

Приводим условные обозначения исходной информации для определения показателей надежности отремонтированной техники:

- $N_0$  – начальное количество машин, за которыми велось наблюдение;
- $n$  – количество интервалов наработки ( $i = 1, 2, \dots, n$ );
- $k$  – количество видов отказов, зарегистрированных за период наблюдений ( $j = 1, 2, \dots, k$ );
- $m_{ij}$  – количество отказов  $j$ -того вида в  $i$ -том интервале наработки;
- $N_i$  – количество машин, находившихся в исправном состоянии в начале  $j$ -того интервала;
- $t$  – текущая наработка машины, для которой рассчитывается показатель;
- $t_{\max}$  – наработка, после которой прекращены наблюдения;
- $l$  – количество заменяемых деталей при устранении отказа у одной машины;
- $T_o$  – трудоемкость устранения отказа;
- $G_o$  – время простоя машины;
- $T_o$  – время простоя машины при устранении отказа;
- $C_o$  – стоимость устранения отказа.

**Отказ** – событие, заключающееся в нарушении работоспособного состояния объекта.

Критерий отказа – отличительный признак или совокупность признаков, согласно которым устанавливается факт возникновения отказа.

### Классификация и характеристики отказов

По *типу* отказы подразделяются на:

- **отказы функционирования** (выполнение основных функций объектом прекращается, например, поломка зубьев шестерни);
- **отказы параметрические** (некоторые параметры объекта изменяются в недопустимых пределах, например, потеря точности станка).

По своей *природе* отказы могут быть:

- **случайные**, обусловленные непредусмотренными перегрузками, дефектами материала, ошибками персонала или сбоями системы управления и т. п.;

- систематические, обусловленные закономерными и неизбежными явлениями, вызывающими постепенное накопление повреждений: усталость, износ, старение, коррозия и т. п.

**Основные признаки классификации отказов:** характер возникновения; причина возникновения; характер устранения; последствия отказов; дальнейшее использование объекта; легкость обнаружения; время возникновения.

Рассмотрим подробно каждый из классификационных признаков:

### **Характер**

#### **возникновения:**

- *внезапный отказ* – отказ, проявляющийся в резком (мгновённом) изменении характеристик объекта;
- *постепенный отказ* – отказ, происходящий в результате медленного, постепенного ухудшения качества объекта.

Внезапные отказы обычно проявляются в виде механических повреждений элементов (трещины – хрупкое разрушение, пробои изоляции, обрывы и т. п.) и не сопровождаются предварительными видимыми признаками их приближения. Внезапный отказ характеризуется независимостью момента наступления от времени предыдущей работы.

Постепенные отказы связаны с износом деталей и старением материалов.

### **Причина**

#### **возникновения:**

- *конструкционный отказ*, вызванный недостатками и неудачной конструкцией объекта;
- *производственный отказ*, связанный с ошибками при изготовлении объекта по причине несовершенства или нарушения технологии;
- *эксплуатационный отказ*, вызванный нарушением правил эксплуатации.

### **Характер**

#### **устранения:**

- *устойчивый отказ*;
- *перемежающийся отказ* (возникающий/исчезающий). последствия отказа: легкий отказ (легкоустраняемый);

- *средний отказ* (не вызывающий отказы смежных узлов – вторичные отказы);
- *тяжелый отказ* (вызывающий вторичные отказы или приводящий к угрозе жизни и здоровью человека).

### **Дальнейшее**

#### **использование объекта:**

- *полные отказы*, исключающие возможность работы объекта до их устранения;
- *частичные отказы*, при которых объект может частично использоваться.

### **Легкость**

#### **обнаружения:**

- *очевидные (явные) отказы*;
- *скрытые (неявные) отказы*.

### **Время**

#### **возникновения:**

- *прирабочные отказы*, возникающие в начальный период эксплуатации;
- *отказы при нормальной эксплуатации*;
- *износные отказы*, вызванные необратимыми процессами износа деталей, старения материалов и пр.

Физическая сущность явлений, приведших к отказу объекта, отражается в характере отказов. Типовой перечень проявлений отказов машин и оборудования приведен в таблице 2.1.

В полной мере отказ характеризуют причины, признаки (проявления), характер и последствия. Причинами отказов могут быть дефекты, допущенные при конструировании, производстве и ремонте, нарушение правил и норм эксплуатации.

Таблица 2.1

Перечень отказов машин

| Характер отказа                                                          | Примеры элементов, выходящих из строя           |
|--------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|
| Износ (механический, молекулярно-механический, коррозионно-механический) | Поверхности соединений, деталей, рабочие органы |

Продолжение

| Характер отказа                      | Примеры элементов, выходящих из строя                                   |
|--------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|
| Выкрашивание                         | Поверхности зубьев шестерен, роликов и втулок, цепей, колец подшипников |
| Излом (вязкий, хрупкий, усталостный) | Элементы трансмиссий и металлоконструкций                               |
| Остаточная деформация                | Оси, валы, зубья колес, звездочек, элементы металлоконструкций          |
| Трещина                              | В рамных несущих элементах и элементах рабочего оборудования            |
| Срез резьбы                          | Винтовые соединения                                                     |
| Срез                                 | Шпонки                                                                  |
| Вмятина                              | Рама кожуха                                                             |
| Затупление                           | Режущие элементы рабочих органов                                        |
| Заклинивание (заедание)              | Золотники                                                               |
| Проворачивание                       | Подшипники по посадке                                                   |
| Коррозия                             | Соединенные поверхности, обшивки                                        |
| Увеличенный люфт                     | Механические передачи, рычаги управления                                |
| Ослабление креплений                 | Винтовые соединения                                                     |
| Потеря упругости, осадка             | Пружины                                                                 |
| Расслоение, растрескивание           | Шланги, ленты транспортера, ремни передач                               |
| Кавитационная эрозия                 | Элементы гидропривода, гидромониторов                                   |
| Нарушение герметичности              | Соединения в гидравлических и пневматических системах                   |

## 2.2. Показатели безотказности

### 2.2.1. Теоретические предпосылки и общая методика расчёта

**Безотказность** – свойство объекта непрерывно сохранять работоспособное состояние в течение некоторого времени или наработки.

Наиболее важные показатели надежности невосстанавливаемых объектов – показатели безотказности, к которым относятся:

- *вероятность безотказной работы;*
- *плотность распределения отказов;*

- *интенсивность отказов;*
- *средняя наработка до отказа.*

В общем случае техническая система может пребывать в различных состояниях. Число состояний зависит от количества элементов системы, ее функционального назначения, пределов изменения показателей работоспособности. Момент времени, в который происходит переход системы из одного состояния в другое, является случайной величиной.

Поскольку состояние технической системы определяется состоянием ее конструктивных элементов, надежность функционирования системы в целом будет также зависеть от надежности составляющих ее деталей и от количества возможных состояний каждой из них. Каждая деталь может пребывать в одном из двух состояний: работоспособном или неработоспособном. Отказ сборочной единицы наступает в случае перехода любой из деталей в неработоспособное состояние. При увеличении числа  $n$  составляющих систему элементов от 2 до 14 вероятность безотказной ее работы уменьшается, а число  $n$  возможных состояний системы резко возрастает и уже при  $n_k = 10$  составляет 1000 (рис. 2.1).

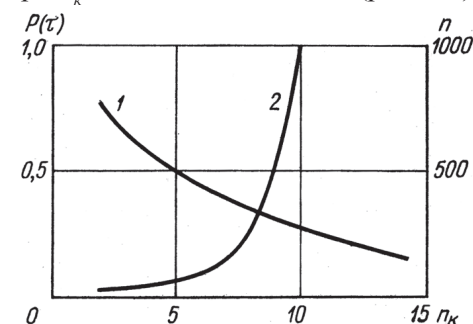


Рис. 2.1. Зависимость вероятности  $P(\tau)$  безотказной работы (кривая 1) и числа  $n$  возможных состояний (кривая 2) технической системы от числа  $n_k$  конструктивных элементов; здесь для каждой детали  $P(\tau) = 0,9$

Таким образом, чем сложнее система, тем ниже (при прочих равных условиях) уровень ее надежности и тем больше возможных причин и форм проявления ее отказа. Состояние системы можно с определенной точностью охарактеризовать совокупностью значений величин, определяющих ее поведение. Эти величины позволя-

ют сравнивать состояния системы между собой и судить об их различии, а также об изменении состояния системы во времени.

Расчет количественных показателей безотказности следует делать по формулам, приведенным в таблице 2.2.

Таблица 2.2

### Показатели безотказности

| Рассчитываемые величины                                                              | Формулы                                                                       |
|--------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|
| 1. Количество отказов машин для $i$ -того интервала наработки                        | $\sum_{i=1}^k m_{ij}$                                                         |
| 2. Количество отказов для одной сборочной единицы, детали                            | $\sum_{i=1}^n m_{ij}$                                                         |
| 3. Среднее число отказов, приходящихся на одну машину в $i$ -том интервале наработки | $\bar{m}_{ij} = \frac{\sum_{j=1}^k m_{ij}}{N_0}$                              |
| 4. Параметр потока отказов в $i$ -том интервале                                      | $\omega_i = \frac{\bar{m}_{ij}}{\Delta t}$                                    |
| 5. Средний параметр потока отказов                                                   | $\bar{\omega} = \frac{\sum_{i=1}^n \omega_i}{\sum_{i=1}^n i}$                 |
| 6. Среднее квадратичное отклонение параметра потока отказов                          | $\sigma_{\omega} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\omega_i - \bar{\omega})^2}{n}}$ |
| 7. Стандарт среднего квадратичного отклонения параметров потока отказов              | $\varepsilon = \frac{\sigma_{\omega}}{\sqrt{N_0 - 1}}$                        |
| 8. Коэффициент гарантии                                                              | $t(a)(N_0 - 1)$ – находится по таблице 4, приложения                          |
| 9. Средняя наработка на отказ                                                        | $\bar{t}_0 = \frac{1}{\bar{\omega}}$                                          |
| 10. Вероятность безотказной работы                                                   | $p(t) = e^{-\bar{\omega} t}$                                                  |
| 11. Коэффициент отказа сборочной единицы, детали                                     | $K = \frac{\sum_{i=1}^n m_{ij}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k m_{ij}}$            |

### 2.2.2. Пример расчета количественных показателей безотказности двигателя ЯМЗ-236

Расчет показателей безотказности проводим при следующих условиях:

- начало отчета наработки ведется после окончания эксплуатационной обкатки;
  - в период эксплуатации машин выполняются технические обслуживания в строгом соответствии с инструкцией по эксплуатации, а отказавшие узлы и детали заменяются новыми.
  - расчет количественных показателей безотказности машин проводится по схеме восстанавливаемого объекта.
- Данные для расчета представлены в таблице 2.3.

Таблица 2.3

Данные к расчету показателей надежности дизельного двигателя ЯМЗ-236 в условиях рядовой эксплуатации

| Наименование<br>отказавших<br>деталей<br>и сборочных<br>единиц | Интервал наработки,<br>тыс. мото-ч. |         |         |         |         |         |         |         |         | Время простоя на<br>один отказ, ч | Трудоемкость<br>устранения<br>1 отказа, чел.-ч. | Стоимость<br>устранения<br>1 отказа, руб. |         |
|----------------------------------------------------------------|-------------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|-----------------------------------|-------------------------------------------------|-------------------------------------------|---------|
|                                                                | 0–0,5                               | 0,5–1,0 | 1,0–1,5 | 1,5–2,0 | 2,0–2,5 | 2,5–3,0 | 3,0–3,5 | 3,5–4,0 | 4,0–4,5 |                                   |                                                 |                                           | 4,5–5,0 |
| 1. Трещина<br>выпускного<br>коллектора                         | 1                                   | 1       |         | 2       |         | 1       |         | 2       |         | 1                                 | 12                                              | 6                                         | 4,0     |
| 2. Износ<br>клапанных<br>гнезд                                 |                                     |         | 1       |         |         | 1       | 2       | 1       | 3       | 1                                 | 40                                              | 68                                        | 21,0    |
| 3. Трещина<br>гильзы                                           |                                     | 2       |         |         | 2       |         |         | 1       |         | 1                                 | 27                                              | 43                                        | 35,0    |
| 4. Разрыв<br>шатунного<br>болта                                |                                     |         | 2       |         |         | 3       | 1       |         | 1       |                                   | 20                                              | 61                                        | 21,0    |
| 5. Поломка<br>лопасти<br>турбоком-<br>прессора                 | 2                                   |         |         | 1       | 1       |         | 1       |         |         |                                   | 18                                              | 31                                        | 15,0    |

Продолжение

| Наименование отказавших деталей и сборочных единиц | Интервал наработки, тыс. мото-ч. |         |         |         |         |         |         |         |         | Время простоя на один отказ, ч | Трудоемкость устранения 1 отказа, чел.-ч. | Стоимость устранения 1 отказа, руб. |         |
|----------------------------------------------------|----------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|--------------------------------|-------------------------------------------|-------------------------------------|---------|
|                                                    | 0-0,5                            | 0,5-1,0 | 1,0-1,5 | 1,5-2,0 | 2,0-2,5 | 2,5-3,0 | 3,0-3,5 | 3,5-4,0 | 4,0-4,5 |                                |                                           |                                     | 4,5-5,0 |
| 6. Нарушение регулировки форсунки                  |                                  | 2       | 1       | 1       | 2       | 5       | 4       | 2       | 3       | 1                              | 8                                         | 4                                   | 2,5     |
| 7. Трещина радиатора                               |                                  |         |         |         | 2       | 1       | 1       | 2       | 1       | 3                              | 12                                        | 7                                   | 3,0     |
| 8. Нарушение регулировки муфты сцепления           |                                  | 2       | 3       | 1       |         | 1       | 2       |         | 3       |                                | 2                                         | 3                                   | 1,4     |
| 9. Срыв фрикционных накладок                       |                                  | 1       |         | 2       |         |         | 1       | 3       |         |                                | 21                                        | 35                                  | 18,0    |
| 10. Трещина корпуса муфты сцепления                |                                  |         |         | 2       |         | 1       |         |         | 1       |                                | 25                                        | 30                                  | 13,0    |

Для проведения расчетов все отказы двигателей систематизируем по наработке. С этой целью составляем таблицу отказов двигателя ЯМЗ-236 (табл. 2.4).

Таблица 2.4

Расчет показателей безотказности двигателя ЯМЗ-236

| Наименование отказавших деталей и сборочных единиц | Интервал наработки, тыс. мото-ч |         |         |         |         |         |         |         |         | $\sum_{i=1}^n m_{ij}$ | $K_j$ | Группы отказов |
|----------------------------------------------------|---------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|-----------------------|-------|----------------|
|                                                    | 0-0,5                           | 0,5-1,0 | 1,0-1,5 | 1,5-2,0 | 2,0-2,5 | 2,5-3,0 | 3,0-3,5 | 3,5-4,0 | 4,0-4,5 |                       |       |                |
| 1. Трещина выпускного коллектора                   | 1                               | 1       | 2       | 1       | 2       | 1       | 2       | 1       | 8       | 0,075                 | 1     |                |

Продолжение

| Наименование отказавших деталей и сборочных единиц | Интервал наработки, тыс. мото-ч |         |         |         |         |         |         |         |         | $\sum_{i=1}^n m_{ij}$ | $K_j$             | Группы отказов |         |
|----------------------------------------------------|---------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|-----------------------|-------------------|----------------|---------|
|                                                    | 0—0,5                           | 0,5—1,0 | 1,0—1,5 | 1,5—2,0 | 2,0—2,5 | 2,5—3,0 | 3,0—3,5 | 3,5—4,0 | 4,0—4,5 |                       |                   |                | 4,5—5,0 |
| 2. Износ клапанных гнезд                           |                                 |         | 1       |         |         | 1       | 2       | 1       | 3       | 1                     | 9                 | 0,084          | II      |
| 3. Трещина гильзы                                  |                                 | 2       |         |         | 2       |         |         | 1       |         | 1                     | 6                 | 0,056          | III     |
| 4. Разрыв шатунного болта                          |                                 |         | 2       |         |         | 3       | 1       |         | 1       |                       | 7                 | 0,066          | III     |
| 5. Поломка лопасти турбокомпрессора                | 2                               |         |         | 1       | 1       |         | 1       |         |         | 1                     | 6                 | 0,056          | II      |
| 6. Нарушение регулировки форсунки                  |                                 | 2       | 1       | 1       | 2       | 5       | 4       | 2       | 3       | 1                     | 21                | 0,198          | I       |
| 7. Трещина радиатора                               |                                 |         |         |         | 2       | 1       | 1       | 2       | 1       | 3                     | 10                | 0,094          | I       |
| 8. Нарушение регулировки муфты сцепления           |                                 | 2       | 3       | 1       |         | 1       | 2       |         | 3       |                       | 12                | 0,12           | I       |
| 9. Срыв фрикционных накладок                       |                                 | 1       |         | 2       |         |         | 1       | 3       |         |                       | 7                 | 0,066          | III     |
| 10. Трещина корпуса муфты сцепления                |                                 |         |         | 2       |         | 1       |         |         | 1       |                       | 4                 | 0,038          | III     |
| 11. $\sum_{j=1}^k m_{ij}$                          | 6                               | 10      | 8       | 10      | 8       | 14      | 15      | 11      | 13      | 11                    | $\sum_6^{=10}$    |                |         |
| 12. $N_0$                                          | 32                              | 32      | 32      | 32      | 32      | 32      | 32      | 32      | 32      | 32                    |                   |                |         |
| 13. $\overline{m}_i = \sum_{j=1}^k m_{ij} / N_0$   | 0,187                           | 0,312   | 0,25    | 0,312   | 0,25    | 0,437   | 0,468   | 0,343   | 0,406   | 0,343                 | $\sum_6^{=3,308}$ |                |         |
| 14. $\omega_i = \overline{m}_i / \Delta t$         | 0,374                           | 0,624   | 0,500   | 0,624   | 0,500   | 0,874   | 0,936   | 0,686   | 0,812   | 0,686                 | $\sum_6^{=6,62}$  |                |         |

Продолжение

| Наименование отказавших деталей и сборочных единиц     | Интервал наработки, тыс. мото-ч |         |         |         |         |         |         |         |         |         | $\sum_{i=1}^n m_{ij}$ | $K_j$ | Группы отказов |
|--------------------------------------------------------|---------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|-----------------------|-------|----------------|
|                                                        | 0—0,5                           | 0,5—1,0 | 1,0—1,5 | 1,5—2,0 | 2,0—2,5 | 2,5—3,0 | 3,0—3,5 | 3,5—4,0 | 4,0—4,5 | 4,5—5,0 |                       |       |                |
| 15. $\bar{\omega}_i = \frac{\sum \omega_i}{\sum I_p}$  | 0,662                           | 0,662   | 0,662   | 0,662   | 0,662   | 0,662   | 0,662   | 0,662   | 0,662   | 0,662   | 0,662                 |       |                |
| 16. $\Delta\omega_i = \omega_i - \bar{\omega}_i$       | —0,288                          | —0,038  | —0,162  | —0,038  | —0,162  | 0,212   | 0,274   | 0,024   | 0,150   | 0,024   |                       |       |                |
| 17. $\Delta\omega_i^2 = (\omega_i - \bar{\omega}_i)^2$ | 0,083                           | 0,001   | 0,026   | 0,001   | 0,026   | 0,045   | 0,075   | 0,005   | 0,022   | 0,005   | $\sum = 0,289$        |       |                |
| 18. $\bar{\omega} \cdot t$                             | 0,165                           | 0,187   | 0,312   | 0,437   | 0,562   | 0,687   | 0,812   | 0,937   | 1,062   | 0,187   |                       |       |                |
| 19. $p(t) = e^{-\bar{\omega}_i \cdot t}$               | 0,85                            | 0,83    | 0,73    | 0,64    | 0,57    | 0,50    | 0,44    | 0,39    | 0,34    | 0,30    |                       |       |                |

В столбце 1 таблицы 6 записываем наименование отказавших деталей и сборочных единиц согласно заданию.

В столбце 2 – наработка двигателя, разбитая на равные интервалы и количество отказов, зарегистрированных в данном интервале (дается в задании).

В строке 13 подсчитываем количество отказов двигателя  $\sum_{j=1}^k m_{ij}$  для каждого интервала наработки. В столбце 3 подсчитываем количество отказов для каждой детали (сборочной единицы) двигателя  $\sum_{i=1}^n m_{ij}$ . В конце строки 13 и столбца 3 подсчитываем сумму отказов выборочной совокупности двигателей.

В строке 14 проставляем полученную в каждом интервале выборочную совокупность двигателей. В рассматриваемом примере выборочная совокупность остается постоянной и равной  $N_0 = 32$ . В случае переменной убывающей выборки каждый интервал должен содержать  $N_0 \geq 5$  двигателей. Рекомендуется увеличить шаг интервала, а таблицу 2.3 соответственно перестроить с увеличенным шагом интервала.

В строке 15 подсчитываем среднее число отказов  $\bar{m}_i$ , приходящийся на один двигатель в каждом интервале наработки.

В строке 16 подсчитываем параметр потока отказов  $\omega_i$  для каждого интервала наработки. В конце строки подсчитываем сумму  $\sum_{i=1}^n \omega_i = 6,62$  тыс. мото-ч<sup>-1</sup>.

В строке 17 определяем средний параметр потока отказов двигателя  $\bar{\omega} = 6,62/10 = 0,662$  тыс. мото-ч<sup>-1</sup>, где  $\sum_{i=1}^n i = 10$  – количество интервалов  $i_j$  наработки.

В строках 18, 19 для каждого интервала наработки проводим подготовительные вычисления для определения среднего квадратичного отклонения параметра потока отказов.

Среднее квадратичное отклонение параметра потока отказов  $\sigma$

$$\sigma_{\omega} = \sqrt{\frac{0,289}{10}} = 0,170 \text{ тыс. мото-ч}^{-1}.$$

Определяем стандарт среднего квадратичного отклонения выборочного среднего параметра потока отказов  $\varepsilon$

$$\varepsilon = \frac{0,170}{\sqrt{32-1}} = 0,03 \text{ тыс. мото-ч}^{-1}.$$

Определяем коэффициент гарантии  $t$

$$t_{0,8;31} = 1,31.$$

Следовательно, с гарантированной вероятностью  $p \geq 0,8$  можно утверждать, что вычисленный средний параметр потока отказов  $\bar{\omega}$  (на основании выборочной) находим в интервале

$$0,662 - 1,31 \cdot 0,03 \leq \bar{\omega} \leq 0,662 + 1,31 \cdot 0,03.$$

Среднюю наработку дизельного двигателя на отказ определяем по уравнению

$$\bar{t}_0 = 1/0,662 = 1,510 \text{ тыс. мото-ч.}$$

С учетом выборочного среднего квадратичного отклонения средняя наработка на отказ составит

$$\bar{t}_{0.\max} = \frac{1}{0,662 - 1,31 \cdot 0,03} = 1,607 \text{ тыс. мото-ч,}$$

$$\bar{t}_{0.\min} = \frac{1}{0,662 + 1,31 \cdot 0,03} = 1,424 \text{ тыс. мото-ч.}$$

В строке 20 определяем произведение  $\bar{\omega}t$ , где за  $t$  принимаем среднее значение интервала наработки.

В строке 21 определяем вероятность безотказной работы двигателя  $p_t$  для каждого интервала наработки.

В столбце 4 для каждой строки определяем коэффициент отказа детали (сборочной единицы).

В столбце 5 проставляем группу отказов. На основании столбцов 4 и 5 подсчитаем суммарно коэффициенты:

$$\text{для отказов группы I} - K_I = 0,48$$

$$\text{для отказов группы II} - K_{II} = 0,290$$

$$\text{для отказов группы III} - K_{III} = 0,226$$

Определяем частные параметры потоков отказов и соответствующие им наработки:

$$\bar{\omega}_I = 0,662 \cdot 0,487 = 0,410 \text{ тыс. мото-ч}^{-1},$$

$$\bar{t}_I = 1 : 0,410 = 2,43 \text{ тыс. мото-ч.},$$

$$\bar{\omega}_{II} = 0,662 \cdot 0,290 = 0,157 \text{ тыс. мото-ч}^{-1},$$

$$\bar{t}_{II} = 1 : 0,157 = 5,69 \text{ тыс. мото-ч.},$$

$$\bar{\omega}_{III} = 0,662 \cdot 0,226 = 0,131 \text{ тыс. мото-ч}^{-1},$$

$$\bar{t}_{III} = 1 : 0,131 = 7,30 \text{ тыс. мото-ч.}$$

Полученные результаты расчетов сводим в таблицу 2.5 и изображаем графически  $m_i = f(t)$ ;  $\omega_i = f(t)$ ;  $p_i = f(t)$ , как показано на рисунках 2.2; 2.3; 2.4.

Таблица 2.5

Показатели безотказности дизельного двигателя ЯМЗ-236

| Наименование показателей безотказности                                 | Показатели              |                             |          |
|------------------------------------------------------------------------|-------------------------|-----------------------------|----------|
|                                                                        | Обозначение             | Размерность                 | Величина |
| 1                                                                      | 2                       | 3                           | 4        |
| 1. Выборочная совокупность                                             | $N_0$                   | един.                       | 32       |
| 2. Наработка, после которой прекращены наблюдения                      | $t_{\max}$              | тыс. мото-ч.                | 5,0      |
| 3. Средняя наработка на отказ                                          | $t_0$                   | тыс. мото-ч.                | 1,51     |
| 4. Параметр потока отказов                                             | $\bar{\omega}$          | тыс. мото-ч <sup>-1</sup> . | 0,662    |
| 5. Выборочное среднее квадратичное отклонение параметра потока отказов | $\sigma_{\bar{\omega}}$ | тыс. мото-ч <sup>-1</sup>   | 0,03     |
| 6. Коэффициент гарантированной вероятности параметра потока отказов    | $t_g$                   | безразмерный                | 1,31     |
| 7. Коэффициент отказа группы I                                         | $K_I$                   | -//-                        | 0,487    |
| 8. Коэффициент отказа группы II                                        | $K_{II}$                | -//-                        | 0,290    |
| 9. Коэффициент отказа группы III                                       | $K_{III}$               | -//-                        | 0,266    |

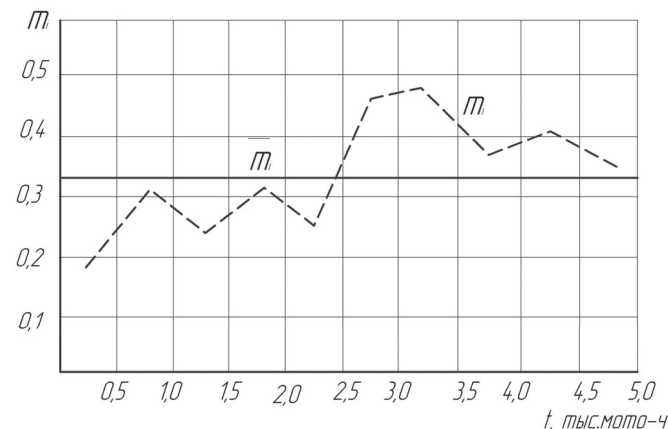


Рис. 2.2. Полигон распределения отказов двигателя ЯМЗ-236. Эмпирический полигон распределения отказов, теоретическая прямая распределения отказов

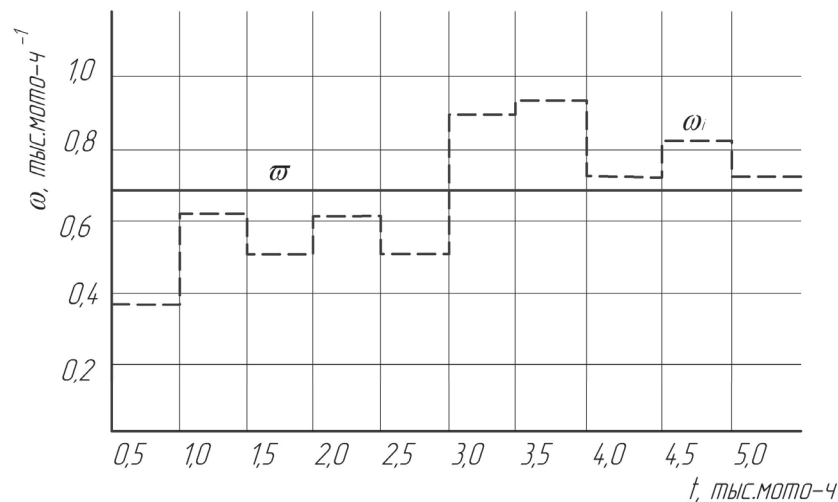


Рис. 2.3. Гистограмма распределения параметра потока отказов и средний параметр потока отказов двигателя ЯМЗ-236

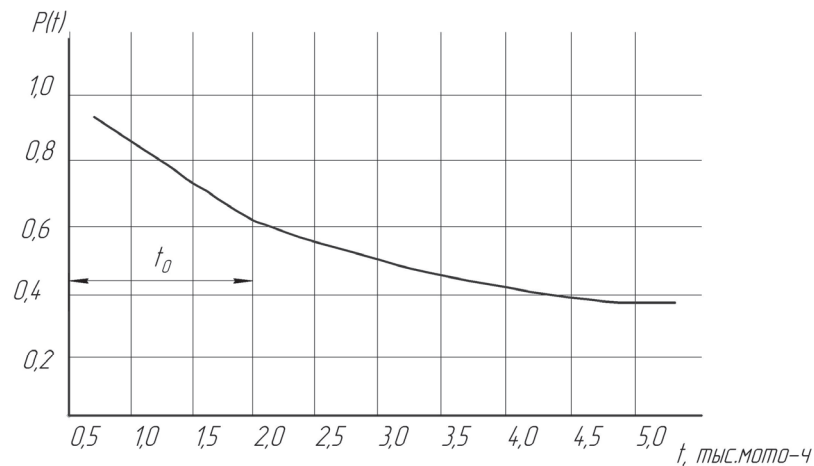


Рис. 2.4. Кривая вероятности безотказной работы дизельного двигателя ЯМЗ-236

## 2.3. Показатели долговечности

### 2.2.1. Теоретические предпосылки и общая методика расчета

**Долговечность машин** закладывается на стадии конструирования и зависит от конструкции, применяемых материалов, защитных покрытий, смазочных материалов и других факторов. Большое значение имеют также применяемые при проектировании методы расчета износостойкости деталей и соединений.

Долговечность машин обеспечивается и на стадии производства, зависит от применяемых видов обработки деталей (механической или химико-термической), технического уровня и состояния станочного парка, режимов обкатки.

Возможности реализации заложенной в машине долговечности в процессе эксплуатации определяются принятой системой и качеством технического обслуживания и ремонта, квалификацией обслуживающего персонала, воздействием внешней среды.

Таким образом, обеспечение долговечности является комплексной проблемой, для решения которой требуется проводить новые организационно-технические мероприятия при проектировании, производстве и эксплуатации машин.

Долговечность оценивается с помощью двух групп показателей: ресурса как показателя, связанного с наработкой объекта, и срока службы. Каждая из них имеет много разновидностей, позволяющих конкретизировать этапы или характер эксплуатации.

**Ресурс** – наработка объекта от начала его эксплуатации или ее возобновления после капитального ремонта до наступления предельного состояния.

**Средний ресурс (срок службы)** – математическое ожидание ресурса (срока службы). Средний ресурс определяется по формуле

$$\bar{T}_p = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N t_{pi}, \quad (2.3)$$

где  $t_{pi}$  – ресурс  $i$ -го объекта.

**Технический ресурс** – наработка объекта от начала его эксплуатации или возобновления эксплуатации после ремонта до наступления предельного состояния. То есть, технический ресурс может быть регламентирован следующим образом: до среднего, ка-

питального, от капитального до ближайшего среднего ремонта и т. п. Если регламентация отсутствует, то имеется в виду ресурс от начала эксплуатации до достижения предельного состояния после всех видов ремонтов.

Для невосстанавливаемых объектов понятия технического ресурса и наработки до отказа совпадают.

**Назначенный ресурс** – суммарная наработка объекта, при достижении которой эксплуатация должна быть прекращена независимо от его состояния.

Этот ресурс чаще всего назначают из соображений безопасности или экономичности, например для авиационных двигателей с целью обеспечения безопасности полетов. После отработки назначенного ресурса авиационные двигатели снимают с самолетов и могут использовать их в наземных условиях (например, для сушки зерна, защиты садов от заморозков и т.п.).

**Срок службы** – календарная продолжительность эксплуатации (в том числе, хранение, ремонт и т. п.) от ее начала до наступления предельного состояния.

На рисунке 2.5 приведена графическая интерпретация перечисленных показателей, при этом:

- $t_0 = 0$  – начало эксплуатации;
- $t_1, t_5$  – моменты отключения по технологическим причинам;
- $t_2, t_4, t_6, t_8$  – моменты включения объекта;
- $t_3, t_7$  – моменты вывода объекта в ремонт, соответственно, средний и капитальный;
- $t_9$  – момент прекращения эксплуатации;
- $t_{10}$  – момент отказа объекта.

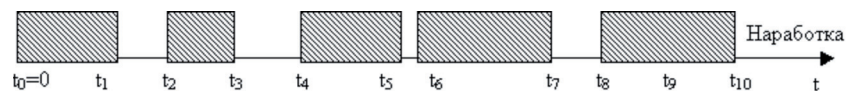


Рис. 2.5. Графическая интерпретация показателей долговечности

Технический ресурс (наработка до отказа)

$$TP = t_1 + (t_3 - t_2) + (t_5 - t_4) + (t_7 - t_6) + (t_{10} - t_9). \quad (2.4)$$

Назначенный ресурс

$$TH = t_1 + (t_3 - t_2) + (t_5 - t_4) + (t_7 - t_6) + (t_9 - t_8). \quad (2.5)$$

Срок службы объекта  $TC = t_{10}$ .

Для большинства объектов электромеханики в качестве критерия долговечности чаще всего используется технический ресурс.

Средний ресурс (срок службы) до ремонта  $T_{cp}$  – доремонтный ресурс (срок службы) от начала эксплуатации объекта до его первого ремонта.

Средний ресурс (срок службы) между ремонтами  $T_{cp}$  – межремонтный ресурс (срок службы) между смежными ремонтами объекта.

Средний ресурс (срок службы) до списания  $T_{cn}$  – полный ресурс (срок службы) объекта от начала эксплуатации до его списания, обусловленного предельным состоянием.

Гамма-процентный ресурс – наработка, в течение которой объект не достигнет предельного состояния с заданной вероятностью,  $\gamma$  выраженной в процентах.

Гамма-процентный ресурс имеет большое практическое значение, так как в результате неизбежного рассеивания долговечности сельскохозяйственной техники при изменяющихся нагрузках и переменных условиях эксплуатации их долговечность – величина статистическая. Определяется она экспериментально по данным о долговечности большой группы объектов.

На рисунке 2.6 по оси абсцисс кривой распределения показан гамма-процентный ресурс  $t_\gamma$ .

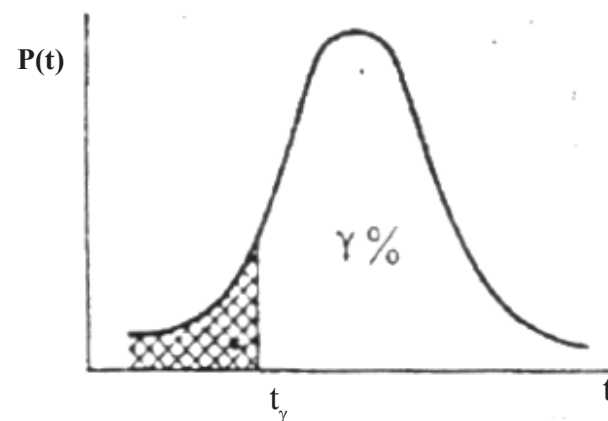


Рис. 2.6. Гамма-процентный ресурс при работе объекта

Если ресурс изделий имеет распределение с плотностью вероятности,  $f(t)$  то гамма-процентный ресурс  $\gamma$  находят из уравнения

$$P(t_\gamma) = \gamma / 100. \quad (2.6)$$

Гамма-процентный ресурс как оценочный показатель долговечности позволяет значительно сократить время испытаний (наблюдений) тракторов или их агрегатов, так как испытания (наблюдения) ведут до исчерпания ресурса у сравнительно небольшого количества (10...20 %) машин. При этом величина  $\gamma$  ресурса будет соответственно равна  $t_{\gamma_1} = 90 \%$ ,  $t_{\gamma_2} = 80 \%$  ( $\gamma_1 = 90 \%$ ,  $\gamma_2 = 80 \%$ ).

Чем больше установленная  $\gamma$ , тем меньше длительность испытаний (наблюдений). Однако для получения оценок ресурса с определенной регламентированной точностью при уменьшении длительности испытаний потребуется увеличить количество испытуемых объектов.

На основании гамма-процентного ресурса оценивают качество новых и отремонтированных машин и их агрегатов.

Сроком службы называется календарная продолжительность эксплуатации объекта от её начала или возобновления после ремонта определенного вида до перехода в предельное состояние.

Срок службы определяется по формуле

$$\bar{T}_{cp} = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N t_{cni}, \quad (2.7)$$

где  $t_{cni}$  – срок службы  $i$ -го объекта.

Гамма-процентный срок службы – календарная продолжительность эксплуатации, в течение которой объект не достигнет предельного состояния с заданной вероятностью  $\gamma$ , выраженной в процентах.

В какой-то мере долговечность характеризуется и такими показателями, как *гарантийная наработка (ресурс) и срок гарантии*.

Конкретные значения количественных показателей долговечности задают в зависимости от назначения, особенностей применения объектов и влияния отказов на безопасность работы. Для установления проводят специальные расчеты на прочность и ресурсные испытания, а также используют результаты испытания прототипов и опытных образцов объектов.

Расчет количественных показателей долговечности проводят по формулам, приведенным в таблице 2.6.

Таблица 2.6

#### Формулы для расчета показателей долговечности

| Рассчитываемые величины                                                                       | Формула или метод определения                                       |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|
| 1. Нарботка до первого отказа                                                                 | На основании анализа информации об отказах                          |
| 2. Опытная вероятность безотказной работы                                                     | $\rho(t) = \frac{N_0 - \sum_{i=1}^n m_{ij}}{N_0}$                   |
| 3. Среднее количество машин, находящихся в исправном состоянии в $i$ -том интервале наработки | $\bar{N}_i = \frac{N_i + (N_i - m_{ij})}{2}$                        |
| 4. Интенсивность отказов в $i$ -том интервале наработки                                       | $\lambda_i = \frac{\sum_{j=1}^k m_{ij}}{N_i \cdot \Delta t}$        |
| 5. Средняя интенсивность отказов за весь период наработки                                     | $\bar{\lambda} = \frac{\sum_{i=1}^n \lambda_i}{\sum_{i=1}^n i_n}$   |
| 6. Теоретическая вероятность безотказной работы                                               | $p(t) = e^{-\bar{\lambda}(t-t_0)}$                                  |
| 7. Средний технический ресурс сборочной единицы (детали)                                      | $t_{pec} = t_0 + \frac{1}{\bar{\lambda}}$                           |
| 8. Ресурс сборочной единицы (детали) – 80 %                                                   | $t_{pec;0,8} = t_0 + \left( \frac{\ln 0,8}{-\bar{\lambda}} \right)$ |

#### 2.3.3. Пример расчета количественных показателей долговечности двигателя ЯМЗ-236

Расчет показателей долговечности проводим при следующих условиях.

1. Расчет ведется для определенного вида отказа выявленного в процессе эксплуатации машин. Студентам следует сделать расчет для одного вида отказа, указанного в задании.

2. Расчет количественных показателей долговечности проводится по схеме невозстановливаемого объекта.

3. Расчет проводим на основании усеченной выборки, когда в процессе наблюдения отказывают не все детали (узлы) выборочной совокупности, а только часть из них. Остальные детали отрабатывают период наблюдения безотказно.

4. Расчет показателей долговечности делаем на основании двух-параметрического экспоненциального уравнения вида

$$t_{\text{pec}} = t_0 + \frac{1}{\lambda}. \quad (2.8)$$

Порядок определения гарантированной вероятности тот же, что и при расчетах показателей безотказности.

Расчет показателей долговечности ведем для группы отказов, представленной в строке 7 таблицы 2.4 «Трещина радиатора». Первый отказ зафиксирован после наработки 2,0 тыс. мото-ч. В интервале регистрационной наработки отказало 10 радиаторов. Выборочная совокупность составила 32 радиатора.

Для проведения расчета отказы систематизируем по наработке. С этой целью составляем таблицу 2.7.

В этой таблице в столбце 1 указываем наименование показателей, принятых для расчета, в столбце 2 – интервалы наработки.

Строка 1 аналогична строке 3 таблицы 1.3 и задается студенту в задании. Строка 2 не требует пояснений.

В строке 3 определяем эмпирическую вероятность безотказной работы детали, в частности радиатора, для которой ведем расчет.

В строке 4 определяем среднее количество исправно работающих узлов для каждого интервала наработки.

$$\overline{N}_i = \frac{N_i + (N_i - m_i)}{2}, \quad (2.9)$$

где  $N_i$  – число работоспособных двигателей в начале  $i$ -того интервала наработки;

$(N_i - m_i)$  – число работоспособных двигателей в конце этого интервала наработки.

В строке 5 подсчитываем отношение  $m_i / \overline{N}_i$  в каждом интервале наработки.

В строке 6 подсчитываем интенсивность отказов  $\lambda_i$  для каждого интервала наработки. В конце строки подсчитываем

$$\sum_{i=1}^n \lambda_i = 0,732 \text{ тыс. мото-ч}^{-1}.$$

В строке 7 в каждом интервале наработки выписываем среднюю интенсивность отказов  $\bar{\lambda}$ , вычисленную как  $\bar{\lambda} = 0,732 : 6 = 0,122 \text{ тыс. мото-ч}^{-1}$ .

В строке 8 подсчитываем разность  $\lambda_i - \bar{\lambda}$ .

Таблица 2.7

**Расчет показателей долговечности радиатора системы охлаждения дизельного двигателя ЯМЗ-236**

| № п/п | Наименование показателей                                    | Наработка, тыс. мото-ч. |         |         |         |         |         | Итого              |
|-------|-------------------------------------------------------------|-------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|--------------------|
|       |                                                             | 2,0–2,5                 | 2,5–3,0 | 3,0–3,5 | 3,5–4,0 | 4,0–4,5 | 4,5–5,0 |                    |
| 1     | $m_i$                                                       | 2                       | 1       | 1       | 2       | 1       | 3       |                    |
| 2     | $N_0$                                                       | 32                      | 32      | 32      | 32      | 32      | 32      |                    |
| 3     | $p(t) = (N_0 - \sum m_i) / N_0$                             | 0,937                   | 0,906   | 0,875   | 0,812   | 0,781   | 0,687   |                    |
| 4     | $\overline{N}_i = [N_0 + (N_0 - m_i)] / 2$                  | 31                      | 29,5    | 28,5    | 27      | 25,5    | 23,5    |                    |
| 5     | $m_i / \overline{N}_i$                                      | 0,06                    | 0,031   | 0,035   | 0,074   | 0,039   | 0,127   |                    |
| 6     | $\lambda_i = m_i / \overline{N}_i \cdot \Delta t$           | 0,12                    | 0,062   | 0,07    | 0,148   | 0,078   | 0,254   | $\Sigma = 0,732$   |
| 7     | $\bar{\lambda} = \sum_{i=1}^n \lambda_i / \sum_{i=1}^n i_n$ | 0,122                   | 0,122   | 0,122   | 0,122   | 0,122   | 0,122   |                    |
| 8     | $\lambda_i - \bar{\lambda}$                                 | –0,002                  | –0,060  | –0,052  | 0,026   | –0,044  | 0,005   |                    |
| 9     | $(\lambda_i - \bar{\lambda})^2$                             | 0,000004                | 0,0036  | 0,0026  | 0,0026  | 0,002   | 0,00025 | $\Sigma = 0,00905$ |
| 10    | $\bar{\lambda}(t - t_0)$                                    | 0,0305                  | 0,091   | 0,152   | 0,213   | 0,274   | 0,335   |                    |
| 11    | $p(t) = e^{-\bar{\lambda}(t - t_0)}$                        | 0,94                    | 0,88    | 0,83    | 0,78    | 0,73    | 0,71    |                    |

В строке 9 вычисляем квадрат разности интенсивностей отказов  $(\lambda_i - \bar{\lambda})^2$ . В конце строки подсчитываем сумму

$$\sum_{i=1}^n (\lambda_i - \bar{\lambda})^2 = 0,009.$$

Определяем среднее квадратичное отклонение средней интенсивности отказов

$$\sigma_{\bar{\lambda}} = \sqrt{\frac{0,009}{10}} = 0,03 \text{ тыс. мото-ч}^{-1}.$$

Определяем стандарт среднего квадратичного отклонения интенсивности отказов

$$\varepsilon_{\bar{\lambda}} = \frac{0,03}{\sqrt{10}} = 0,01.$$

По таблице 4 Приложения определяем коэффициент гарантии выборочной средней интенсивности отказов

$$t_{0,8(6-1)} = 1,44.$$

Следовательно, с гарантированной вероятностью  $P_r = 0,8$  можно утверждать, что вычисленная средняя интенсивность отказов на основании выборочной совокупности, по отношению к интенсивности отказов генеральной совокупности, будет лежать в пределах

$$0,122 - 1,44 \cdot 0,01 \leq \bar{\lambda} \leq 0,122 + 0,01 \cdot 1,44, \\ 0,107 \leq \bar{\lambda} \leq 0,136.$$

Определяем средний технический ресурс радиатора дизельного двигателя ЯМЗ-236 (табл. 2.6)

$$\bar{t} = 2,0 + \frac{1}{0,122} = 10,2 \text{ тыс. мото-ч.}$$

С учетом выборочного среднего квадратичного отклонения интенсивности отказов определяем нижнее и верхнее отклонения среднего технического ресурса

$$\bar{t}_{\max} = 2,0 + \frac{1}{0,107} = 11,34 \text{ тыс. мото-ч.},$$

$$\bar{t}_{\min} = 2,0 + \frac{1}{0,136} = 9,35 \text{ тыс. мото-ч.}$$

Вероятность безотказной работы радиатора определяем для каждого интервала наработки по уравнению таблицы 2.6, в котором  $t$  – текущая наработка, тыс. мото-ч.

Восьмидесяти процентный ресурс также определяем по уравнению таблица 2.6.

$$t_{\text{рес.0,8}} = 2,0 + \left( \frac{\ln 0,8}{-0,122} \right) = 3,83 \text{ тыс. мото-ч.}$$

Результаты расчетов сводим в таблицу 2.8 и иллюстрируем графически, как показано на рисунке 2.7

Таблица 2.8

Показатели долговечности радиатора двигателя ЯМЗ-236

| Наименование<br>показателей долговечности                                    | Показатели              |               |          |
|------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|---------------|----------|
|                                                                              | Обозначение             | Размерность   | Величина |
| 1                                                                            | 2                       | 3             | 4        |
| 2.1. Выборочная совокупность                                                 | $N_0$                   | ед.           | 32       |
| 2.2. Число отказов                                                           | $\overline{m}_i$        | ед.           | 10       |
| 2.3. Наработка до первого отказа                                             | $t_0$                   | тыс. мото-ч   | 2,0      |
| 2.4. Средняя интенсивность отказов                                           | $\bar{\lambda}$         | 1/тыс. мото-ч | 0,122    |
| 2.5. Выборочное среднее квадратичное отклонение интенсивности отказов        | $\sigma_{\lambda}$      | тыс. мото-ч   | 0,03     |
| 2.6. Стандарт ошибки среднего квадратичного отклонения интенсивности отказов | $\varepsilon_{\lambda}$ | тыс. мото-ч   | 0,01     |
| 2.7. Коэффициент гарантированной вероятности                                 | $t_2$                   | безразмерный  | 1,44     |
| 2.8. Средний ресурс                                                          | $\bar{t}$               | тыс. мото-ч   | 10,2     |
| 2.9. 80 % – гамма ресурс                                                     | $t_{\text{рес.0,8}}$    | тыс. мото-ч   | 3,83     |

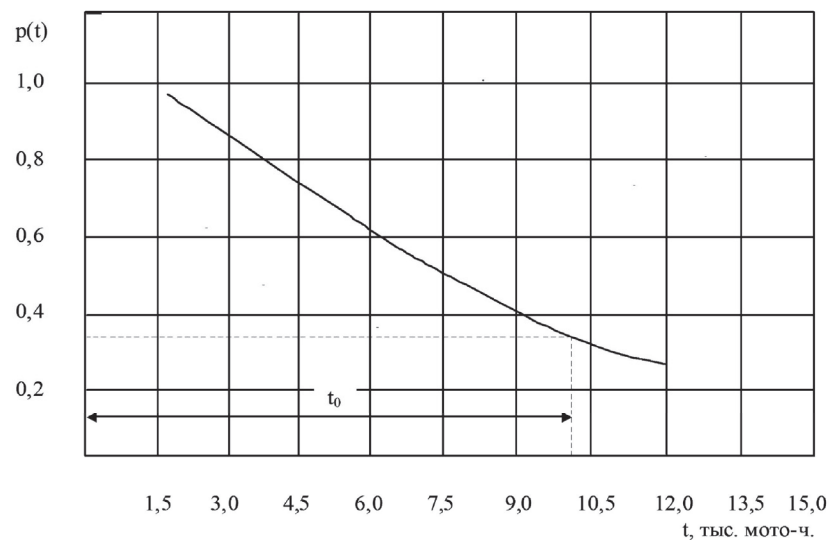


Рис. 2.7. Определение теоретического ресурса работы радиатора

## 2.4 Показатели ремонтпригодности

### 2.4.1. Теоретические предпосылки и общая методика расчёта

Ремонтпригодность оценивается вероятностью восстановления, гамма-процентным и средним временем восстановления работоспособного состояния, интенсивностью восстановления и средним временем восстановления.

*Вероятность восстановления в заданное время*, или вероятность своевременного восстановления, т. е. вероятность того, что время восстановления (время, затрачиваемое на обнаружение, поиск причины отказа и устранение последствий отказа) не превысит заданного.

Вероятность восстановления

$$P_B(t) = P(\bar{T}_B < t), \quad (2.10)$$

где  $\bar{T}_B$  — среднее время восстановления, ч;

$t$  — заданное время устранения отказа, ч.

Для большинства изделий машиностроения вероятность восстановления подчиняется экспоненциальному закону распределения

$$P_B(t) = e^{-\lambda t}. \quad (2.11)$$

Время, в течение которого восстановление работоспособности объекта будет осуществлено с вероятностью  $\gamma$ , выраженной в процентах, называется гамма-процентным временем восстановления. Этот показатель определяют как корень уравнения

$$F(t_\gamma) = 1 - \gamma/100, \quad (2.12)$$

где  $F(t_\gamma)$  — функция распределения ресурса, срока службы.

Статистические оценки для гамма-процентных показателей могут быть получены на основе статистических оценок либо непосредственно, либо после аппроксимации эмпирических функций подходящими аналитическими распределениями. Необходимо иметь в виду, что экстраполирование эмпирических результатов за пределы продолжительности испытаний (наблюдений) без привлечения дополнительной информации о физической природе отказов может привести к значительным ошибкам.

*Среднее время восстановления* — это математическое ожидание времени восстановления работоспособности. При наличии статистических данных о длительностях восстановления для восстанавливаемых (ремонтируемых) объектов среднее время восстановления  $\bar{T}_B$  следует определять по формуле

$$\bar{T}_B = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m t_{ei}, \quad (2.13)$$

где  $m$  — число обнаруженных и устраненных отказов объектов;

$t_{ei}$  — время восстановления отказа.

Если рассматривать подряд все промежутки  $t_{ei}$  (в порядке возрастания индекса  $i$ ), то эти величины можно рассматривать как поток восстановления, имеющий чаще всего логарифмически нормальное распределение. В качестве характеристики рассеивания времени восстановления, как и для других случайных величин, используется также дисперсия и среднее квадратическое отклонение.

*Интенсивность восстановления* — это условная плотность вероятности восстановления работоспособного состояния объекта,

определенная для рассматриваемого момента времени при условии, что до этого момента восстановление не было завершено.

*Средняя трудоемкость восстановления* – это математическое ожидание трудоемкости восстановления объекта после отказа.

$$\bar{S}_B = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N S_{Bi}, \quad (2.14)$$

где  $S_{Bi}$  – трудоемкость восстановления  $i$ -го объекта за некоторый период эксплуатации.

Затраты времени и труда на проведение технического обслуживания и ремонта с учетом конструктивных особенностей объекта, его технического состояния и условий эксплуатации характеризуются оперативными показателями ремонтпригодности.

При определении количественных показателей ремонтпригодности следует использовать формулы, приведенные в таблице 2.9

Таблица 2.9

**Формулы для определения показателей ремонтпригодности**

| Рассчитываемые величины                                              | Формулы                                                              |
|----------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|
| 1. Коэффициент отказа для сборочной единицы (детали)                 | $K_j = \frac{\sum_{i=1}^n m_{ij}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k m_{ij}}$ |
| 2. Среднее время простоя, отнесенное к одной машине                  | $\bar{\Gamma}_j = \Gamma_j \cdot K_j$                                |
| 3. Средняя трудоемкость устранения отказа, отнесенная к одной машине | $\bar{T}_j = T_j \cdot K_j$                                          |
| 4. Средняя стоимость устранения отказа, отнесенная к одной машине    | $\bar{C}_j = C_j \cdot K_j$                                          |
| 5. Удельное суммарное время простоя при устранении отказа            | $\gamma_0 = \sum_{j=1}^k \bar{\Gamma}_j / t_{n+1}$                   |
| 6. Коэффициент готовности                                            | $K_r = 1 - \frac{\sum_{j=1}^k \bar{\Gamma}_j}{t_{n+1}}$              |

Продолжение

| Рассчитываемые величины                                                                   | Формулы                                                                                                                                                                                           |
|-------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 7. Количество ТР и ТО-3, ТО-2, ТО-1                                                       | $n_{mp} = t_{\max} / t_{mp}$ $n_{mo-3} = (t_{\max} / t_{mo-3}) - n_{mp}$ $n_{mo-2} = (t_{\max} / t_{mo-2}) - n_{mp} - n_{mo-3}$ $n_{mo-1} = (t_{\max} / t_{mo-1}) - n_{mp} - n_{mo-3} - n_{mo-2}$ |
| 8. Среднее время простоя при проведении текущего ремонта ТО-3, ТО-2, ТО-1                 | $\sum \Gamma_{mo} = \Gamma_{mp} \cdot n_{mp} + \Gamma_{mo-3} \cdot n_{mo-3} +$ $+ \Gamma_{mo-2} \cdot n_{mo-2} + \Gamma_{mo-1} \cdot n_{mo-1}$                                                    |
| 9. Удельная суммарная продолжительность устранения отказа проведения ТР, ТО-3, ТО-2, ТО-1 | $\gamma_y = \gamma_0 + \gamma_{mo}$                                                                                                                                                               |

Примечание: ТР – текущий ремонт; ТО – техническое обслуживание.

### 2.4.2. Пример расчета количественных показателей ремонтпригодности двигателя ЯМЗ-236

Расчет показателей ремонтпригодности проводим при следующих условиях.

1. Расчет проводим на основе систематизации отказов машин, плановых технических обслуживаний и ремонтов.

2. Среднее время вынужденного простоя машины по причине устранения отказа в общем случае определяем по формуле

$$\bar{\Gamma}_j = \frac{\sum_{i=1}^n \Gamma_{ij}}{\sum_{i=1}^n m_{ij}}. \quad (2.15)$$

Студентам эта величина дается в задании.

3. В общем случае средняя трудоемкость устранения отказа и средняя стоимость устранения его рассчитываются по аналогичным формулам.

4. Количественно ремонтпригодность машины оцениваем по следующим показателям:

- а) характеризующими отказ;
- б) характеризующими плановые технические обслуживания и ремонты;
- в) комплексным.

5. Расчет проводим по уравнениям, приведенным в таблице 2.9.  
Для проведения расчетов показателей ремонтпригодности данные об отказах систематизируем в таблицу 2.10.

Таблица 2.10

Расчет показателей ремонтпригодности двигателя ЯМЗ-236

| Наименование отказавших деталей и узлов  | $\sum_{i=1}^n m_{ij}$ | $K = \frac{\sum_{i=1}^n m_{ij}}{N_0}$ | Время простоя, ч |             | Трудоемкости устранения отказа, человеко-ч |            | Стоимость устранения отказа, руб. |            |
|------------------------------------------|-----------------------|---------------------------------------|------------------|-------------|--------------------------------------------|------------|-----------------------------------|------------|
|                                          |                       |                                       | на 1 отказ       | на 1 объект | на 1 отказ                                 | на 1 отказ | на 1 отказ                        | на 1 отказ |
| 1                                        | 2                     | 3                                     | 4                | 5           | 6                                          | 7          | 8                                 | 9          |
| 1. Трещина выпускного коллектора         | 8                     | 0,25                                  | 12               | 3           | 6                                          | 1,5        | 4,0                               | 1,0        |
| 2. Износ клапанных гнезд                 | 9                     | 0,28                                  | 40               | 11,2        | 68                                         | 19,04      | 21,0                              | 5,88       |
| 3. Трещина гильзы                        | 6                     | 0,187                                 | 27               | 5,04        | 43                                         | 8,04       | 35,0                              | 6,54       |
| 4. Разрыв шатунного болта                | 7                     | 0,218                                 | 20               | 4,36        | 61                                         | 13,3       | 21,0                              | 4,58       |
| 5. Поломка лопасти турбокомпрессора      | 6                     | 0,187                                 | 18               | 3,36        | 31                                         | 5,79       | 15,0                              | 2,80       |
| 6. Нарушение регулировки компрессора     | 21                    | 0,656                                 | 8                | 5,25        | 4                                          | 2,62       | 2,52                              | 1,64       |
| 7. Трещина радиатора                     | 10                    | 0,312                                 | 12               | 3,74        | 7                                          | 2,18       | 3,0                               | 0,94       |
| 8. Нарушение регулировки муфты сцепления | 12                    | 0,375                                 | 2                | 0,75        | 3                                          | 1,12       | 1,4                               | 0,525      |

Продолжение

| Наименование отказавших деталей и узлов | $\sum_{i=1}^n m_{ij}$ | $K = \frac{\sum_{i=1}^n m_{ij}}{N_0}$ | Время простоя, ч |             | Трудоемкости устранения отказа, человеко-ч |            | Стоимость устранения отказа, руб. |            |
|-----------------------------------------|-----------------------|---------------------------------------|------------------|-------------|--------------------------------------------|------------|-----------------------------------|------------|
|                                         |                       |                                       | на 1 отказ       | на 1 объект | на 1 отказ                                 | на 1 отказ | на 1 отказ                        | на 1 отказ |
| 1                                       | 2                     | 3                                     | 4                | 5           | 6                                          | 7          | 8                                 | 9          |
| 9. Срыв фрикционных накладок            | 7                     | 0,218                                 | 21               | 4,58        | 35                                         | 7,63       | 18,0                              | 3,92       |
| 10. Трещина корпуса муфты сцепления     | 4                     | 0,125                                 | 25               | 3,12        | 30                                         | 3,75       | 13,0                              | 1,62       |
| Итого                                   |                       |                                       |                  | 49,27       |                                            | 72,13      |                                   | 28,23      |

В столбце 3 подсчитываем относительный коэффициент отказов для каждой строки.

В столбцах 5, 7, и 9 по формулам (2.16), (2.18), (2.19) подсчитываем среднее время простоя, среднюю трудоемкость устранения отказа и среднюю стоимость устранения отказа, отнесенные к одному двигателю.

В конце столбцов 5, 7 и 9 подсчитываем суммарные значения рассчитываемых величин.

Определяем среднее удельное время простоя двигателя на ремонте

$$\bar{\gamma} = \frac{\sum_{i=1}^n \Gamma_{ij}}{t_{n+1}} \text{ ч/тыс. мото-ч.}, \quad (2.16)$$

$$\bar{\gamma} = \frac{49,27}{5,0} = 9,85 \text{ ч/тыс. мото-ч.}$$

Средний коэффициент готовности двигателя

$$K_z = 1 - \bar{\gamma}, \quad (2.17)$$

$$K_z = 1 - 0,009 = 0,991.$$

Средняя удельная трудоемкость устранения отказов двигателя составит

$$\bar{t}_0 = \frac{\sum_{j=1}^n T_j}{t_{n+1}}, \text{ чел. ч./тыс. мото-ч.} \quad (2.18)$$

$$\bar{t}_0 = \frac{72,13}{5,0} = 14,42 \text{ чел. ч./тыс. мото-ч.}$$

Средняя удельная стоимость устранения отказов двигателя составит

$$\bar{C}_0 = \frac{\sum_{j=1}^n C_j}{t_{n+1}} \text{ руб/тыс. мото-ч.} \quad (2.19)$$

$$\bar{C}_0 = \frac{28,23}{5,0} = 5,65 \text{ руб/тыс. мото-ч.}$$

В таблице 2.11 проводим необходимые для расчета показателей ремонтпригодности данные по плановым ТО, выполняемым в процессе эксплуатации. Условия эксплуатации таковы, что:

- а) ТО – 1 выполняется силами тракториста-машиниста: в стоимость включены расходы на ТСМ.
- б) ТО – 2 и ТО – 3, а также текущий ремонт выполняются на станциях технического обслуживания объединения «Сельхозтехника».
- в) ТО – 3 при возникновении отказа группы III перепланируется.

В столбце 6 таблицы 2.11 записано количество ТО и ремонтов, вычисленных по формулам (2.20)...(2.23)

$$n_{mp} = \frac{t_{\max}}{t_{mp}}, \quad (2.20)$$

$$n_{mo-3} = \frac{t_{\max}}{t_{mo-3}} - n_{mp}, \quad (2.21)$$

$$n_{mo-2} = \frac{t_{\max}}{t_{mo-2}} - n_{mo-3} - n_{mp}, \quad (2.22)$$

$$n_{mo-1} = \frac{t_{\max}}{t_{mo-1}} - n_{mo-2} - n_{mo-3} - n_{mp}. \quad (2.23)$$

$$n_{mp} = \frac{5000}{1920} = 2,6, \text{ принимаем } 3;$$

$$n_{mo-3} = \frac{5000}{960} - 3 = 3;$$

$$n_{mo-2} = \frac{5000}{240} - 3 - 3 = 13;$$

$$n_{mo-1} = \frac{5000}{60} - 3 - 3 - 13 = 64.$$

Таблица 2.11

**Расчет показателей текущего обслуживания и ремонтов**

| Наименование технического обслуживания и ремонта | Периодичность ТО и ТР $t_n$ , моточас. | Время простоя при проведении ТО и ТР $\Gamma_{то}$ , ч | Трудоемкость проведения ТО и ТР $T_{то}$ , чел. ч. | Стоимость проведения ТО и ТР $C_{то}$ , руб. | Количество ТО и ТР $n$ , шт. | Примечание |
|--------------------------------------------------|----------------------------------------|--------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|----------------------------------------------|------------------------------|------------|
| 1                                                | 2                                      | 3                                                      | 4                                                  | 5                                            | 6                            | 7          |
| ТО – 1                                           | 60                                     | 0,3                                                    | –                                                  | 1,5                                          | 64                           |            |
| ТО – 2                                           | 240                                    | 0,7                                                    | 2,1                                                | 8,9                                          | 13                           |            |
| ТО – 3                                           | 960                                    | 3,1                                                    | 6,3                                                | 19,0                                         | 3                            |            |
| ТР                                               | 1920                                   | 3,5                                                    | 78                                                 | 193                                          | 3                            |            |

Определяем суммарное время простоя, трудоемкость проведения ТО и стоимость ремонта и ТО за период наработки 5000 мот-ч.

$$\sum \Gamma_{то} = 35 \cdot 3 + 3,1 \cdot 3 + 0,7 \cdot 13 + 0,3 \cdot 64 = 142,6 \text{ ч,}$$

$$\sum T_{то} = 78 \cdot 3 + 6,3 \cdot 3 + 2,1 \cdot 13 = 280,2 \text{ чел-ч,}$$

$$\sum C_{то} = 197 \cdot 3 + 19,0 \cdot 3 + 8,9 \cdot 13 + 1,5 \cdot 64 = 959,7 \text{ руб.}$$

Определяем средние удельные простои, трудоемкости и стоимости ТО и ТР.

$$\overline{\gamma}_{TO} = 142,6/50 = 28,52 \text{ ч/тыс. мото-ч.},$$

$$\overline{t}_{TO} = 280,2/50 = 56,04 \text{ чел. ч/тыс. мото-ч.},$$

$$\overline{C}_{TO} = 959,7/50 = 191,94 \text{ руб/тыс. мото-ч.}$$

Определяем средние удельные простои, трудоемкости и стоимости на устранение отказов и проведение ТО и ТР.

$$\gamma_y = 9,85 + 28,52 = 38,37 \text{ ч/тыс. мото-ч.},$$

$$t_y = 14,42 + 56,04 = 70,45 \text{ чел-ч/тыс. мото-ч.},$$

$$C_y = 5,65 + 191,94 = 197,59 \text{ руб/тыс. мото-ч.}$$

Определяем коэффициент технического использования двигателя по выражению таблицы 2.9

$$K_{ТИ} = 1 - \frac{191,87}{5000} = 0,962.$$

Результаты расчетов сводим в таблицу 2.12.

Таблица 2.12

**Показатели ремонтпригодности двигателя ЯМЗ-236**

| Наименование показателей                      | Показатели               |                    |          | Примечание |
|-----------------------------------------------|--------------------------|--------------------|----------|------------|
|                                               | Обозначение              | Размерность        | Значение |            |
| 1. Среднее время устранения отказов           | $\overline{\gamma}_0$    | ч/тыс. ч.          | 9,85     |            |
| 2. Средняя трудоемкость устранения отказов    | $\overline{t}_0$         | чел-ч/тыс. мото-ч. | 14,42    |            |
| 3. Средняя стоимость устранения отказов       | $\overline{C}_0$         | руб/тыс. мото-ч.   | 5,65     |            |
| 4. Коэффициент готовности                     | $K_r$                    | безразмерный       | 0,991    |            |
| 5. Среднее удельное время ТО и ремонта        | $\overline{\gamma}_{TO}$ | ч/тыс. мото-ч.     | 28,52    |            |
| 6. Средняя удельная трудоемкость ТО и ремонта | $\overline{t}_{TO}$      | чел-ч/тыс. мото-ч. | 56,04    |            |

Продолжение

| Наименование показателей                                              | Показатели            |                       |          | Примечание |
|-----------------------------------------------------------------------|-----------------------|-----------------------|----------|------------|
|                                                                       | Обозначение           | Размерность           | Значение |            |
| 7. Средняя удельная стоимость ТО и ремонта                            | $\overline{C}_{TO}$   | тыс. руб/тыс. мото-ч. | 191,94   |            |
| 8. Удельные простои при устранении отказов, ТО и ремонте              | $\overline{\gamma}_y$ | чел./тыс. мото-ч.     | 38,37    |            |
| 9. Удельная трудоемкость устранения отказов и проведения ТО и ремонта | $\overline{t}_y$      | чел-ч/тыс. мото-ч     | 70,46    |            |
| 10. Удельная стоимость устранения отказов и проведения ТО и ремонта   | $\overline{C}_y$      | тыс. руб.             | 197,59   |            |
| 11. Коэффициент технического использования                            | $K_{ТИ}$              | безразмерный          | 0,962    |            |

## 2.5. Расчет расхода запасных частей

### 2.5.1. Теоретические предпосылки и общая методика расчета

Основные зависимости для расчета расхода запасных частей представлены в таблице 2.13.

Таблица 2.13

**Формулы для расчета расхода запасных частей**

| Рассчитываемые величины                                                                                   | Формулы или метод определения                                               |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|
| 1. Среднее число машин, исправно работающих в период наблюдения по причине возникновения $j$ -того отказа | $\overline{N}_j = \frac{N_0 + \left( N_0 - \sum_{i=1}^n m_{ij} \right)}{2}$ |
| 2. Величина интервала наработки, когда было зафиксировано $m_{ij}$ отказов                                | $\Delta t = t_{\max} - t_0$                                                 |

| Рассчитываемые величины                                                                                                | Формулы<br>или метод определения                                                 |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|
| 3. Средняя интенсивность отказов по причине возникновения $j$ -того отказа                                             | $\bar{\lambda}_j = \frac{\sum_{i=1}^n m_{ij}}{\Delta t \cdot N_j}$               |
| 4. Нарботка на отказ для $j$ -того отказа                                                                              | $\bar{t}_{0j} = t_0 + \frac{1}{\bar{\lambda}_j}$                                 |
| 5. Средний расход запасных частей для годовой наработки                                                                | $\bar{n}_j = \frac{N_0 \cdot l \cdot t_{год}}{\bar{t}_{0j}}$                     |
| 6. Табулированное значение отношения расхода запасных частей при вероятности $\alpha$ к среднему расходу               | $\rho$ – находится по таблице 5 прил. в зависимости от значения $\alpha$ и $n_j$ |
| 7. Годовой расход запасных частей $j$ -того вида при вероятности $\alpha$                                              | $n_\alpha = \bar{n}_j \cdot \rho$                                                |
| 8. Среднегодовой расход запасных частей для устранения $j$ -того отказа при вероятности $\alpha$ для парка в 100 машин | $n_\alpha^{100} = \frac{n_\alpha \cdot 100}{N_0}$                                |

### 2.5.2. Пример расчета норм расхода запасных частей

Расчет следует проводить при следующих условиях:

1. Расчет расхода запасных частей ведем на период годовой наработки для заданного парка машин и на 100 машин.
2. Расчет проводим на основании систематизации отказов машин за период наблюдения.
3. Расчет проводим для всех отказов, которые устраняются путем вышедших из строя деталей или сборочных единиц.
4. Так как расчет ведем для выборочной совокупности, то при расчете нормы расхода запасных частей для генеральной совокупности задается вероятностью  $\beta$ . Для сельскохозяйственного производства  $\beta$  лежит в пределах от 0,8 до 0,9.

Расчет расхода запасных частей ведем для тех отказов, которые указаны в задании, результаты оформляем в табличную форму (табл. 2.14).

Результаты расчета норм расхода запасных частей

| Наименование отказавших деталей и узлов  | $m_j$ | $N_0$ | $\bar{N}$ | $\Delta t$ | $\bar{\lambda}_j$ | $\bar{t}_{0j}$ | $l$ | $\beta$ | $t_{год}$ | $\bar{n}_j$ | $\rho$ | $n_{aj}$ | $n_{aj100}$ |
|------------------------------------------|-------|-------|-----------|------------|-------------------|----------------|-----|---------|-----------|-------------|--------|----------|-------------|
| 1                                        | 2     | 3     | 4         | 5          | 6                 | 7              | 8   | 9       | 10        | 11          | 12     | 13       | 14          |
| 1. Трещина выпускного коллектора         | 8     | 32    | 28        | 5,0        | 0,057             | 17,54          | 1   | 0,9     | 1,0       | 1,8         | 1,96   | 3,5      | 11          |
| 2. Износ клапанных гнезд                 | 9     | 32    | 27,5      | 4,0        | 0,082             | 13,19          | 1   | 0,9     | 1,0       | 2,4         | 1,96   | 4,7      | 16          |
| 3. Трещина гильзы                        | 6     | 32    | 29        | 4,5        | 0,046             | 22,23          | 1   | 0,9     | 1,0       | 1,4         | 1,96   | 3,4      | 12          |
| 4. Разрыв шатунных болтов                | 7     | 32    | 28,5      | 7,0        | 0,061             | 17,39          | 1   | 0,9     | 1,0       | 1,3         | 1,96   | 4,5      | 16          |
| 5. Поломка лопасти турбины               | 6     | 32    | 29        | 5,0        | 0,041             | 24,39          | 1   | 0,9     | 1,0       | 1,3         | 1,96   | 2,5      | 1,0         |
| 6. Нарушение регулировки форсунки        | 21    | 32    | 21,5      | 4,5        | 0,217             | 5,10           | –   | 0,9     | –         | –           | –      | –        | –           |
| 7. Трещина радиатора                     | 10    | 32    | 27        | 3,0        | 0,123             | 10,13          | 1   | 0,9     | 1,0       | 3,1         | 1,94   | 7,4      | 26          |
| 8. Нарушение регулировки муфты сцепления | 12    | 32    | 26        | 4,5        | 0,102             | 10,30          | –   | 0,9     | –         | –           | –      | –        | –           |
| 9. Срыв фрикционных накладок             | 7     | 32    | 28,5      | 4,5        | 0,054             | 20,00          | 2   | 0,9     | 1,0       | 1,6         | 1,96   | 3,8      | 13          |
| 10. Трещина корпуса муфты сцепления      | 4     | 32    | 30        | 3,5        | 0,038             | 27,81          | 1   | 0,9     | 1,0       | 1,2         | 1,96   | 2,9      | 10          |

В столбце 1 записываем наименование отказавших деталей и сборочных единиц. Заполнение столбцов 2 и 3 не требует пояснений, они берутся из таблиц заданий. В столбце 4 подсчитываем среднее количество двигателей, исправно работавших в исследуе-

мом интервале наработки (от начала испытания до окончания). Например, для строки 1 имеем

$$N_{cp} = \frac{32 + (32 - 8)}{2} = 28.$$

В столбце 5 для каждого отказа записываем величину интервала наработки от первого отказа до момента наступления последнего отказа. Для строки 2

$$\Delta t = 5,0 - 1,0 = 4,0 \text{ тыс. мото-ч.}$$

В столбце 6 рассчитываем среднюю интенсивность отказов в интервале наработки  $\Delta t$ . Для строки 1

$$\bar{\lambda}_j = \frac{8}{5,0 \cdot 28} = 0,057 \text{ тыс. мото-ч}^{-1}.$$

В столбце 7 рассчитываем среднюю наработку на отказ для каждого вида отказа.

Для строки 1:

$$\bar{t}_{0,1} = \frac{1}{0,057} = 17,54 \text{ тыс. мото-ч.}$$

В столбце 8 записываем количество заменяемых деталей при устранении отказа, исходя из конструктивных особенностей машины. Например, при устранении отказа, записанного в строке 11, заменяются обе накладки. Там где отказ устраняется регулировкой, ставится прочерк, и далее расчеты не ведутся.

В столбце 9 записываем заданную преподавателем или принятую вероятность.

В столбце 10 записываем среднюю годовую наработку машины. Для трактора Т-150К и К-700 для условий Ставропольского края она составляет 1,0–1,5 тыс. мото-ч.

В столбце 11 подсчитываем среднюю годовую норму расхода запасных частей на устранение отказов для расчетного парка машин (равного  $N_0$ ). Для первой строки имеем

$$\bar{n}_j = \frac{32 \cdot 1,0}{17,54} = 1,8.$$

По таблице 5 Приложения в зависимости от величин  $n_j$  и  $\alpha$  находим коэффициент  $\rho$  и заносим в таблицу 4.2.

В столбце 13 по формуле подсчитываем норму расхода запасных частей при вероятности  $\beta$ . Для строки 1 имеем

$$n_\beta = 1,8 \cdot 1,96 = 3,5.$$

В столбце 14 по формуле подсчитываем норму расхода запасных частей при вероятности  $\alpha$  из расчета на парк в 100 машин. Для строки 1 имеем

$$n_{\beta 100} = \frac{3,5 \cdot 100}{32} = 11.$$

В этом столбце норму запасных частей округляем до ближайшего большего значения.

### 3. СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ИЗНОСОВ ДЕТАЛЕЙ

#### 3.1. Теоретическое обоснование

*Изнашивание* – это процесс разрушения или отделение материала с поверхности твердого тела и (или) накопления его остаточной деформации при трении, проявляющийся в постепенном изменении размеров и (или) формы тела.

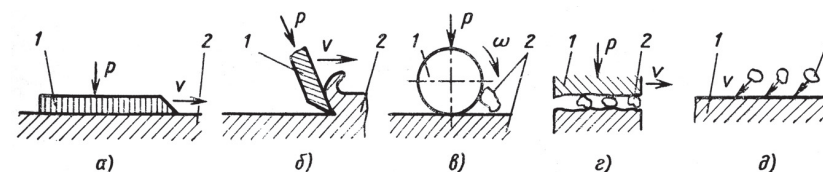
Процесс изнашивания чрезвычайно сложен и многообразен, что обусловлено характером и условием трения, а также физико-химическими явлениями и многообразием факторов влияющих на них.

Чтобы эффективно управлять процессами изменения технического состояния машин и обосновывать мероприятия, направленные на снижение интенсивности изнашивания деталей машин, следует определять в каждом конкретном случае вид изнашивания поверхностей. Для этого необходимо задать следующие характеристики: тип относительного перемещения поверхностей (схему фрикционного контакта); характер промежуточной среды (вид смазочного материала или рабочей жидкости); основной механизм изнашивания.

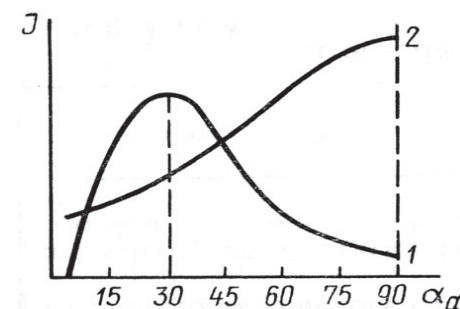
В соединениях машин существуют четыре типа относительного перемещения рабочих поверхностей деталей: скольжение, качение, удар, осцилляция (перемещение, имеющее характер относительных колебаний с малой амплитудой в среднем 0,02–0,05 мм).

Согласно ГОСТ 23.002–85 изнашивание разделяют на следующие виды:

- **механическое** (абразивное (рис. 3.1), гидро- и газо- абразивное, эрозионное, гидро- и газозерозионное, кавитационное, усталостное, изнашивание при заедании, изнашивание при фреттинге);
- **коррозионно-механическое** (окислительное, изнашивание при фреттинг-коррозии);
- **изнашивание при действии электрического тока** (электроэрозионное).



**Рис. 3.1. Схемы деталей сельскохозяйственных машин, работающих в условиях абразивного изнашивания:**  
**а** – рабочие органы; **б** – режущие кромки рабочих органов;  
**в** – опорные катки, гусеницы, элементы открытых зубчатых передач, покрышки колес; **г** – опоры скольжения; **д** – детали трубопроводов гидросистем, пневмоинструмента; **1** – деталь; **2** – абразив



**Рис. 3.2. Зависимость интенсивности гидро- и газоабразивного изнашивания от угла атаки  $\alpha_0$  абразивных частиц:**  
**1** – для пластичных; **2** – для хрупких материалов

**Механическое изнашивание** возникает в результате механических воздействий на поверхность трения.

**Коррозионно-механическим** называют изнашивание в результате механического воздействия, сопровождаемого химическим и (или) электрическим взаимодействием материала со средой.

**Электроэрозионным** называют эрозионное изнашивание поверхности в результате воздействия разрядов при прохождении электрического тока.

*Основными характеристиками изнашивания являются:*

1. Скорость изнашивания – отношение величины износа ко времени, в течение которого он возник. Различают мгновенную (в определенный момент времени) и среднюю скорость изнашивания (за определенный интервал времени).

2. Интенсивность изнашивания – отношение величины износа к обусловленному пути, на котором происходило изнашивание, или к объему выполненной работы.
3. Износостойкость – свойства материалов оказывать сопротивление изнашиванию в определенных условиях трения, оцениваемое величиной, обратной скорости или интенсивности изнашивания.
4. Относительная износостойкость – отношение износостойкости испытываемого материала и материала, принятого за эталон, при их изнашивании в одинаковых условиях (рис. 3.3).

В реальных условиях работы соединений машин наблюдаются одновременно несколько видов изнашивания. Однако, как правило, удастся установить ведущий вид изнашивания, лимитирующий долговечность деталей, и отделить его от остальных, сопутствующих видов разрушения поверхностей, незначительно влияющих на работоспособность соединения.

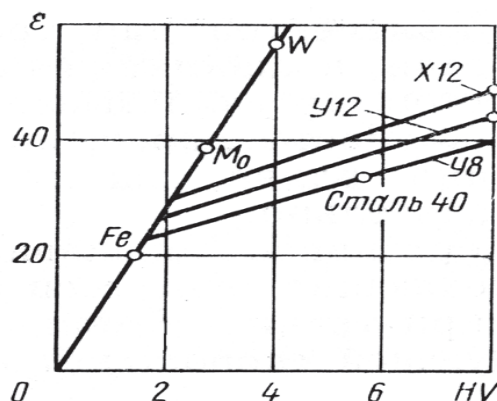


Рис. 3.3. Зависимость относительной износостойкости поверхности при абразивном изнашивании от твердости материалов

Для выявления полной совокупности факторов, влияющих на характер и интенсивность изнашивания элементов машин, необходимо рассмотреть систему механизм – оператор – внешняя среда – режим работы – эксплуатационные воздействия. Под механизмом в данном случае подразумевается машина в целом, сборочная единица или соединение в зависимости от цели исследования. Рас-

сматриваемую систему можно представить в виде функционального выражения:

$$I = \varphi (\mathcal{E}, K, T, O), \quad (3.1)$$

где  $\mathcal{E}, K, T$  – символы, объединяющие группу факторов соответственно эксплуатационных, конструктивных, технологических;  
 $O$  – символ, учитывающий влияние субъективных особенностей оператора.

В результате анализа явления изнашивания элементов машин как системы выделены следующие основные факторы, определяющие их долговечность:

- эксплуатационные – характер производимых работ; режимы использования механизма; виды и периодичность технических управляющих воздействий; климатические условия работы механизма; состояние смазочных материалов и рабочих жидкостей; состояние фильтрующих и уплотнительных элементов;
- конструктивные – вид трения рабочих поверхностей; характер нагружения; концентрация напряжений; наличие защитных покрытий; наличие компенсаторов износа; кинематика и динамика работы механизма; соотношение материалов деталей соединения;
- технологические – структура поверхностного слоя металла; методы обработки поверхности; наличие остаточных напряжений; качество сборки соединений; наличие технологических загрязнений (стружки, окалины и др.) в картерах и емкостях машины; показатели микрогеометрии поверхностей трения;
- субъективные особенности оператора – уровень профессиональной подготовки (квалификация); антропометрические и 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 соединений, определяющие условия трения и изнашивания деталей. Управляющие воздействия: регулировочные, крепежные и смазочные операции, проводимые в процес-

се технического обслуживания, позволяют в значительной степени уменьшить отрицательное влияние агрессивных компонентов внешней среды и внутренних процессов, происходящих в элементах соединений, на долговечность 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.

Условия трения и изнашивания элементов соединений 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 состояние топливно-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 механизмов. От кинематики относительного перемещения рабочих поверхностей деталей соединения зависят вид трения и условия изнашивания. Динамика работы механизма обуславливает характер нагружения и формирования полей внутренних напряжений в материалах деталей. Соотношение материалов деталей соединения оказывает решающее влияние на их фрикционное взаимодействие и на долговечность машины.

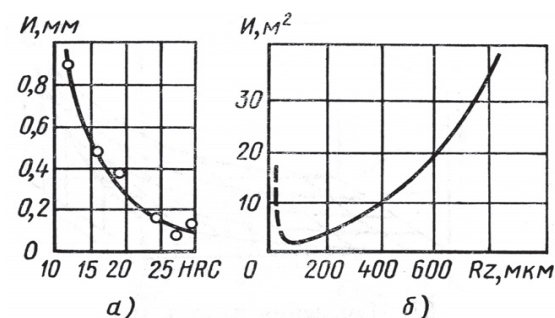
Из технологических факторов основными являются методы обработки поверхностей и качество сборки соединений. Метод обработки поверхностей деталей определяет структуру материалов и их физико-механические свойства, наличие остаточных напряжений, микрогеометрию поверхностного слоя. От качества сборки соединений зависят 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 соединений.

Субъективные особенности оператора существенно влияют на 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 ежедневного обслуживания машины квалифицированным оператором является необходимым условием наиболее полной реализации уровня надежности, заложенного в конструкцию машины при ее проектировании и изготовлении.

**Износ** – результат изнашивания, определяемый в установленных единицах. Он является следствием комплексного воздействия на деталь различных факторов. В зависимости от условий работы износ может иметь различные формы: пластическое деформирование, микро – и макроразрушения вследствие механических воздействий, коррозии, эрозии и других видов изнашивания.

Износ деталей зависит от сочетания большого количества факторов не связанных между собой какими-либо зависимостями и изменяющимися под влиянием случайных факторов. Например: условия работы, твердость материала (рис. 5а), шероховатость поверхности (рис. 5б), вид и качество смазки, скорость перемещения и т. д. Они не зависят друг от друга, но влияют на величину шероховатости.



**Рис. 3.4. Зависимость износа втулок:**

а – от твердости материала (БрАЖН 10-4-4);

б – от шероховатости рабочей поверхности (сталь 45)

Оценка степени износа той или иной детали может быть выполнена следующими методами:

- органолептический;
- микрометрирование;
- взвешивание;
- метод искусственных баз (преимущества – точность измерения);
- профилографирование поверхности (при научных исследованиях);
- определение износа по содержанию продуктов износа в отработанном масле;
- метод поверхностной активации;
- пневмогидравлический метод (при диагностировании).

Все методы определения износа делятся на две группы: методы периодического определения износа и методы измерения износа в процессе испытания без остановки машины. Выбор метода определения износа производится исходя из целей и задач исследования, требуемой точности и достоверности полученных результатов.

Почти для всех деталей, подверженных изнашиванию, закон нарастания износа представляет собой кривую (рис. 3.5). Эта кривая состоит из трех явно выраженных участков.

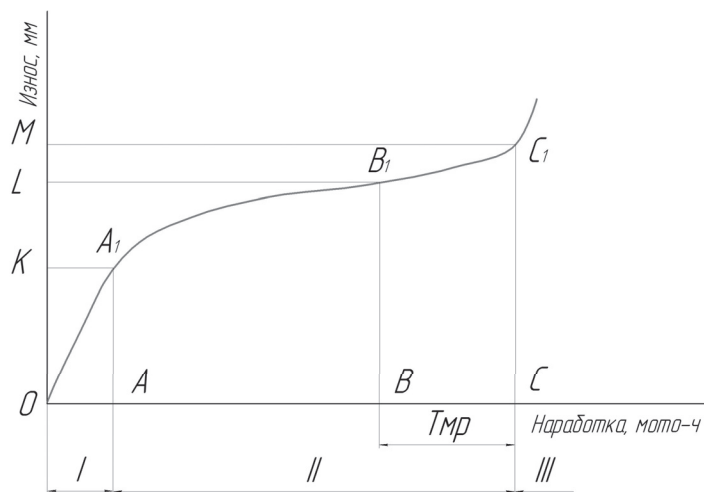


Рис. 3.5. Характерная кривая изнашивания деталей

Износ на участке I кривой  $OA_1$  характеризуется быстрым нарастанием износа  $OK$  за сравнительно малый период работы  $OA$ . Он выражает начальную работу соединения – период приработки деталей, при которой интенсивность изнашивания зависит от шероховатости, рабочей поверхности, условий смазки и нагрузки.

Участок II кривой  $AC_1$  наибольший по протяженности, характеризует нормальную работу соединения, при которой износ деталей нарастает постепенно, с наименьшей интенсивностью. Его значение во многом зависит от условий эксплуатации, а также от своевременности и качества проводимого технического обслуживания машин.

Участок III за точкой  $C_1$  характеризуется интенсивным нарастанием износа деталей и резким увеличением зазоров в соединениях. Такие износы называют предельными. Детали с предельными износами необходимо восстановить или заменить.

### 3.2 Общая последовательность определения коэффициентов годности и восстановления деталей

*Определяем износы исследуемых деталей и составляем сводную ведомость износной информации в порядке возрастания износа.*

При этом необходимо определить количество деталей, годных без ремонта в соединении с новыми или бывшими в эксплуатации деталями, а также количество деталей, требующих восстановления. Для этого надо измерить заданную поверхность у 40...50 изношенных деталей. Измеряемая поверхность должна быть тщательно очищена от загрязнений.

Для измерения выбирают инструмент необходимой точности в соответствии с техническими требованиями на капитальный ремонт данной машины. Зная размеры изношенной поверхности детали, полученные микрометром, определяют величину ее износа.

При определении износа вала, полученные микрометром размеры, вычитают из его наименьшего предельного размера, а для отверстий наоборот – наибольший предельный размер вычитают из размеров, полученных при измерении.

Учитывая значительное рассеивание первичной информации при проведении наблюдений, важно правильно выбрать количество наблюдений (повторность информации). Недостаточное ко-

личество наблюдений может внести ошибку в результаты расчетов показателей надежности и сделать их непригодными для практического использования. С другой стороны, очень большая повторяемость наблюдений не приемлема из-за больших расходов на проведения наблюдений. Количество и качество исходной информации должно быть таким, чтобы независимо от метода ее обработки относительная ошибка переноса не превышала 10...20 %. С этой целью проводят поисковые испытания для получения предварительной информации о разбросе значений показателя надежности.

При сборе информации по износам минимальное число исследуемых деталей  $N$ , необходимых для получения достоверных результатов, определяем по формуле

$$N = 53,8\sqrt{n}, \quad (3.2)$$

где  $n$  – число исследуемых дефектов на детали.

Оценка надежности объектов при помощи математических методов основано на обобщении накопленной статистической информации об их работе в реальных условиях эксплуатации и позволяет выявлять вероятностные закономерности и соотношения между случайными факторами, в различной мере влияющие на работоспособность, безотказность и долговечность объектов. Методы исследования надежности основаны на том, что отказ – случайное событие и для его предупреждения необходимо знать физические причины и закономерности его возникновения и развития.

*Составляем статистический ряд.*

*Определяем числовые характеристики показателей износа: среднее арифметическое значение износа детали, среднеквадратическое отклонение, коэффициент вариации.*

*Проверяем информацию на выпадающие точки по критерию Ирвина и при необходимости уточнить числовые характеристики износа.*

*Строим графически опытное распределение износов.*

*Подбираем теоретический закон распределения износов и по критерию Колмогорова установить степень согласования опытного и теоретического распределения износов.*

*Определяем доверительные границы рассеивания значений износа и доверительный интервал для среднего значения износа для выбранной доверительной вероятности  $\alpha$ .*

*Определяем относительную ошибку расчета характеристик износа и делаем заключение о достоверности выполненных расчетов.*

*Определяем количество деталей годных без ремонта и подлежащих восстановлению.*

### 3.3. Пример определения коэффициентов годности и восстановления деталей

#### Исходная информация

Износ наружной поверхности под валик управления оси винта механизма управления задним валом отбора мощности трактора МТЗ – 82 (50 – 4216034). Размер по чертежу  $\varnothing 12_{-0,075}^0$ .

Допустимые размеры детали: с бывшими в эксплуатации –  $d_o = 11,78$  мм; с новыми –  $d_n = 11,74$  мм. В таблице 3.1 представлены результаты замеров валов.

Таблица 3.1

Результаты замеров валов

|       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 12,00 | 11,78 | 11,80 | 11,90 | 11,72 | 11,92 | 11,95 | 11,68 | 11,72 | 11,62 |
| 11,65 | 11,96 | 11,92 | 11,70 | 11,88 | 11,70 | 11,70 | 11,74 | 11,66 | 11,76 |
| 11,65 | 11,84 | 11,75 | 11,74 | 11,73 | 11,36 | 11,72 | 11,55 | 11,60 | 11,82 |
| 11,66 | 11,69 | 11,67 | 11,70 | 11,65 | 11,80 | 11,68 | 11,75 | 11,72 | 11,86 |
| 11,98 | 11,78 | 11,80 | 11,90 | 11,85 | 11,60 | 11,94 | 11,62 | 11,64 | 11,71 |
|       |       |       |       |       |       |       |       |       | 11,64 |

#### Определение износов

Значения износов (И) определяем по формуле:

Для валов:

$$I = d_{\min} - d_{\text{изм}}, \quad (3.3)$$

где  $d_{\min}$  – наименьший предельный размер вала, мм;  
 $d_{\text{изм}}$  – измеренный диаметр вала, мм.

Для отверстий:

$$I = D_{\text{изм}} - D_{\max}, \quad (3.4)$$

где  $D_{\text{изм}}$  – измеренный диаметр отверстия, мм;  
 $D_{\max}$  – наибольший предельный размер отверстия, мм.

В примере дан вал для которого  $d_{\min} = 11,925$  мм.

Значения, полученные по формуле (3.3 или 3.4) сводим в таблицу 3.2, предварительно проранжировав все значения износов. Вариационный ряд (табл. 3.2) строится в порядке возрастания значений износов валов (отверстий).

Таблица 3.2

Сводная ведомость (вариационный ряд) по износам вала

|       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 0,005 | 0,025 | 0,075 | 0,125 | 0,175 | 0,205 | 0,225 | 0,245 | 0,275 | 0,305 |
| 0,005 | 0,035 | 0,075 | 0,125 | 0,185 | 0,205 | 0,225 | 0,255 | 0,275 | 0,325 |
| 0,015 | 0,045 | 0,085 | 0,145 | 0,185 | 0,205 | 0,225 | 0,265 | 0,285 | 0,325 |
| 0,025 | 0,055 | 0,105 | 0,145 | 0,195 | 0,215 | 0,235 | 0,265 | 0,285 | 0,375 |
| 0,025 | 0,065 | 0,125 | 0,165 | 0,205 | 0,225 | 0,245 | 0,275 | 0,305 | 0,567 |
|       |       |       |       |       |       |       |       |       | 0,675 |

Износы деталей:

наибольший  $I_{\max} = 0,005$  мм;

наименьший  $I_{\min} = 0,675$  мм.

### Построение статистического ряда

Количество интервалов  $n$  определяем по формуле

$$n = \sqrt{N}, \quad (3.5)$$

$n = \sqrt{51} = 7,14$  принимаем 7 интервалов.

Протяжённость одного интервала  $A$ , мм, определяем по формуле

$$A = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{n}, \quad (3.6)$$

где  $I_{\max}$  и  $I_{\min}$  – соответственно наибольшее и наименьшее значения износов (табл. 3.2).

$$A = \frac{0,675 - 0,005}{7} = 0,0957 \approx 0,1 \text{ мм.}$$

Округляем в большую сторону.

Начало первого интервала  $C$ , мм, или начало рассеивания (сдвиг износов) определяем по зависимости

$$C = I_1 - 0,5A, \quad (3.7)$$

где  $I_1$  – значение износа в первой точке информации (наименьший износ), мм.

$$C = 0,005 - 0,5 \cdot 0,1 = -0,045 \text{ мм.}$$

Первое значение в строке «Интервал» (табл. 3.3) – это начало первого интервала  $C$ . Принимаем  $C = 0$ , так как отрицательного износа не может быть, то есть, нет сдвига рассеивания.

Таблица 3.3

Статистический ряд размеров

| Интервал, мм                           | 0–0,1 | 0,1–0,2 | 0,2–0,3 | 0,3–0,4 | 0,4–0,5 | 0,5–0,6 | 0,6–0,7 |
|----------------------------------------|-------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Середина интервала, $I_{\text{ср}}$    | 0,05  | 0,15    | 0,25    | 0,35    | 0,45    | 0,55    | 0,65    |
| Частота, $m_i$                         | 13    | 11      | 20      | 5       | 0       | 1       | 1       |
| Опытная вероятность, $P_i$             | 0,25  | 0,22    | 0,39    | 0,1     | 0       | 0,02    | 0,02    |
| Накопленная опытная вероятность, $P_i$ | 0,25  | 0,47    | 0,86    | 0,96    | 0,96    | 0,98    | 1       |

Вторая строка статистического ряда (табл. 3.3) представляет собой середину каждого интервала. Например:  $(0 + 0,1)/2 = 0,05$  мм.

Третья строка «Частота» показывает частоту  $m_i$ , то есть сколько размеров деталей попадает в каждый интервал износов (определяем из сводной ведомости – табл. 3.2).

Если окажется что последнее одно или несколько значений износа (точек информации) выходят за пределы последнего интервала, то следует проверить правильность определения величины  $A$ .

Значение опытных вероятностей  $P_i$  (или частотей) в каждом интервале (четвертая строка статистического ряда)

$$P_i = \frac{m_i}{N}, \quad (3.8)$$

где  $m_i$  – опытная частота в  $i$ -том интервале.

Накопленную опытную вероятность (последняя строка табл. 1.3) определяем суммированием вероятностей по интервалам

$$\sum_{i=1}^n P_i = \sum_{i=1}^n \frac{m_i}{N} = \frac{\sum_{i=1}^n m_i}{N}. \quad (3.9)$$

Сумма частот  $\sum m_i$  по всем интервалам должна быть равна  $N$  (т. е. 51), а сумма накопленных опытных вероятностей  $\sum_{i=1}^n P_i = 1,0$ .

#### **Определение математических характеристик статистического ряда**

Среднее значение износа  $\bar{H}$ , мм, определяем по формуле

$$\bar{H} = \sum_{i=1}^n H_{cpi} \cdot P_i, \quad (3.10)$$

где  $H_{cpi}$  – значение износа в середине  $i$ -го интервала, мм.

$$\bar{H} = 0,05 \cdot 0,25 + 0,15 \cdot 0,22 + 0,25 \cdot 0,39 + 0,35 \cdot 0,1 + 0,45 \cdot 0 + 0,55 \cdot 0,02 + 0,65 \cdot 0,02 = 0,2.$$

Среднее квадратическое отклонение  $\sigma$ , мм,

$$\sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^n (H_{cpi} - \bar{H})^2 \cdot P_i}, \quad (3.11)$$

$$\sigma = \sqrt{(0,05 - 0,2)^2 \cdot 0,25 + (0,15 - 0,2)^2 \cdot 0,22 + (0,25 - 0,2)^2 \cdot 0,39 + (0,35 - 0,2)^2 \cdot 0,1 + (0,45 - 0,2)^2 \cdot 0 + (0,55 - 0,2)^2 \cdot 0,02 + (0,65 - 0,2)^2 \cdot 0,02} = 0,12 \text{ мм}.$$

Коэффициент вариации:

$$V = \frac{\sigma}{\bar{H} - C}, \quad (3.12)$$

$$V = \frac{0,12}{0,2 - (-0,045)} = 0,49.$$

#### **Проверка информации на наличие выпадающих точек**

Информация по показателям надежности, полученная в процессе испытаний или наблюдений в условиях рядовой эксплуатации,

может содержать ошибочные точки, не соответствующие закону распределения случайной величины.

Проверку информации на наличие выпадающих точек осуществляем по формуле

$$\lambda_{oni} = \frac{H_i - H_{i-1}}{\sigma}, \quad (3.13)$$

где  $H_i$  и  $H_{i-1}$  – смежные точки в сводной ведомости информации.

Для наименьшего значения износа:  $H_3 = 0,15$ ;  $H_2 = H_1 = 0,005$ .

$$\lambda_{oni} = \frac{0,015 - 0,005}{0,12} = 0,08.$$

Для наибольшего значения износа:  $H_{51} = 0,675$ ;  $H_{50} = 0,425$ .

$$\lambda_{on51} = \frac{0,675 - 0,567}{0,12} = 0,9.$$

Полученные значения  $\lambda_{oni}$  сравнивают с табличными значениями критерия Ирвина (табл. 3.4).

Таблица 3.4

#### **Коэффициент Ирвина $\lambda_T$**

| Повторность информации, N      | 10  | 20  | 30  | 50  | 100 | 400 |
|--------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| $\lambda_T$ при $\beta = 0,95$ | 1,5 | 1,3 | 1,2 | 1,1 | 1,0 | 0,9 |
| $\lambda_T$ при $\beta = 0,99$ | 2,0 | 1,8 | 1,7 | 1,6 | 1,5 | 1,3 |

Если  $\lambda_{oni} < \lambda_T$ , то информация достоверна, если же  $\lambda_{oni} > \lambda_T$ , то такие точки «выпадают», то есть должны быть исключены из информации как недостоверные.

В нашем случае при  $N = 51$  и доверительной вероятности  $\beta = 0,95$  табличное значение критерия Ирвина  $\lambda_T = 1,1$ , что больше  $\lambda_{on}$ . Поэтому с вероятностью 0,95 можно утверждать, что все точки информации достоверны.

#### **Графическое построение опытного распределения износов**

Построение гистограммы осуществляем следующим образом (рис. 3.6). По оси абсцисс откладывают интервалы в соответствии

со статистическим рядом (строка первая в таблице 3.3), а по оси ординат – опытную вероятность в начале и конце каждого интервала (строка четвертая в таблице 3.3). Соединив в каждом интервале точки, получаем прямоугольник. В результате получаем ступенчатый многоугольник – гистограмму. Площадь каждого прямоугольника в процентах от общей площади гистограммы или долях единицы определяет опытную вероятность или количество деталей, у которых износ находится в данном интервале.

Построение полигона (рис. 3.6) осуществляем по точкам, образованным пересечением абсциссы, равной середине интервала, и ординаты, равной опытной вероятности интервала, то есть соединяем прямыми линиями середины верхних (горизонтальных) сторон прямоугольников гистограммы.

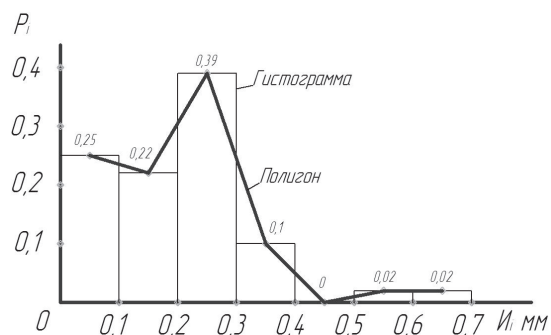


Рис. 3.6. Гистограмма и полигон распределения износов валов

Точки кривой накопленных опытных вероятностей образуются пересечением абсциссы, равной концу данного интервала, и ординаты, равной сумме вероятностей предыдущих интервалов (рис. 3.7).

Гистограмма и полигон являются дифференциальными, а кривая накопленных опытных вероятностей – интегральным статистическими (опытными) законами распределения случайной величины.

#### Выбор теоретического закона распределения износов

Замена опытного закона распределения теоретическим называется сглаживанием или выравниванием статистической информации. Теоретический закон применим как к полной совокупности, так и к любой частной совокупности деталей данного наименования.

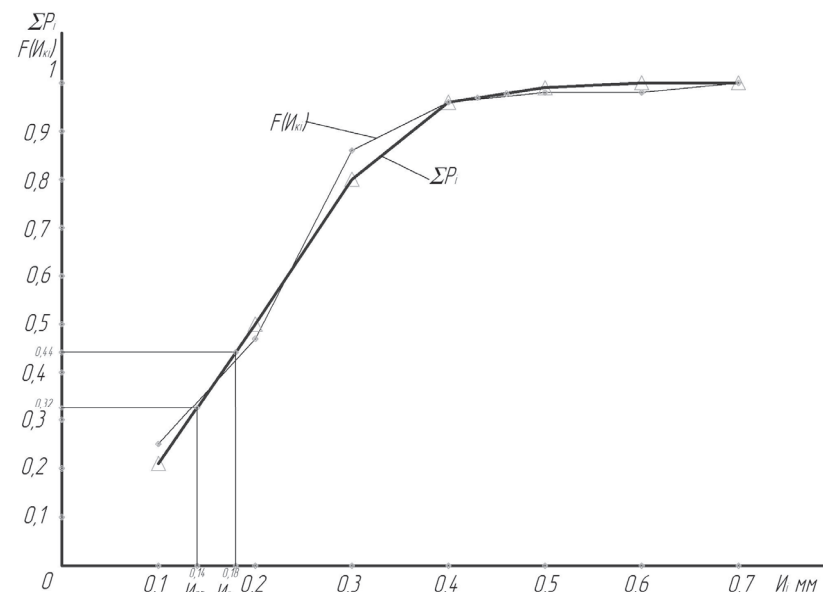


Рис. 3.7. Кривая накопленных опытных вероятностей, интегральная функция теоретического закона распределения износов

Предварительный выбор теоретического закона распределения износов осуществляется по величине коэффициента вариации  $V$ . Если  $V < 0,3$ , то распределение подчиняется закону нормального распределения (ЗНР), если  $V > 0,5$ , то закону распределения Вейбулла (ЗРВ). Если  $V$  лежит в интервале  $0,3 \dots 0,5$ , то выбирается тот закон, который лучше совпадает с опытной информацией. Точность совпадения оценивается по критерию согласия.

В нашем случае коэффициент вариации  $V = 0,33$ , поэтому предварительно принимаем два закона: закон распределения Вейбулла (ЗРВ) и закон нормального распределения (ЗНР).

Значение интегральной функции  $F(I_{ki})$  ЗНР в конце  $i$ -го интервала определяется по формуле

$$F(I_{ki}) = F_0 \left( \frac{I_{ki} - \bar{I}}{\sigma} \right), \quad (3.14)$$

где  $F_0$  – центрированная и нормированная интегральная функция.

Значение интегральной функции от отрицательного числа определяем следующим образом:

$$F_0(-I) = 1 - F(+I) \quad (3.15)$$

Например, для первого интервала:

$$F(I_{ki}) = F_0 \left( \frac{0,1-0,2}{0,12} \right) = F_0(-0,8) = 1 - F_0(0,8) = 1 - 0,79 = 0,21.$$

Значение интегральной функции  $F(I_{ki})$  ЗРВ в конце  $i$ -го интервала определяем по зависимости:

$$F(I_{ki}) = F_T \left( \frac{I_{ki} - C}{a} \right), \quad (3.16)$$

где  $F_T$  – табулированное значение интегральной функции.

Параметр  $a$  для закона распределения Вейбулла определяем по формуле

$$a = \frac{\bar{I} - C}{K_b}, \quad (3.17)$$

где  $K_b$  – коэффициент ЗРВ.

Параметр  $b$  и коэффициент  $K_b$  определяем по таблице 2 приложения в зависимости от коэффициента вариации. В нашем решении  $\bar{I} = 0,2$ ;  $C = 0$ ;  $V = 0,49$ . Из приложения находим, что при  $V = 0,49$ ;  $b = 2,2$ ;  $K_b = 0,89$ . Тогда:

$$a = \frac{0,2 - 0}{0,89} = 0,22.$$

Табулированное значение интегральной функции  $F_T$  принимаем по таблице 3 приложения в зависимости от величины  $\frac{I_{ki} - C}{a}$  и параметра  $b$ .

Например, в конце первого интервала:

$$F_T \left( \frac{0,1-0}{0,22} \right) = F_T(0,45).$$

Из приложения находим, что интегральная функция в конце первого интервала при  $V = 0,49$  и  $b = 2,2$  будет равна:

$$F_1(0,1) = F_T(0,45) = 0,895.$$

Если значения величин  $b$  и  $\frac{I_{ki} - C}{a}$  не совпадают со значениями таблицы, то  $F_T(I)$  следует определять интерполированием.

Аналогично определяем  $F(I_i)$  для остальных интервалов, а полученные значения заносим в таблицу 3.5.

Окончательный выбор теоретического закона распределения износков выполняют с помощью критерия согласия. Применительно к показателям надежности сельскохозяйственной техники чаще всего используют критерий Пирсона ( $\chi^2$ ) критерий Колмогорова ( $\lambda$ ). По величине критерия согласия можно определить вероятность совпадения опытных и теоретических законов и на этом основании принять или отклонить выбранный теоретический закон распределения, т. е. обосновано выбрать один теоретический закон из двух или нескольких.

Правильность выбора закона распределения определяем с помощью критерия согласия Колмогорова.

Критерий согласия Колмогорова определяем по формуле

$$\lambda = D_{\max} \sqrt{N}, \quad (3.18)$$

где  $D_{\max}$  – максимальная абсолютная разность между накопленной опытной вероятностью и теоретической интегральной функцией

$$D_{\max} = \max \left| \sum_{i=1}^n P_i - F(I_{ki}) \right|. \quad (3.19)$$

Разницу между опытным и теоретическим значениями функций определяем для каждого интервала и заносим в таблицу 3.5.

Как видно из таблицы 3.5, для ЗНР:  $D_{\max} = 0,06$ , а для ЗРВ:  $D_{\max} = 0,09$ . Тогда расчётное значение критерия согласия будет равно:

– для закона нормального распределения:

$$\lambda = D_{\max} \cdot \sqrt{N} = 0,06 \cdot \sqrt{50} = 0,42.$$

– для закона распределения Вейбула:

$$\lambda = D_{\max} \cdot \sqrt{N} = 0,09 \cdot \sqrt{50} = 0,63.$$

Из таблицы 3.6 находим вероятность совпадения теоретических законов с опытным распределением:

– для ЗНР:  $P(\lambda) = 0,997$ ;

– для ЗРВ:  $P(\lambda) = 0,818$ .

Таблица 3.5

## Выбор теоретического закона распределения износов

| Интервал, мм                                  |                                   | 0–0,1 | 0,1–0,2 | 0,2–0,3 | 0,3–0,4 | 0,4–0,5 | 0,5–0,6 | 0,6–0,7 |
|-----------------------------------------------|-----------------------------------|-------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Конец интервала, мм                           |                                   | 0,1   | 0,2     | 0,3     | 0,4     | 0,5     | 0,6     | 0,7     |
| Накопленная опытная вероятность, $\Sigma P_i$ |                                   | 0,25  | 0,47    | 0,86    | 0,96    | 0,96    | 0,98    | 1       |
| ЗНР                                           | $\frac{H_{ki} - \bar{H}}{\sigma}$ | –0,8  | 0       | 0,83    | 1,7     | 2,5     | 3,3     | 4,17    |
|                                               | $F(H_{ki})$                       | 0,21  | 0,5     | 0,8     | 0,96    | 0,99    | 1       | 1       |
|                                               | $\Sigma P_i - F(H_{ki})$          | 0,04  | –0,03   | 0,06    | 0       | –0,03   | –0,02   | 0       |
| ЗРВ                                           | $\frac{H_{ki} - \bar{H}}{\sigma}$ | 0,45  | 0,9     | 1,36    | 1,82    | 2,27    | 2,72    | 3,18    |
|                                               | $F(H_{ki})$                       | 0,16  | 0,55    | 0,86    | 0,97    | 1       | 1       | 1       |
|                                               | $\Sigma P_i - F(H_{ki})$          | 0,09  | –0,08   | 0       | –0,01   | –0,04   | –0,02   | 0       |

Таблица 3.6

Критерий Колмогорова  $P(\lambda)$ 

| $\lambda$ | $P(\lambda)$ | $\lambda$ | $P(\lambda)$ | $\lambda$ | $P(\lambda)$ |
|-----------|--------------|-----------|--------------|-----------|--------------|
| 0,0       | 1,000        | 0,7       | 0,711        | 1,4       | 0,04         |
| 0,1       | 1,030        | 0,8       | 0,544        | 1,5       | 0,022        |
| 0,2       | 1,000        | 0,9       | 0,393        | 1,6       | 0,12         |
| 0,3       | 1,000        | 1,0       | 0,270        | 1,7       | 0,006        |
| 0,4       | 0,997        | 1,1       | 0,178        | 1,8       | 0,003        |
| 0,5       | 0,967        | 1,2       | 0,112        | 1,9       | 0,002        |
| 0,6       | 0,864        | 1,3       | 0,068        | 2,0       | 0,001        |

Таким образом, по результатам вычислений можно предположить, что более приемлемым считается закон нормального распределения, у которого значение критерия Колмогорова меньше ( $\lambda = 0,42$ ), а вероятность совпадения соответственно больше ( $P(\lambda) = 0,997$ ).

Выбрав окончательно в качестве теоретического закона ЗНР, наносим на график значения его  $F(H_{ki})$  по концам интервалов и соединяем полученные точки плавной кривой, которая будет теоретической интегральной функцией распределения износов вала.

## Определение доверительных границ рассеивания среднего значения износа

Количественные характеристики показателей надежности ( $\bar{H}$ ,  $\sigma$ ,  $V$ ), полученные в результате обработки опытной информации, должны быть перенесены на другие совокупности машин, работающие в других условиях. Изменение числа машин в совокупности и условий их эксплуатации вызовет изменение количественных характеристик показателей надежности. Однако, несмотря на случайный характер, характеристики показателя надежности рассеиваются в определенных границах.

Интервал, в котором при заданной доверительной вероятности  $\beta$  попадают 100 % случаев от количества информации ( $N$ ), называется доверительным интервалом. Границы, в которых может колебаться среднее значение (или одиночное) показателя надёжности, называются нижней и верхней доверительными границами.

Для ЗНР нижняя доверительная граница рассеивания среднего значения износа при доверительной вероятности  $\beta$ :

$$H_{\beta}'' = \bar{H} - t_{\beta} \cdot \frac{\sigma}{\sqrt{N}}. \quad (3.20)$$

где  $t_{\beta}$  – коэффициент Стьюдента, который определяется по таблице 3.7 в зависимости от  $N$  и выбранной доверительной вероятности  $\beta$ .

Таблица 3.7

Коэффициенты  $t_{\beta}$ ,  $r_1$  и  $r_3$  для двусторонних доверительных границ

| $\beta$ | $\beta = 0,80$ |       |       | $\beta = 0,90$ |       |       | $\beta = 0,95$ |       |       |
|---------|----------------|-------|-------|----------------|-------|-------|----------------|-------|-------|
|         | $t_{\alpha}$   | $r_1$ | $r_3$ | $t_{\alpha}$   | $r_1$ | $r_3$ | $t_{\alpha}$   | $r_1$ | $r_3$ |
| 10      | 1,38           | 1,61  | 0,70  | 1,83           | 1,83  | 0,64  | 2,26           | 2,09  | 0,59  |
| 15      | 1,35           | 1,46  | 0,74  | 1,76           | 1,62  | 0,68  | 2,15           | 1,79  | 0,64  |
| 20      | 1,33           | 1,37  | 0,77  | 1,73           | 1,51  | 0,72  | 2,09           | 1,64  | 0,67  |
| 25      | 1,32           | 1,33  | 0,79  | 1,71           | 1,44  | 0,74  | 2,06           | 1,55  | 0,70  |
| 30      | 1,31           | 1,29  | 0,80  | 1,70           | 1,39  | 0,76  | 2,04           | 1,48  | 0,72  |
| 40      | 1,30           | 1,24  | 0,83  | 1,68           | 1,32  | 0,78  | 2,02           | 1,40  | 0,75  |
| 50      | 1,30           | 1,21  | 0,84  | 1,68           | 1,28  | 0,80  | 2,01           | 1,35  | 0,77  |
| 60      | 1,30           | 1,19  | 0,86  | 1,67           | 1,25  | 0,82  | 2,00           | 1,34  | 0,79  |
| 80      | 1,29           | 1,16  | 0,87  | 1,66           | 1,21  | 0,84  | 1,99           | 1,27  | 0,81  |
| 100     | 1,29           | 1,14  | 0,88  | 1,66           | 1,19  | 0,86  | 1,98           | 1,23  | 0,83  |

Верхняя доверительная граница рассеивания среднего значения износа при доверительной вероятности  $\beta$ :

$$H_{\beta}^B = \bar{H} + t_{\beta} \cdot \frac{\sigma}{\sqrt{N}}. \quad (3.21)$$

В нашем решении:  $\bar{H} = 0,2$ ;  $\sigma = 0,12$ ;  $N = 50$ .

Задавшись доверительной вероятностью  $\beta = 0,95$  при  $N = 50$ , по таблице 3.7 находим  $t_{\beta} = 2,01$ .

Тогда:

$$\bar{H}_{\alpha}^H = 0,2 - 2,01 \cdot \frac{0,12}{\sqrt{50}} = 0,17 \text{ мм},$$

$$\bar{H}_{\alpha}^B = 0,2 + 2,01 \cdot \frac{0,12}{\sqrt{50}} = 0,23 \text{ мм}.$$

Таким образом, с вероятностью 0,95 можно утверждать, что среднее значение износа наружной поверхности под валик будет находиться в интервале от 0,17 до 0,23 мм.

При законе распределения Вейбулла:

– нижняя доверительная граница среднего значения показателя надежности определятся по формуле

$$\bar{H}_{\beta}^H = (\bar{H} - C) \sqrt[r_3]{r_3} + C, \quad (3.22)$$

– верхняя доверительная граница среднего значения показателя надежности:

$$\bar{H}_{\beta}^B = (\bar{H} - C) \sqrt[r_1]{r_1} + C, \quad (3.23)$$

где  $r_1, r_3$  – коэффициенты распределения Вейбулла принимаются по таблице 1.7 в зависимости от величины доверительной вероятности и числа наблюдений  $N$ .

Относительная ошибка расчёта характеристик износа рассчитывается по формуле:

$$\varepsilon_{\beta} = \frac{\bar{H}_{\beta}^B - \bar{H}}{\bar{H}} \cdot 100 \%, \quad (3.24)$$

$$\varepsilon_{\beta} = \frac{0,23 - 0,2}{0,2} \cdot 100 = 15 \%.$$

Точность расчётов вполне достаточна, так как согласно требованиям государственного стандарта величина относительной ошибки должна быть меньше или равна 20 %.

### **Определение количества деталей, годных без ремонта и подлежащих восстановлению**

Для определения количества годных деталей рассчитываем допустимые без ремонта износы детали в соединении её с деталями, бывшими в эксплуатации, и новыми

– для валов

$$H_{об} = d_{\min} - d_{об}, \quad (3.25)$$

$$H_{он} = d_{\min} - d_{он}, \quad (3.26)$$

где  $d_{\min}$  – наименьший предельный размер отверстия;  
 $d_{об}$  и  $d_{он}$  – допустимые без ремонта размеры вала в соединении соответственно с деталями бывшими в эксплуатации, и с новыми;

– для отверстий:

$$H_{об} = D_{об} - D_{\max}, \quad (3.27)$$

$$H_{он} = D_{он} - D_{\max}. \quad (3.28)$$

В исходных данных указано, что в соответствии с техническими требованиями на капитальный ремонт наружной поверхности под валик управления оси винта механизма управления задним валом отбора мощности трактора МТЗ-82 допустимый размер вала в соединении с деталями, бывшими в эксплуатации, составляет 11,78 мм, а с новыми – 11,74 мм.

Тогда в нашем случае получим ( $d_{\min} = 11,925$  мм):

$$H_{дб} = 11,925 - 11,78 = 0,145 \text{ мм},$$

$$H_{дн} = 11,925 - 11,74 = 0,185 \text{ мм}.$$

Значение допустимых износов откладываем по оси абсцисс (рис. 3.8) и из этих точек восстанавливаем перпендикуляры до пересечения с теоретической интегральной кривой распределения износов. Из точек пересечения проводим горизонтальные линии до оси ординат и отсчитываем в % количество годных деталей и деталей, требующих восстановления.

В нашем случае общее количество деталей, годных без ремонта, равно 44 %, из них 32 % можно соединять как с новыми, так и с бывшими в эксплуатации деталями, а 12 % – только с новыми деталями. У 56 % деталей поверхность надо восстанавливать. Таким образом, коэффициент годности вала равен 0,44, а коэффициент восстановления – 0,56.

### 3.4. Определение показателей безотказности деталей методом сумм

Для определения показателей безотказности деталей методом сумм провели испытание 40 образцов. По результатам испытания безотказности деталей сельскохозяйственных машин составлен ряд значений из 6 интервалов с заданными значениями величины интервала и опытной частоты возникновения отказов в каждом интервале наработок.

Используя метод сумм, определим среднее арифметическое и среднеквадратическое отклонение. Для этого статистический ряд преобразуем так, как показано в таблице 3.8.

Таблица 3.8

Определение величин  $t$  и  $\sigma$  методом сумм

| Средина интервала, $t_i$ ч | Частота, $m_i$ | $K_1 = 25$ | $K_2 = 7$ |
|----------------------------|----------------|------------|-----------|
| 75                         | 1              | 1          | 1         |
| 225                        | 4              | 5          | 6         |
| 375                        | 14             | 19         | –         |
| 525–                       | 17             |            | –         |
| 675                        | 3              | 4          | –         |
| 825                        | 1              | 1          | 1         |
|                            | 40             | $L_1 = 5$  | $L_2 = 1$ |

Среднее значение показателя надежности и среднеквадратическое отклонение определяем по формулам:

$$t = T_{\max} - \frac{A \cdot M_1}{N}, \quad (3.29)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{M_2 - M_1^2 / N}{N}}, \quad (3.30)$$

где  $A$  – величина интервала;

$T_{\max}$  – значение середины того интервала, где максимальная частота.

В нашем случае  $T_{\max} = 525$  ч.

$M_1$  и  $M_2$  – вспомогательные коэффициенты;

Параметр потока отказов  $W$  является величиной, обратной среднему значению величины отказа:

$$W = \frac{1}{t}. \quad (3.31)$$

Статистические оценки вероятности безотказной работы  $P(t)$  и интенсивность отказов  $\lambda(t)$  деталей для  $i$ -тых интервалов подсчитывается по следующим формулам:

$$P(t) = \frac{N - \sum m_i}{N}, \quad (3.32)$$

$$\lambda(t) = \frac{m_i}{\Delta t \cdot N(t)_i}, \quad (3.33)$$

где  $N$  – число изделий в начале испытаний;

$\sum m_i$  – число отказавших изделий к концу  $i$ -того интервала;

$\Delta t$  – значение наработки в частичном интервале

(в нашем случае  $\Delta t = 150$  ч);

$N(t)_i$  – число работоспособных изделий к началу  $i$ -того частичного интервала.

Исходные данные для подсчетов и их результаты сводятся в таблицу 3.9

Таблица 3.9

Определение статистических оценок безотказности изделий

| Показатели                       | Значение показателей по частичным интервалам |         |         |         |         |         |
|----------------------------------|----------------------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|
|                                  | 0–150                                        | 150–300 | 300–450 | 450–600 | 600–750 | 750–900 |
| 1                                | 2                                            | 3       | 4       | 5       | 6       | 7       |
| Число отказов за интервал, $m_i$ | 1                                            | 4       | 14      | 17      | 3       | 1       |

Продолжение

| Показатели                                                 | Значение показателей по частичным интервалам |         |         |         |         |         |
|------------------------------------------------------------|----------------------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|
|                                                            | 0–150                                        | 150–300 | 300–450 | 450–600 | 600–750 | 750–900 |
| 1                                                          | 2                                            | 3       | 4       | 5       | 6       | 7       |
| Число отказавших изделий к концу интервала, $\sum m_i$     | 1                                            | 5       | 19      | 36      | 39      | 40      |
| Число работоспособных изделий к началу интервала, $N(t_i)$ | 40                                           | 39      | 35      | 21      | 4       | 1       |
| Безотказность изделий, $P(t)$                              | 0,975                                        | 0,875   | 0,525   | 0,100   | 0,025   | 0       |
| Интенсивность отказов, $(t)$                               | 0,0002                                       | 0,0007  | 0,0027  | 0,0054  | 0,0050  | 0,0067  |

По величине коэффициента вариации, выбрать вид теоретического закона, построить интегральную функцию и определить доверительные границы и доверительный интервал для средней наработки на отказ. Методика определения этих параметров изложена в разделе 3.3 данного пособия.

Границы и доверительный интервал для средней наработки на отказ определяем также как и в разделе 3.3 данного пособия.

Определить параметр потока отказов и построить кривую вероятностей безотказной работы машин по данным испытаний (рис. 3.8).

По заданной трудоемкости устранения отказа определить трудоемкость работ по устранению отказов в заданном интервале наработок для установленного числа машин.

В графической части вычерчиваем в принятом масштабе кривую вероятностей отказов и безотказной работы деталей по данным испытаний и для принятого интервала наработки определяем вероятность отказа машин.

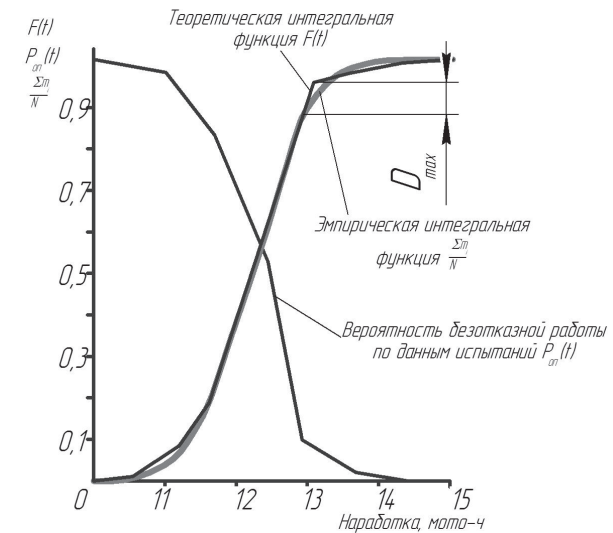


Рис. 3.8. Кривая вероятностей безотказной работы машины по данным испытаний

### 3.5. Определение необходимого количества машин и их элементов при оценке показателей надежности

Приведенные выше зависимости показывают, что точность полученных оценок показателей надежности зависит от числа объектов наблюдений (измерений). С увеличением количества объектов наблюдений точность повышается. Так как испытание на надежность требует значительных затрат времени и средств, увеличивающихся с увеличением количества испытуемых объектов, возникает необходимость определения количества машин, необходимых для испытаний при условии получения результатов с заданной точностью.

В теории вероятностей получены уравнения, связывающие величину относительной ошибки и количество объектов в выборке;

а) для нормального закона распределения

$$\frac{\delta}{v}; \quad (3.34)$$

б) для закона распределения Вейбулла

$$(\delta + 1)^b. \quad (3.35)$$

Для упрощения расчетов по этим формулам составлена статистическая таблица 12 приложения. Определение необходимого числа испытуемых машин выполняется в следующей последовательности:

- задаются величиной доверительной вероятности (обычно 0,8 или 0,9) и величиной относительной ошибки не более 20%;
- по коэффициенту вариации V или параметру «b» определяют значение левой части уравнений (3.34) или (3.35),
- по таблице 3.10 приложения определяем количество объектов наблюдений, необходимых для расчета показателей надежности или износа деталей.

Таблица 3.10

**Количество машин или их элементов (повторность информации) N при односторонней доверительной вероятности  $\beta_0$**

| N  | ЗНР $\delta/V$   |                  |                  | ЗРВ $(\delta + 1)^b$ |                  |                  |
|----|------------------|------------------|------------------|----------------------|------------------|------------------|
|    | $\beta_0 = 0,80$ | $\beta_0 = 0,90$ | $\beta_0 = 0,95$ | $\beta_0 = 0,80$     | $\beta_0 = 0,90$ | $\beta_0 = 0,95$ |
| 4  | 0,49             | 0,82             | 1,17             | 1,74                 | 2,29             | 2,93             |
| 6  | 0,38             | 0,60             | 0,82             | 1,54                 | 1,90             | 2,29             |
| 8  | 0,32             | 0,50             | 0,67             | 1,43                 | 1,72             | 2,01             |
| 10 | 0,28             | 0,44             | 0,58             | 1,37                 | 1,61             | 1,82             |
| 12 | 0,25             | 0,39             | 0,52             | 1,33                 | 1,53             | 1,73             |
| 15 | 0,27             | 0,36             | 0,47             | 1,29                 | 1,48             | 1,65             |
| 16 | 0,32             | 0,33             | 0,44             | 1,27                 | 1,43             | 1,59             |
| 18 | 0,20             | 0,31             | 0,41             | 1,25                 | 1,40             | 1,55             |
| 20 | 0,19             | 0,30             | 0,39             | 1,23                 | 1,37             | 1,51             |
| 22 | 0,18             | 0,28             | 0,37             | 1,22                 | 1,35             | 1,48             |
| 24 | 0,17             | 0,27             | 0,35             | 1,21                 | 1,33             | 1,45             |
| 26 | 0,17             | 0,26             | 0,33             | 1,20                 | 1,32             | 1,43             |
| 28 | 0,16             | 0,25             | 0,32             | 1,19                 | 1,30             | 1,41             |
| 30 | 0,16             | 0,24             | 0,31             | 1,18                 | 1,29             | 1,39             |
| 40 | 0,13             | 0,20             | 0,26             | 1,16                 | 1,24             | 1,32             |
| 50 | 0,12             | 0,18             | 0,24             | 1,14                 | 1,21             | 1,28             |
| 60 | 0,11             | 0,16             | 0,22             | 1,12                 | 1,19             | 1,25             |

## 4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОЛНОГО РЕСУРСА СОЕДИНЕНИЯ И ДОПУСТИМЫХ БЕЗ РЕМОНТА РАЗМЕРОВ СОПРЯГАЕМЫХ ДЕТАЛЕЙ

### 4.1. Общие сведения

*Графический метод* определения предельных износов состоит в проведении износных испытаний и построении кривых износа. Если кривые имеют резкий перегиб в сторону увеличения темпа износа, то точка перегиба её указывает, что деталь достигла предельной величины.

Предельное состояние деталей, сборочных единиц, агрегатов и машины в целом можно определить по величине их оптимального срока службы.

Если не учитывать зоны приработки и условно считать, что на участке нормальной эксплуатации приращение величины износа прямо пропорционально наработке машины, то полный ресурс детали  $T_{\text{он}}$  будет равен (из треугольника  $a, b, в$ , рис. 4.1)

$$T_{\text{он}} = \frac{bв}{tg\alpha} = \frac{I_{np} - I_n}{W_o}, \quad (4.1)$$

где  $I_{np}$  – предельный износ детали, мм;  
 $W_o$  – средняя скорость изнашивания детали, мм/мото-ч;  
 $I_n$  – износ детали в период приработки, мм.

Если пренебречь износом детали в период приработки, то

$$T_{\text{он}} = \frac{I_{np}}{W_o}. \quad (4.2)$$

Ресурсы деталей и соединений в зависимости от повторности исходной информации можно определить двумя методами: оценкой износного состояния отдельной детали или соединения в условиях ее эксплуатации (метод индивидуального прогнозирования); обработкой массовой износной информации группы одноименных деталей или соединений (метод статистического прогнозирования). Второй метод мы рассмотрели в первом разделе при опре-

делении коэффициента годности детали, где величина среднего износа является по сути предельным износом данной поверхности детали.

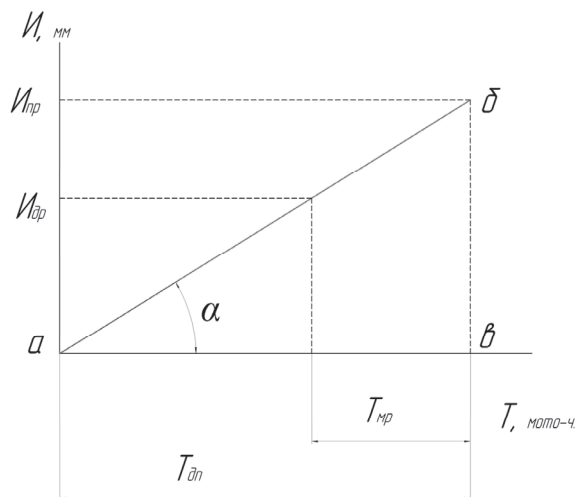


Рис. 4.1. Схема определения ресурса детали

Полный ресурс соединения и допустимые без ремонта размеры сопрягаемых деталей в месте их наибольшего износа следует определять следующим образом.

Значения допустимого без ремонта  $I_{доп}$  и предельного  $I_{пр}$  износов:

$$I_{доп} = S_{доп} - S_{н\max}, \quad (4.3)$$

$$I_{пр} = S_{пр} - S_{н\max}, \quad (4.4)$$

где  $S_{н\max}$  — максимальный начальный зазор в соединении, мм;  
 $S_{пр}$  — предельное значение зазора в соединении, мм;  
 $S_{доп}$  — допустимый без ремонта зазор в соединении, мм.

Полный ресурс соединения:

$$T_{сн} = \frac{I_{пр}}{W_c}, \quad (4.5)$$

где среднюю скорость изнашивания соединения следует определять по выражению:

$$W_c = W_{д1} + W_{д2}, \quad (4.6)$$

где  $W_{д1}$ ,  $W_{д2}$  — соответственно средняя скорость изнашивания первой и второй сопрягаемой деталей, мм/мото-ч.

Полученные расчетные значения  $W_c$  и  $T_{сн}$  нужно рассматривать как средние из-за возможных отклонений, прежде всего, вследствие нестабильности условий эксплуатации сельскохозяйственной техники.

Предельные износы сопрягаемых деталей  $I_{прдо}$ , мм, следует определять по уравнениям:

$$I_{прдо1} = \frac{I_{пр} \cdot W_{д1}}{W_c}, \quad (4.7)$$

$$I_{прдо2} = \frac{I_{пр} \cdot W_{д2}}{W_c}. \quad (4.8)$$

Допустимые износы сопрягаемых деталей  $I_{допо}$ , мм, при заданном значении межремонтной наработки  $T_{мр}$ :

$$I_{допо1} = I_{прдо1} - T_{мр} \cdot W_{д1}, \quad (4.9)$$

$$I_{допо2} = I_{прдо2} - T_{мр} \cdot W_{д2}. \quad (4.10)$$

Допустимые без ремонта размеры деталей соединения в месте их наибольшего износа  $D_{доп}$ , мм,

Для втулки:

$$D_{доп} = D_{\max} + T_{мр} \cdot W_{д1}, \quad (4.11)$$

Для вала:

$$d_{доп} = d_{\min} + T_{мр} \cdot W_{д2}, \quad (4.12)$$

где  $D_{\max}$ ,  $d_{\min}$  — соответственно наибольший предельный размер втулки и наименьший предельный размер вала, мм.

В заключении необходимо построить расчетную схему изнашивания деталей соединения в функции от наработки, определение его полного ресурса, допустимых без ремонта и предельных износов сопрягаемых деталей.

#### 4.2. Пример определения полного ресурса соединения и допустимых без ремонта размеров сопрягаемых деталей в местах их наибольшего износа

В основу расчетов положена линейная зависимость износов деталей и их соединения от наработки.

*Исходные технические данные:*

1. Средняя межремонтная наработка  $T_{\text{мр}} = 2000$  мото-ч.
2. Средняя скорость изнашивания втулки верхней головки шатуна  $W_{\text{вт}} = 5 \cdot 10^{-5}$  мм/мото-ч.
3. Средняя скорость изнашивания поршневого пальца  $W_{\text{п}} = 2 \cdot 10^{-5}$  мм/мото-ч.

Данные на дефектацию соединений тракторных деталей показаны в таблице 4.1.

Таблица 4.1

Данные из технических условий на дефектацию тракторных деталей

| Наименование деталей и место измерения износа | Выписка из технических условий |                            |                              |                             |
|-----------------------------------------------|--------------------------------|----------------------------|------------------------------|-----------------------------|
|                                               | Размеры по чертежу, мм         | Зазоры в соединении, мм    |                              |                             |
|                                               |                                | начальный, $S_{\text{н}}$  | допустимый, $S_{\text{доп}}$ | предельный, $S_{\text{пр}}$ |
| Втулка (внутренний диаметр)                   | $42^{+0,038}_{+0,023}$         | $S_{\text{н max}} = 0,047$ | 0,11                         | 0,25                        |
| Палец поршневой (наружный диаметр)            | $42^{+0,001}_{-0,009}$         | $S_{\text{н min}} = 0,022$ |                              |                             |

Определяем значения допустимого без ремонта  $I_{\text{доп}}$  и предельного  $I_{\text{пр}}$  износов по уравнениям (4.3) и (4.4):

$$I_{\text{доп}} = 0,11 - 0,047 = 0,063 \text{ мм};$$

$$I_{\text{пр}} = 0,25 - 0,047 = 0,203 \text{ мм}.$$

Рассчитывая среднюю скорость изнашивания соединения по формуле (4.6) определяем и полный ресурс соединения по уравнению (4.5):

$$W_{\text{с}} = 5 \cdot 10^{-5} + 2 \cdot 10^{-5} = 7 \cdot 10^{-5} \text{ мм/мото-ч},$$

$$T_{\text{сн}} = \frac{0,203}{7 \cdot 10^{-5}} = 2900 \text{ мото-ч}.$$

Предельные износы сопрягаемых деталей определяем по уравнениям (4.7) и (4.8):

$$I_{\text{пр вт}} = \frac{0,203 \cdot 5 \cdot 10^{-5}}{7 \cdot 10^{-5}} = 0,145 \text{ мм};$$

$$I_{\text{пр пп}} = \frac{0,203 \cdot 2 \cdot 10^{-5}}{7 \cdot 10^{-5}} = 0,058 \text{ мм}.$$

Допустимые износы сопрягаемых деталей при заданном значении межремонтной наработки  $T_{\text{мр}} = 2000$  мм составят:

$$I_{\text{доп вт}} = 0,145 - 2000 \cdot 5 \cdot 10^{-5} = 0,045 \text{ мм},$$

$$I_{\text{доп пп}} = 0,058 - 2000 \cdot 5 \cdot 10^{-5} = 0,018 \text{ мм}.$$

Тогда допустимые без ремонта размеры деталей соединения в месте их наибольшего износа определяются следующим образом

Для втулки:

$$D_{\text{доп}} = 42,038 + 2000 \cdot 5 \cdot 10^{-5} = 42,138 \text{ мм}.$$

Для пальца:

$$d_{\text{доп}} = 41,991 + 2000 \cdot 5 \cdot 10^{-5} = 41,951 \text{ мм}.$$

Вычерчиваем расчетную схему износа деталей соединения в функции от наработки. Построение схемы начинаем с нанесения и обозначения на осях координат масштабных делений износа и наработки, затем откладываем значение зазора  $S_{\text{н max}}$ , полного ресурса соединения  $T_{\text{сн}}$ , предельного износа для обеих деталей ( $I_{\text{пр вт}}$ ,  $I_{\text{пр пп}}$ ) и проводят линии износа деталей, далее обозначаем зазоры  $S_{\text{доп}}$  и  $S_{\text{пр}}$  межремонтную наработку  $T_{\text{мр}}$  и допустимые без ремонта износы деталей ( $I_{\text{доп вт}}$ ,  $I_{\text{доп пп}}$ ).

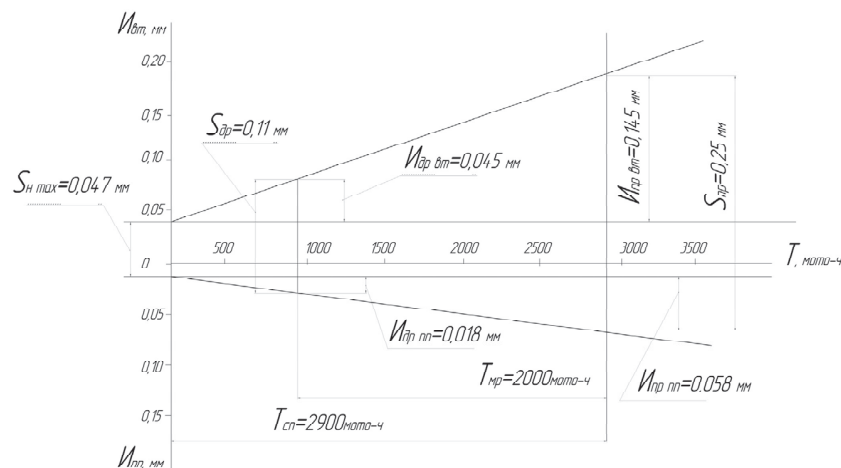


Рис. 4.2. Расчетная схема износа деталей соединения

## 5. МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

### 5.1. Обеспечение исходного первоначального уровня надежности при конструировании машин

Повышение надежности машин при их конструировании ведется по следующим основным направлениям [1].

1) *Выбор долговечных материалов деталей и рациональных их сочетаний в парах трения* Детали современных машин в зависимости от назначения изготавливают из конструкционных, износостойких, антифрикционных, антикоррозионных и других материалов. В современных машинах наиболее широко используются: качественная конструкционная сталь (19...51 %), низколегированная сталь (29...63 %), серый чугун (18...29 %), а также сплавы на основе алюминия, ковкий чугун и др.

Из качественных конструкционных сталей широкое распространение получила сталь 45; из низколегированных — стали 12ХНЗА, 18ХГТ, 20ХНЗА, 25ХГТ, 30ХГТ, 40Хи др.; из серых чугунов — СЧ 15-32, СЧ 18-36 и СЧ 21-40

Материалы деталей и рациональные их сочетания подбирают на основе двух главных требований: получения нужной долговечности и невысокой их стоимости.

Для каждой конкретной детали (сопряжения) учитывают условия работы, вид изнашивания, применение термической, химикотермической и других видов упрочняющей обработки, требования точности изготовления и т. д. Долговечность большинства деталей (сопряжений) сельскохозяйственной техники определяют сопротивляемостью их изнашиванию и, главным образом, в сочетании с воздействием абразивных частиц. Большая группа деталей (коленчатые валы, коленчатые оси, поворотные цапфы и др.) в работе подвергается воздействию циклических и динамических нагрузок. Поэтому к материалам этих деталей наряду с износостойкостью предъявляются дополнительные требования — высокая усталостная прочность и ударная вязкость. К материалам таких деталей, как шестерни, подшипники скольжения и качения, кулачко-

вые валы, крестовины карданных валов и дифференциалов и другие, предъявляются еще и требования высокой контактной усталостной прочности.

Перспективными материалами для деталей сельскохозяйственной техники считаются:

- низколегированные (для гильз и блоков цилиндров) и модифицированные (для коленчатых валов) чугуны;
- низколегированные цементированные стали 25ХГТ, 20ХСНТ, 18ХНТФ (для шестерен и шлицевых валов), среднеуглеродистые низколегированные закаливаемые стали 39ХГСА, 45ХНМФА, 45ХМФА, 50ГСШ, 50ХФАШ (для подшипников скольжения),
- сплавы на основе алюминия (для головок и блоков цилиндров, кожухов сцепления, корпусов гидронасосов).
- полимерные материалы (для втулок, подшипников скольжения, сальников, шестерен, крышек, ручек, деталей тормозных устройств и др.) и материалы из резины (для уплотнений)

2) *Обеспечение нормальных условий работы деталей при наименьших потерях на трение* Для длительной и надежной работы деталей, прежде всего, расчетами определяют рациональные размеры трущихся (контактирующих) поверхностей, их геометрическую форму и другие параметры. Например, поверхности подшипников скольжения рассчитывают на удельные нагрузки; поверхности шлицев и опор валов – на смятие; фрикционные пары – на нагрев, рессоры – на усталость и т. д.

Во многих случаях конструктор стремится вместо подшипников скольжения применить наиболее долговечные и дешевые подшипники качения, обеспечить минимальные потери на трение в трущихся парах. Переход на подшипники качения повышает их надежность, уменьшает расход цветных металлов, значительно снижает пусковые моменты, упрощает обслуживание. Вместе с тем необходимо помнить, что подшипники качения выдерживают меньшие скорости и нагрузки, требуют увеличения размеров деталей, обеспечивают меньшую точность работы механизмов, вызывают шум в передачах и снижают сопротивляемость их вибрациям.

3) *Снижение концентрации напряжений при выборе формы и размеров деталей.* Особое внимание необходимо обратить на это в местах галтелей, надрезов, канавок и других поверхностей, особенно деталей, подверженных динамическим и циклическим нагрузкам.

4) *Создание оптимальных температурных режимов работы сопряжений деталей, сборочных единиц и агрегатов в современных форсированных машинах* играет весьма важную роль в повышении их долговечности. Ранее отмечено, что температурные условия процесса, прежде всего, оказывают влияние на износ деталей и форму проявления. Регулировать температуру в узлах трения и нагрев деталей вообще в двигателях можно за счет охлаждения воды (воздуха) и картерного масла, а также применением таких конструкторских решений, как создание теплоизолирующих прорезей (в головках блока и на поршнях), установка в бобышках поршней пластинок из инвара и др.

5) *Обеспечение хороших условий смазывания трущихся поверхностей деталей.* Качество смазочных материалов, применяемых для сельскохозяйственной техники, может быть повышено за счет использования различных присадок к маслам. У современных двигателей все основные сопряжения, как правило, смазывают под давлением. Подачу смазки под давлением и ее фильтрацию все шире применяют в узлах трения деталей трансмиссии. Ряд сборочных единиц ходовой части гусеничных тракторов переведен с консистентной смазки на жидкостную (втулки цапф рам, подшипники опорных катков и т. д.).

6) *Создание эффективных устройств очистки воздуха, топлива, смазки* Эффективными мероприятиями по улучшению очистки воздуха, топлива и смазки в современных двигателях стали следующие по очистке воздуха применение новых конструкций циклонных комбинированных воздухоочистителей; по двойной очистке топлива – использование фильтров грубой и тонкой очистки с новыми фильтрующими бумажными элементами БФДТ; по очистке масла – создание полнопоточных масляных центрифуг, применение центробежной очистки масла в полостях шатунных шеек коленчатых валов, установка в картерах магнитных пробок, применение фильтров для фильтрации масла в трансмиссиях, использование подшипников с одноразовой смазкой (полуоси задних колес и шарниры рулевых трактора МТЗ-80 и др.).

7) *Улучшение конструкции и материалов уплотнительных устройств и герметизация сборочных единиц и агрегатов для сельскохозяйственной техники* имеют большое значение в деле повышения ее долговечности, поскольку тракторы и другие машины

длительный период времени работают в атмосфере, насыщенной абразивными частицами. Наиболее широко распространены резиновые радиальные самоподжимные каркасные уплотнения типа АСК. Для улучшения герметизации сборочных единиц и агрегатов заводы-изготовители используют специальные прокладочные материалы и герметизирующие пасты.

8) *Обеспечение достаточной жесткости базовых деталей машин и устойчивости их к вибрациям.* Базовые детали (рамы, блоки цилиндров, корпуса коробок перемены передач и задних мостов) определяют работоспособность других деталей и обеспечивают для них достаточную жесткость, устойчивость и стабильность размеров, особенно взаимного расположения рабочих поверхностей.

Примером положительного решения в рассматриваемом плане может быть конструкция блоков цилиндров двигателей ЯМЗ, Д-50, а также изготовление в одном блоке корпуса коробки перемены передач и заднего моста трактора ДТ-75.

Недостаточную жесткость имеют блоки цилиндров двигателя СМД-14, что вызвало необходимость изменения их конструкции и установки гильзы цилиндров на трех (вместо двух) опорах.

*Другие мероприятия:* применение двойных силовых пружин для сцепления (двигатели типа СМД), использование распределительных валов с безударным профилем кулачков (двигатель Д-240), гидравлическое натяжение гусениц и защитных устройств для них (тракторы Т-150, Т-130); повышение качества крепежа; увеличение жесткости трансмиссий тракторов, использование поддерживающих роликов с резиновыми бандажами; повышение надежности пружин подвески; применение двухслойных пальцев гусениц (со слоем из стали Х12Ф1) и измененной конструкции звеньев гусениц, обеспечивающих безударную работу опорных катков и лучший контакт со звездочкой в зацеплении (трактор Т-150); введение гидротрансмиссии (трактора МТЗ-80, Т-150 и др.); использование новой конструкции тормозных лент с легкообъемными элементами их фрикционных материалов высокой долговечности (трактор ДТ-75С); введение торцовых металлических уплотнений на цапфах (трактор ДТ-75С); ужесточение допусков на подбор деталей цилиндропоршневой группы по массе (двигатель Д-240); динамическая балансировка деталей двигателя, сцепления, карданных валов; применение санных стаканов под подшипники качения в корпусных деталях трансмиссий.

## 5.2. Технологические методы обеспечения доремонтного уровня надежности машин

Производства высококачественных деталей для сельскохозяйственной техники конструкторы добиваются в тесном контакте с технологами путем выполнения следующих основных технологических (чаще конструктивно-технологических) мероприятий.

1. *Обеспечение необходимой точности и качества изготовления деталей, применяемых в тракторах, автомобилях и других сельскохозяйственных машинах,* зависит от уровня используемого обрабатывающего оборудования и точности размеров рабочих поверхностей деталей, а также от точности взаимного расположения этих поверхностей

С повышением точности изготовления деталей уменьшаются начальные зазоры в подвижных сопряжениях и более жестко регламентируются натяги в неподвижных соединениях, что значительно повышает долговечность машин, их доремонтный ресурс.

Машиностроительное производство постоянно стремится к повышению качества рабочих поверхностей деталей (уменьшению их шероховатости и искажений макрогеометрии). В зависимости от условий эксплуатации машин в трущихся парах устанавливается определенная шероховатость, которую и необходимо соблюдать при производстве техники. Эта оптимальная шероховатость должна задаваться и для поверхностей деталей с неподвижными посадками. Чем меньше шероховатость, тем больше сопротивляемость поверхностей деталей к коррозионным износам. Существенное влияние оказывает шероховатость поверхности на циклическую, а также на динамическую прочность деталей машин.

2. *Достижение высоких геометрических характеристик качества поверхности* возможно при использовании ряда принципиально различных методов и оснастки, а именно:

– срезание неровностей поверхности путем тонкого шлифования, хонингования, суперфиниша (сверхдоводки) и полирования, особенно с применением синтетических алмазов (паст, брусков, лент);

– смятия поверхностей за счет поверхностного пластического деформирования – обкатывания, раскатывания, дорнования, алмазного выглаживания и виброобкатывания алмазными или твердосплавными наконечниками;

– создания нового микропрофиля поверхности применением электрических методов обработки: электрохимической, электро-механической, обработкой в магнитном поле и др.

Отклонения геометрической формы (макрогеометрия) оказывают определенное влияние на значение и равномерность зазора (натяга) в сопряжении, условия контактирования, смазки и, таким образом, в значительной мере определяют эксплуатационную надежность узлов машин.

Учитывая, что геометрические параметры качества поверхности и особенно шероховатость существенно влияют на долговечность деталей, значительное внимание уделяют вопросам оценки качества поверхностей деталей и разработке средств и методов его улучшения.

За критерий оценки качества поверхности принимают следующие, не регламентированные ГОСТом параметры:

- величины опорной поверхности.
- поверхность фактического контакта;
- радиусы закругления вершин и впадин микронеровностей.
- углы наклона образующих неровностей при основании.
- отношение радиуса закругления вершин микронеровностей к их максимальной высоте;
- среднее квадратическое отклонение высот микронеровностей, то есть критерии, определяющие форму микронеровностей, их направление, и другие показатели.

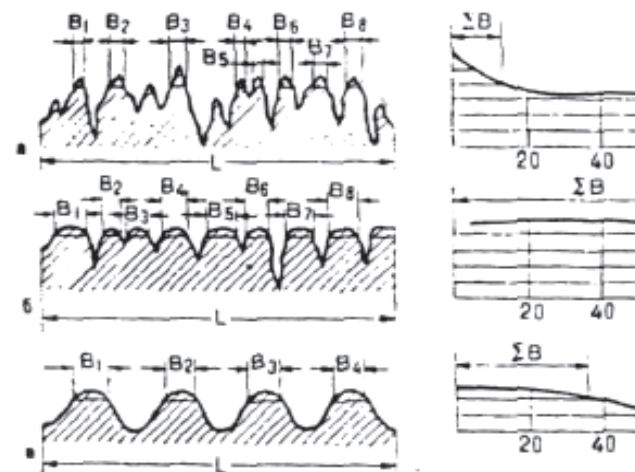
3. Выбор наиболее рационального вида обработки для различных групп деталей и их рабочих поверхностей требует научно-производственной проверки. Особенно перспективно вибронакатывание. Износ деталей при этом значительно снижается.

Отделочные операции необходимы не только для улучшения шероховатости, но и для удаления тонкого дефектного поверхностного слоя со сниженными обычно физико-механическими свойствами.

Применение упрочнения деталей и их рабочих поверхностей термической и химико-термической обработками основной метод, используемый в автотракторостроении для значительного повышения износостойкости, статистической и циклической прочности наиболее ответственных деталей.

Используются следующие виды термической обработки: улучшение + объемная закалка + высокий отпуск, объемная закалка +

средний отпуск, поверхностная закалка с нагревом  $t_{вч}$  + низкий отпуск, изотермическая закатка. Для стабилизации свойств и структуры деталей в автотракторостроении широко применяется нормализация и высокий отпуск деталей.



**Рис. 5.1. Профиллограммы и кривые опорных поверхностей при различных способах обработки:**

*a* – точение; *б* – обкатывание; *в* – вибрационное обкатывание

Улучшению, часто с предварительной нормализацией, подвергают стальные коленчатые валы тракторных двигателей, коленчатые оси тракторов, шатуны автотракторных двигателей и другие детали.

Поверхностной закалкой с нагревом, т. в. ч. упрочняются детали, предварительно подвергнутые нормализации, улучшению, цементации и нитроцементации. Закаленные с нагревом т. в. ч. детали имеют твердость HRC 54...62 и отличаются высокой износостойкостью. Закалка с нагревом т. в. ч. оказывает положительное влияние на усталостную прочность, которая для стали 45 повышается в 2 раза.

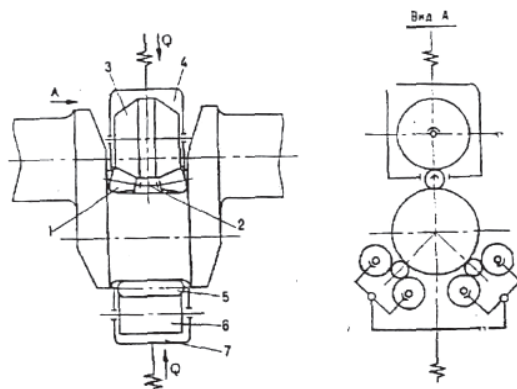
Из всех видов химико-термической обработки для упрочнения автотракторных деталей наибольшее применение получили цементация, нитроцементация и цианирование.

4. Упрочнение деталей поверхностным пластическим деформированием – простой, доступный и эффективный способ повышения их не-

сушей способности и долговечности. Наиболее эффективно применение поверхностного пластического деформирования для деталей, работающих при переменных нагрузках, так как во многих случаях их запасы прочности повышаются в 1,5... 2 раза и более, увеличивая тем самым сроки службы деталей. Повышение сопротивления усталости в этом случае обусловлено возникновением благоприятных остаточных напряжений.

Вместе с тем в результате наклепа повышается твердость рабочих поверхностей и сопротивляемость их износу и коррозии, уменьшается шероховатость поверхностей. Величина упрочнения и степень повышения твердости при обработке поверхностным пластическим деформированием для различных материалов и их структурных состояний различны. Стальные детали больше всего упрочняются, если содержат феррито-перлитные и тростито-мартенситные структуры.

В различных формах выполнения поверхностное пластическое деформирование успешно применяется для повышения долговечности автотракторных деталей. Пружины, рессоры, шатуны и другие детали подвергаются дробеструйной обработке. Коленчатые валы тракторных двигателей и поворотные цапфы (по галтелям), другие ваты, оси и полуоси эффективно упрочняют обкаткой шариками и роликами. Схема устройства для упрочнения галтелей коленчатых валов показан на рисунке 5.2.



**Рис. 5.2. Схема устройства для упрочнения галтелей коленчатых валов:**

- 1 – деформирующие конические ролики; 2 – сепаратор;  
3 – опорный кохус; 4 – корпус; 5 – поддерживающие ролики;  
6 – роликоподшипники; 7 – нижняя головка

Рабочие поверхности втулок верхних головок шатунов, гильз, цилиндров, отверстий в корпусах коробок передач и задних мостов, балансиров обрабатываются раскаткой и дорнованием.

Повышение долговечности деталей нанесением на их поверхности износостойких и коррозионно-стойких покрытий различными способами весьма эффективно. Так, пористое хромирование успешно используется для упрочнения верхних поршневых колец двигателей, которые хорошо работают в паре с чугунными гильзами. Срок службы указанной пары в результате этого повышен более чем в 1,5...2 раза. Если хромирование использовать для упрочнения рабочих поверхностей гильз цилиндров и шеек коленчатых валов, то стоимость двигателя повышается на 4 %, а ресурс может быть увеличен в 2...3 раза.

Автотракторные детали различных наименований (вилки, кольца, крепежные детали и др.) подвергаются нанесению различных коррозионно-стойких электролитических и химических покрытий: цинкованию, никелированию, оксидированию; фосфатированию, лужению и др., а также применению комбинированных процессов цинкованию с хромированием, кадмированию с хромированием и др. Чтобы повысить коррозионную стойкость цинковых покрытий в 5...7 раз, их подвергают дополнительной обработке хромированием – погружением оцинкованных деталей в раствор хромовой кислоты или ее солей на несколько секунд.

Повышение долговечности деталей нанесением на их рабочие поверхности износостойких наплавленных слоев находит определенное, хотя и ограниченное применение. Индукционная наплавка твердыми сплавами успешно используется для повышения износостойкости рабочих органов сельскохозяйственных машин (лемехов, лап культиваторов), срок службы которых повышается в 2...3 раза.

Наплавка плазменной дугой тарелок клапанов автомобильных двигателей значительно (в 4...10 раз) увеличивает срок их службы. Твердыми сплавами, легированными сталями и специальными чугунами упрочняют при наплавке торцы стержней клапанов, толкателей, клапанных гнезд. Особенно эффективно использование самофлюсующихся сплавов с высоким содержанием никеля ПГ-ХН80СРЧ и другие, сплавов ЭП-616 и ЭП-616А. Наплавку широко применяют при восстановлении и упрочнении изношенных деталей.

*Другие мероприятия конструктивно-технологического характера, направленные на повышение надежности, следующие:*

- термомеханические упрочнения;
- применение при изготовлении деталей кованных заготовок и профилей;
- изготовление шестерен, шлицевых валов, других деталей методом обкатывания (вместо нарезания заготовок в нагретом и холодном состоянии);
- армирование деталей и упрочнение их быстроизнашивающихся поверхностей постановкой втулок, колец, вставок из высоколегированных и износостойких материалов и сплавов;
- введение шлицевых соединений повышенной твердости;
- проведение статической и динамической балансировки деталей (особенно в связи с форсированием машин);
- обеспечение стабильности свойств материалов деталей применением искусственного старения для деталей из чугуна (блоки цилиндров, головки цилиндров, картеров трансмиссий и др.) и дополнительной обработки холодом закаленных сталей;
- повышение точности и качества сборки и окраски узлов, агрегатов и машин в целом, введение новых методов соединения деталей, особенно комбинированных, а также применение многих других мероприятий и повышение технологической дисциплины в целом.

Этот комплекс мероприятий позволит машиностроителям добиться значительного повышения доремонтного технического ресурса машин.

Традиционные конструктивные материалы и способы их упрочнения по поверхностям трения в большинстве своем себя исчерпали. Надежность современных машин в смысле повышения поверхностной прочности деталей и пар трения в настоящее время может быть решена только применением принципиально новых материалов и принципиально новой технологии упрочнения поверхностей трения.

История создания практически безызносных деталей и пар трения берет свое начало в СССР. Сюда следует отнести, прежде всего, открытие явления избирательного переноса в закрытых парах трения Д. Н. Гаркуновым и И. В. Крагельским, затем открытие эффекта аномально низкого трения для случая космического простран-

ства группой советских ученых (Е. А. Духовский, В. С. Онищенко, А. Н. Пономарев, А. А. Силин, В. Л. Тальрозе). Этот эффект заключается в снижении коэффициента сухого трения в вакууме до величины  $10^{-3}$  при бомбардировке одного из элементов пары трения (например, молибдена или полиэтилена) потоком частиц (электронов, атомов гелия и др.), разогнанных до энергии порядка 1 КэВ. Эффект наступает по достижении чрезвычайно высокой (порядка  $10^{12}$  эрг/г) интегральной дозы облучения и сохраняется в дальнейшем в течение всего времени облучения в широком диапазоне нагрузок и скоростей. Изучение этого эффекта показало, что имеет место сильная ориентация кристаллитов молибденита на его поверхности.

Исследования, проведенные во ВНИИ оптико-физических измерений и в Институте химической физики АН СССР, позволили не только выявить условия формирования таких поверхностей трения, но и разработать технологию их стабилизации в широком диапазоне скоростей и температур. Коэффициент трения скольжения таких поверхностей находится в пределах  $(1...5)10^{-3}$ , что достижимо лишь при жидкостном трении.

Возможность управления поверхностной активностью твердых тел в вакууме путем радиационного воздействия позволяет не только повысить эффективность твердых смазок путем их радиационной модификации, но и разработать новые способы управления поверхностными свойствами твердых тел, что может быть применимо и для обычного машиностроения.

Несомненный интерес представляет разработанная профессором Б. И. Костецким и его школой структурная приспособляемость материалов пар трения на стадии их приработки и изнашивания, когда в поверхностных слоях толщиной  $10^{-9}$ – $10^{-8}$  м, имеющих аморфное строение, добиваются теоретической прочности и в ряде случаев обеспечиваются безызносность узла трения.

Прекрасные результаты дает применение так называемых «вечных подшипников», разработанных лабораторией ферромагнитных жидкостей Ивановского энергетического института, в которых металлические тела вращения заменены жидкими кристаллами.

Для создания практически безызносных деталей трения необходимо исключить всякую деформацию поверхностного слоя (для определенных значений параметров физического поля с определенным коэффициентом запаса износостойкости). Этого можно достичь обработкой материала (например, шеек коленчатых валов) мощным лучом ла-

зера, обеспечивая нагрев детали до жидкого состояния и перевод слоя толщиной 10...15 мкм в аморфное за счет резкого охлаждения ( $T_{\text{охл}} = 1000000\text{K/c}$ ), вследствие чего атомы не успевают перестроиться в кристаллические решетки. Такой слой, обладая прочностью, близкой к теоретической, не подвержен разрушению от действий не только физического, но и химического поля (агрессивной среды).

Весьма перспективны такие виды упрочнения, как плазменное напыление порошков, детонационное напыление, термообработка лучом лазера и др.

Износа практически можно избежать, если подвижное механическое сопряжение заменить электронными устройствами, но это возможно в весьма и весьма ограниченных случаях. Надо полагать, что в ближайшее время для борьбы с износом деталей машин будет предложен огромный арсенал способов создания практически базисных деталей и пар трения современных машин и механизмов.

*Связь параметров технологического процесса с показателями надежности изделия.*

Технологический процесс изготовления, сборки и контроля изделия должен с наименьшими затратами времени и средств обеспечить требуемый уровень качества продукции, включая и надежность. Однако связь параметров технологического процесса с надежностью готового изделия весьма сложна и, кроме того, требования надежности, как правило, вступают в противоречие с такими основными требованиями к технологическому процессу, как его производительность и экономичность.

Технологу обычно трудно представить веское обоснование того или иного мероприятия, связанного с повышением надежности изделия, так как его результаты скажутся лишь через длительный промежуток времени и не в сфере деятельности данного предприятия. Например, наплавка боковых граней ножей вторичного резания измельчителя кормов «Волгарь-5А» удорожает стоимость их изготовления и не снижает энергоемкость резания кормов, но повышает износостойкость и ресурс ножей в 2-3 раза против ненаплавленных ножей, что приносит прибыль потребителю данного изделия.

Все компоненты технологического процесса – метод обработки и применяемое оборудование, последовательность операций, режимы обработки, -методы контроля – определяют его выходные

параметры и, в первую очередь, показатели качества изделия, указанные конструктором в ТУ – его точность, качество поверхности, механические свойства и др.

Показатели надежности связаны не с выходными параметрами технологического процесса, а с эксплуатационными свойствами изделия, его износостойкостью, усталостной прочностью, коррозионной стойкостью, теплостойкостью и др.

Совершенство технологического процесса во многом определяет и достигнутый уровень надежности изделия, так как именно в процессе изготовления обеспечивается заложенная конструктором надежность

Технологические методы обеспечения надежности имеют такое же решающее значение, как конструктивные и эксплуатационные. Однако до настоящего времени роль технологии в проблеме надежности еще полностью не определена. Анализ исследований и практических разработок, которые ведутся в области повышения надежности за счет технологии, показывает, что не всегда имеется четкое представление о том круге вопросов, которые должна решать технология.

*Влияние параметров технологического процесса на износостойкость поверхностей*

Показатели качества изготовления, изделий, как следствия принятого технологического процесса, оказывают непосредственное влияние на такое основное эксплуатационное свойство, как износостойкость поверхности. Во-первых, на износостойкость влияют химический состав, структура и механические характеристики материалов, которые зависят от металлургических или других процессов получения материалов, от термических и термохимических видов обработки поверхностей. Во-вторых, износостойкость зависит от геометрических и физико-химических параметров поверхностного слоя. При этом отклонение формы деталей увеличивает период макроприработки, а шероховатость поверхности влияет на период микроприработки, поскольку в процессе нормального изнашивания устанавливается оптимальная шероховатость, соответствующая данным условиям работы сопряжения. Например, для многих видов износа поверхностей параметром изделия, влияющим на скорость изнашивания, будет твердость и коррозионная стойкость материала.

Рассеивание значений твердости материала приводит к соответственному рассеиванию скоростей изнашивания, а при воз-

возможности получения изделий с низкими значениями твердости изделие будет иметь недопустимо высокую скорость изнашивания, что может привести к преждевременному отказу.

Естественно, что повышение стабильности технологического процесса и недопустимость изготовления изделий с минимальной твердостью обеспечит выпуск надежных изделий.

*Влияние параметров технологического прогресса на усталостную прочность деталей*

На усталостную прочность оказывают влияние, как характеристика материала, так и состояние его поверхностных слоев, а также наличие дефектов. Например, возникающие в поверхностном слое при механической обработке растягивающие остаточные напряжения обычно снижают предел выносливости, сжимающие, наоборот, могут улучшить прочностные характеристики. Это влияние особенно сказывается на деталях, работающих при знакопеременных нагрузках и высоких температурах. Поэтому для них важно выбрать оптимальный технологический процесс обработки, обеспечивающий необходимые физические параметры поверхностного слоя.

Известно, что параметры шероховатости поверхности оказывают существенное влияние на сопротивление усталости. В общем случае предел усталости повышается с улучшением качества поверхностного слоя. Кроме того, на них влияет направление следов обработки: при их совпадении с действием главного напряжения предел усталости выше. Финишная обработка поверхности, которая в основном определяет конфигурацию микроскопических рисок и механические свойства поверхностного слоя, существенно влияет на предел выносливости даже при одинаковом классе шероховатости

*Влияние параметров технологического процесса на коррозионную стойкость изделий.*

Для защиты металлов от коррозии широко применяются различные виды покрытий – электролитические, химические, полимерные.

Коррозионная стойкость этих покрытий, как эксплуатационное свойство изделий, находящихся под воздействием агрессивных сред, зависит не только от вида покрытия, но и от режимов их нанесения, условий в которых осуществляется технологический процесс, возможности регулировать и контролировать его протекание.

Коррозионная стойкость связана с такими показателями, как сплошность, однородность покрытия по составу, стабильность по толщине.

При нанесении полимерных покрытий их часто делают многослойными. В этом случае технологический процесс может обладать большим диапазоном условий обработки, что приводит к рассеиванию начальных параметров изделий и их существенной зависимости от режимов обработки.

Более сложные технологические задачи возникают при применении покрытий, которые помимо коррозионной стойкости должны также быть износостойкими или обеспечивать сопротивляемость усталостному разрушению.

Последовательность технологических операций, применяемые методы и режимы обработки оказывают непосредственное влияние на износостойкость, прочность, коррозионную стойкость, теплостойкость, стабильность механических и физических свойств и другие эксплуатационные показатели изделий.

*Упрочняющие технологии* Повышение надежности можно обеспечить за счет введения специальных видов обработки, повышающих износостойкость, усталостную прочность, коррозионную стойкость изделий. Для этих целей применяются технологические процессы, упрочняющие поверхностный слой, придающие ему особые свойства. Сюда относятся как процессы химико-термической обработки (закалка, цементация, азотирование, цианирование и др.), так и упрочняющая технология, основанная на пластическом деформировании поверхностей, а также различные специальные методы (создание самозатачивающихся лезвий рабочих органов сельскохозяйственных машин).

При применении методов поверхностной пластической деформации в результате наклепа в поверхностных слоях видоизменяются форма и размеры кристаллических зерен, повышается твердость и образуются сжимающие напряжения, способствующие повышению износостойкости и сопротивляемости, усталостным разрушениям. Эффективность наклепа таких деталей, как листовые рессоры, повышается при обработке их в напряженном состоянии, совпадающего с тем, которое имеет место при эксплуатации.

Сравнительно недавно предложен новый метод поверхностного упрочнения – алмазное выглаживание. Для выглаживания используется инструмент из алмаза, сапфира или корунда со сферической или цилиндрической рабочей частью радиусом от 0,5 до 3 мм. Вы-

сокая твердость, износостойкость, теплопроводность инструмента, а также сравнительно низкий коэффициент трения пары алмаз – металл обеспечивают высокую эффективность использования этого метода обработки

Наиболее целесообразно применять выглаживание для достижения шероховатости поверхности 10-го класса и выше. Рекомендуемая исходная шероховатость – 7–8-й классы. При выглаживании происходит упрочнение поверхностного слоя на глубину 0,5–1,5 мм со степенью наклепа 15–20 %.

### **5.3. Обеспечение надежности при эксплуатации техники**

#### *Традиционные методы повышения надежности*

Условия эксплуатации машин оказывают наибольшее влияние на показатели и надежности и могут свести на нет любые достижения конструкторов и технологов.

Надежность машин в эксплуатации зависит от целого ряда мероприятий, которые необходимо соблюдать всем работникам, связанным с эксплуатацией техники.

*Обкатка новых (отремонтированных) машин в хозяйствах* фактически закладывает основы длительной и безотказной работы машин и должна проводиться при постепенном повышении нагрузки в соответствии с рекомендациями заводов-изготовителей или ремонтных предприятий.

Обкатка тракторов и автомобилей включает в себя опробование работы двигателя без нагрузки и обкатку с постепенным повышением нагрузки при выполнении полезных сельскохозяйственных и транспортных работ, не требующих значительных тяговых усилий. Во время обкатки постоянно ведут контроль за работой двигателя и всех агрегатов с целью выявления повышенного нагрева, шумов и стуков, утечки масла и др. Тщательно выполняют все операции ежедневного ТО. По завершении обкатки проводится плановое ТО-1 с заменой смазки в двигателе и во всех агрегатах и сборочных единицах трансмиссии и ходовой части. За период производственной обкатки тракторов рекомендуется трижды менять смазку, а ограничение мощности снимать через 120 ч работы двигателя. Это позволит лучше приработать трущиеся поверхности и подготовить их к нормальному нагружению.

При обкатке трактора в зимнее время рекомендуется применять смесь определенных для данной машины картерных масел с дизельным топливом. На трактор, прошедший обкатку, составляют акт, делают отметку об этом в техническом паспорте и сдают машину в эксплуатацию. Первые 50–60 ч эксплуатации после обкатки трактор должен находиться под особым наблюдением механика (помощника бригадира по технике).

*Организация технического обслуживания и создание для его проведения необходимой базы* – основные условия обеспечения надежной и экономичной работы машинно-тракторного парка.

Система технического обслуживания сельскохозяйственной техники предусматривает проведение ежесменных (через 8–10 ч), сезонных (2 раза в год) и плановых технических обслуживаний.

Периодичность проведения технических обслуживаний машин необходимо строго соблюдать независимо от загрузки и различными работами. Работа на машинах без проведения установленных технических обслуживаний запрещается.

Уровень проведения технических обслуживаний машин в значительной мере зависит от средств и места их проведения и квалификации обслуживающего персонала. Наиболее высокой эффективности использования машинно-тракторного парка и обеспечения его надежной работы добились хозяйства, в которых организованы стационарные пункты технического обслуживания. Созданы звенья обслуживания и широко используются необходимое моечное, смазочное, регулировочное, диагностическое оборудование, приборы и оснастка, средства механизации работ. Хозяйства, не имеющие необходимой технической базы, принимают на комплексное техническое обслуживание предприятиями технического сервиса в АПК, на которые также возложено и проведение периодического технического обслуживания автомобилей, оборудования ферм и комплексов.

– *Проведение периодических технических осмотров и технического диагностирования состояния машин, сборочных единиц и агрегатов* Периодические технические осмотры – составная часть общей системы технического обслуживания машин. Их проводят один-два раза в год представители Госсельтехнадзора и автомобильной инспекции с целью контроля за качеством эксплуатации и хранением шин, выборочной проверки их технического состояния (особенно с применением средств технической диагностики), ор-

ганизации и деятельности инженерной службы в хозяйстве, ведение технической документации и др.

Проведение технических осмотров машин в значительной мере улучшает деятельность технических служб хозяйств и повышает надежность используемой ими техники.

– *Обеспечение нормального режима работы машин*, особенно в зимнее время, повышает их долговечность. Перегрузка машин (по нагрузке и скорости), неправильные регулировки зазоров в подшипниках, шестернях и других соединениях вызывают нарушения температурного режима работы трущихся поверхностей деталей, условий смазывания, что приводит к форсированному их износу.

Наиболее высокие удельные нагрузки на детали машин и крайне ухудшенные условия их смазывания наблюдаются при начальных запусках двигателей и включении агрегатов трансмиссий в холодное время года при температуре ниже 5 °С). Несколько минут такой работы вызывают износы (которые могли бы появиться за десятки и даже сотни часов нормальной эксплуатации) и часто приводят к авариям.

Мероприятиями, обеспечивающими установленный тепловой режим работы двигателей (температура воды и масла 75... 95 °С) и нормальные условия зимней эксплуатации машин, являются:

- организация теплых стоянок,
- использование электрических подогревателей масла,
- применение системы воздушного подогрева машин, хранящихся на открытых площадках, с помощью теплогенераторов, газовых горелок,
- подача подогретой воды непосредственно к машинам,
- использование антифризов и др.

На работу машин отрицательно влияет перегрев двигателей, который наблюдается в жаркие месяцы при ухудшении работы сборочных единиц системы охлаждения и образовании в ней накипи, вследствие перегрузок, нарушения работы топливной системы, неправильных регулировок и других причин, перегрев двигателей вызывает (так же как и осаждение при низких температурах) форсированный износ деталей, особенно цилиндропоршневой группы, газораспределительного и кривошипно-шатунного механизмов, а в ряде случаев может привести к аварийным дефектам (обрыву клапанов, трещинам в головках и блоках цилиндров и др.). Ряд заводов-изготовителей запрещает при перегреве масла останавливать двига-

тель до установления в нем нормальной температуры. Чтобы предотвратить перегрев масла, необходимо устранить причины, вызывающие этот дефект.

При низких температурах поверхности цилиндров могут также подвергаться ускоренному износу из-за ухудшения условий их смазывания и коррозионного изнашивания.

– *Совпадении установленных правил хранения машин* Основные эксплуатационные мероприятия, обеспечивающие высокую сохранность сельскохозяйственной техники, особенно в периоды, свободные от работы, и в осенне-зимнее время, следующие

- создание специальных помещений и площадок с твердым покрытием.
- использование различных подставок и подкладок,
- очистка деталей от технологических загрязнений и почвы,
- нанесение на неокрашиваемые рабочие и другие поверхности защитных смазок (НГ-203, НГ-204, ЦИАТИМ-202 и др.),
- своевременное восстановление нарушенных лакокрасочных покрытий,
- хранение в закрытых помещениях электрооборудования, резины, приборов, рабочих органов машин и др.

Строгое соблюдение рекомендаций заводов-изготовителей по применению топлива, картерных масел и других смазок. Не нарушать за период эксплуатации, установленные для машины сроки смены масел и смазок

– *Контроль и постоянное соблюдение требуемой герметизации агрегатов, сборочных единиц и систем машин* в целях предупреждения попадания в них абразива для сельскохозяйственной техники — важный фактор повышения долговечности. Герметичность в большинстве случаев нарушается вследствие ослабления креплений крышек под действием вибраций, из-за низкого качества прокладочного материала, износа, несвоевременной замены сальниковых уплотнителей, короблении корпусных деталей и их плоскостей разъемов и по другим причинам

В процессе эксплуатации машин внутри их агрегатов температура повышается до 70–90 °С В результате температурного перепада из окружающей атмосферы во внутренние полости агрегатов засасывается воздух, обильно содержащий абразивные частицы (особенно на таких работах, как культивация, боронование и др.). Поэтому герметизации узлов и агрегатов следует уделять

особое внимание. При эксплуатации машин в тяжелых условиях (повышенная запыленность воздуха, высокая температура окружающего воздуха и др.) рекомендуется воздухоочистители промывать через 25–30 ч, а центрифуг – через 120 ч работы.

#### **5.4. Технологические методы обеспечения послеремонтного уровня надежности**

Ремонт машин представляет собой весьма важное звено в общей системе поддержания машин в работоспособном состоянии. При ремонте машин одновременно возможны их модернизация и проведение мероприятий по повышению долговечности. Основные пути решения этой задачи следующие.

– *Обеспечение сохранности ремонтного фонда, поступающего на ремонтные предприятия.* Достигается организацией соответствующих складов и площадок, применением различных подставок и подкладок, антикоррозионных смазок и других средств. Особое внимание следует уделять защите от коррозии ремонтного фонда деталей машин, поступающих для восстановления, которые при неудовлетворительном хранении могут быть превращены в металлолом.

– *Выполнение разборочных работ при условиях, исключаящих повреждение деталей и разукomплектовку пар.* При разборочных работах рекомендуется уделять внимание использованию средств механизации (особенно гидравлических станций, прессов и др.), обеспечивающих небольшой процент повреждения деталей, а также различных контейнеров для сохранения комплектов деталей соответствующих узлов и агрегатов. Запрещается раскомплектовывать блоки цилиндров, крышки подшипников коленчатого вала, шатуны и их крышки, пары шестерен конечных и других передач и т. п.

– *Внедрение на ремонтных предприятиях эффективной мойки и очистки деталей от различных загрязнений* – одно из наиболее решающих условий обеспечения высокого послеремонтного ресурса машин. Удаление нагара, смолистых отложений, накали и других загрязнений – специфический ремонтный процесс, отличающийся определенными трудностями и требующий большого внимания, а также использования современных моечных машин и установок, новых комплексных моечных препаратов, содержащих

поверхностно-активные компоненты, и обеспечения заданных режимов мойки, особенно поддержания температуры моечных ванн (75...90 °C).

– *Контроль и дефектация изношенных деталей машин* в значительной мере определяют сроки их службы. Принимая во внимание высокую точность изготовления автотракторных деталей (1, 2, 3-го класса) и новые (ужесточенные) технические условия на ремонт машин с повышенным ресурсом, на ремонтных предприятиях следует расширить номенклатуру деталей, подвергаемых сплошному контролю. Рекомендуется применение предельных (пробки, калибры, скобы), универсальных (индикаторы, микрометры, миниметры) измерительных инструментов и средств пневматического контроля, обеспечивающих повышение точности измерений размеров (геометрии) до 0.01...0,001 мм. Такие детали машин, как коленчатые ваты, шатуны, коленчатые оси и поворотные цапфы, блоки и гильзы цилиндров и другие в целях повышения надежности отремонтированных машин должны обязательно быть проверены на отсутствие скрытых дефектов (особенно трещин) методами, широко используемыми в машиностроении и на передовых ремонтных предприятиях (магнитная, люминесцентная, ультразвуковая и рентгеновская дефектоскопия, гидравлическая опрессовка и др.)

– *Сплошной контроль размеров и геометрии рабочих поверхностей базовых деталей машин, поступающих в ремонт, а также точности их взаимного расположения.* За время эксплуатации на машинах в этих деталях в результате старения материала, износов, а также воздействия различных нагрузок и перераспределения внутренних напряжений происходят изменения размеров, геометрии и взаимного расположения рабочих поверхностей, которые должны быть устранены. Это обеспечивает высокую работоспособность не только самой базовой детали, но и всего агрегата. Восстановлением и стабилизацией размеров базовой детали ремонтные предприятия имеют возможность повышать ресурс отремонтированных машин даже по сравнению с новыми, детали которых не подвергались искусственному старению.

– *Восстановление изношенных деталей с применением прогрессивных способов нанесения покрытий и упрочнения поверхностей.* Подготовка и выполнение восстановительных процессов, используемых для «возрождения» изношенных деталей машин, оказыва-

ют решающее влияние на их послеремонтный ресурс в целом. Это происходит потому, что восстановлению подвергают обычно быстроизнашивающиеся детали, и работоспособность любой машины, в первую очередь, зависит от качества деталей, устанавливаемых на неё при ремонте.

Учитывая конструктивно-технологические характеристики и условия работы деталей, выбирают соответствующие способы восстановления деталей, обеспечивающие достаточную долговечность и безотказность.

Качество и долговечность восстанавливаемых деталей зависят главным образом от выбора рационального способа восстановления применения упрочняющей технологии и получения заданного качества поверхности, особенно на стадии финишных операций обработки и упрочнения восстанавливаемых деталей.

Применяя различные технологические процессы восстановления, особенно металлопокрытиями, и упрочняющую технологию, можно не только восстанавливать потерянные размеры деталей и первоначальные служебные свойства, но и значительно их повышать.

Примером этому может служить создание биметаллических поверхностей у новых деталей и значительное повышение их долговечности (хромированные поршневые кольца, наплавленные клапаны двигателей, рабочие органы сельскохозяйственных машин и др.).

– *Внедрение на ремонтных предприятиях входного контроля*, особенно новых деталей, диктуется необходимостью в связи с тем, что многочисленными проверками установлены значительные отклонения их размеров и геометрии от заданных значений по рабочим чертежам

– *Тщательный весовой и размерный подбор деталей цилиндропоршневой группы*. В связи с форсированием современных двигателей по оборотам и нагрузке необходим тщательный подбор по массе деталей ЦПГ. Особенно это важно для ремонтных предприятий, так как в результате износов ослабляется прочность, и жесткость ряда деталей наблюдаются и раскомтектовка и замена а также другие отклонения. В качестве примера можно указать, что для отремонтированных двигателей СМД-14 разность в массе комплекта поршней не должна превышать 7г, а шатунов – 12 г.

– *Динамическая балансировка* коленчатых и карданных валов маховиков муфт сцепления и других узлов и деталей. Для динамической балансировки деталей ремонтные предприятия оснащаются специальными машинами БМ-У4.

– *Обеспечение регламентированные посадок усилии затяжки и сборки резьбовых соединений* и других требований при сборке агрегатов машин, особенно автотракторных двигателей,— ответственное мероприятие, границы которого для каждой машины определены типовой технологией сборки

– *Обеспечение хорошей герметизации агрегатов и сборочных единиц при их ремонте* определяется не только заменой сальниковых уплотнений, но и устранением постоянно возникающих короблении плоскостей разъемов деталей, а также восстановлением изношенных резьбовых креплений применением специального прокладочного материала ЛАСП, прокладок из паронита и герметизирующих паст У-20А, УН-25, УН-01 (рекомендации ГОСНИТИ). Необходима проверка качества сборки и герметизации сборочных единиц (агрегатов).

– *Стендовая обкатка и испытания* – ответственный начальный период работы смонтированных сборочных единиц и агрегатов машин. Поэтому в условиях ремонтных предприятий они должны выполняться и совершенствоваться введением обкатки под нагрузкой (не только двигателей, но и агрегатов трансмиссий машин), применением осерненных и новых обкаточных масел (ОМ-2) и присадок (АЛП-2) к топливу, тщательной очисткой, охлаждением и централизованной подачей масла, а также топлива и воды

В процессе стендовой обкатки и испытания необходим тщательный их контроль с целью выявления посторонних шумов и стуков, повышенного нагрева, течи масла, воды и топлива, нарушения регулировок и др. После обкатки проводится контрольный осмотр двигателей и агрегатов, повторное испытание (при необходимости), замена смазки и промывка агрегатов дизельным топливом, а также очистка и замена фильтрующих элементов. Особое внимание при этом обращают на состояние, герметичность и нормальную работу воздухоочистителей.

Повышение качества окраски ремонтируемых машин, а следовательно, их сопротивляемости коррозии в условиях ремонтных предприятий выполняется следующими приемами:

- снятием старой окраски в горячих щелочных ваннах;
- применением эффективных грунтов и эмалей;
- окраской отдельно агрегатов (до общей сборки машин) и машин в целом (после обкатки и испытаний) с применением новых методов окраски (в электростатическом поле, гидродинамическим распылением и др.).

## Контрольные вопросы

1. Каковы основные задачи повышения качества и надежности отремонтированной сельскохозяйственной техники?
2. Какие Вы знаете причины нарушения работоспособности и снижения надежности машин?
3. Какие общие понятия, применяются в надежности? (исправность, неисправность, предельное состояние, работоспособное и неработоспособное состояние, повреждение, отказ и другие).
4. Что такое служба надежности на ремонте предприятия? Каково её назначение и роль в повышении качества и надежности отремонтированной сельскохозяйственной техники?
5. Что такое надежность сельскохозяйственной техники?
6. Что такое техническое обслуживание и ремонт машин? Понятие восстанавливаемый, невосстанавливаемый, ремонтируемый и неремонтируемый объект.
7. Что такое наработка, технический ресурс, срок службы, срок сохраняемости и каковы единицы их измерения?
8. Каково значение терминов, относящихся к свойствам технического объекта: безотказность, долговечность, ремонтпригодность, сохраняемость?
9. Что такое гамма-процентный ресурс, его практическое значение?
10. Какой смысл в понятиях «гарантийная наработка (ресурс)» и «срок гарантии»?
11. Какие вы знаете объекты, рассматриваемые в надежности сельскохозяйственной техники? (технический объект, техническая система, элемент технической системы).
12. Что такое продукция, виды продукции, ее свойства и качество?
13. Каковы группы признаков качества продукции?
14. Какова связь между качеством технического объекта и его надежностью?
15. Каковы причины отказов сельскохозяйственной техники?
16. Каково значение качества и надежности машин в повышении эффективности использования сельскохозяйственной техники?

17. Какие Вы знаете основные виды отказов технических объектов?
18. Какова физическая природа возникновения постепенных и внезапных отказов?
19. Какова характеристика вредных процессов, приводящих к отказам машин?
20. Каковы виды отказов по последствиям или затратам на их устранение (группы сложности отказов)?
21. Какие Вы знаете внешние и внутренние факторы, снижающие надежность технических объектов?
22. Какова классификация видов трения в машинах, влияние трения на изнашивание?
23. Какие вы знаете виды изнашивания деталей, Факторы, влияющие на изнашивание, сущность этого влияния?
24. Какая Вам известна классификация видов смазки и их характеристика?
25. Что такое понятие о механическом изнашивании деталей? Меры борьбы с этим видом изнашивания. Приведите примеры.
26. Что такое абразивное и гидроабразивное (газоабразивное) изнашивание деталей? Сущность процессов, условия протекания. Меры борьбы с этими видами изнашивания. Поясните на примере изнашивания деталей сельскохозяйственной техники.
27. Что такое эрозионное, гидроэрозионное (газоэрозионное), усталостное, кавитационное изнашивание деталей? Сущность процессов, условия протекания. Меры борьбы с этими видами изнашивания. Приведите примеры.
28. Что такое коррозионно-механическое изнашивание деталей? Окислительное, изнашивание при фреттинг-коррозии? Сущность процессов, условия протекания. Меры борьбы с этим видом изнашивания. Приведите примеры.
29. Каковы мероприятия по уменьшению интенсивности изнашивания деталей машин и уменьшению влияния износов на качественные показатели работы машин?
30. Что такое изнашивание при заедании и электроэрозионное изнашивание?
31. Каковы причины образования нагара и накипи, потери упругости, намагниченности, возникновения пластических де-

формаций деталей? Как они влияют на работу машины? Меры борьбы с этими явлениями.

32. Какие вы знаете основные показатели и закономерности изнашивания?
33. Когда и как используются основные закономерности изнашивания деталей (при конструировании, эксплуатации и ремонте машин)?
34. Как влияет макро-и микрогеометрия поверхностей на изнашивание деталей машин? Оптимальная микрогеометрия поверхностей.
35. Каковы методы определения износов деталей машин и область их применения?
36. Что такое предельное состояние (износ) машин, соединений и деталей? Опишите критерии предельного состояния и методы их определения. Приведите примеры.
37. Что такое допустимые и предельные значения износа деталей при ремонте машин? Зависимость между ними.
38. Каков порядок расчета остаточного и полного технического ресурса детали?
39. Каков порядок расчета остаточного и полного ресурса соединения?
40. Что такое потеря работоспособности деталей из-за усталости металла?
41. Какие вы знаете коррозионные повреждения деталей узлов, условия протекания коррозии и меры борьбы с ней? Приведите примеры.
42. Что такое искажение проектной геометрии деталей машин (сущность и причины возникновения). Как влияет искажение геометрии деталей на работу агрегатов и машин?
43. Какова классификация отказов машин?
44. Что такое основные понятия теории вероятностей: испытание (опыт), событие, случайная величина, частота, частность, вероятность и др.?
45. Что такое понятие показателя надежности? Единичные и комплексные показатели надежности.
46. Какими показателями характеризуется безотказность технических объектов?
47. Какими показателями характеризуется долговечность технических объектов?

48. Что такое единичные показатели ремонтпригодности сельскохозяйственной техники?
49. Что такое показатели сохраняемости технических объектов и их сущность?
50. Что такое коэффициент готовности технических объектов. Свойства, характеризующиеся этим показателем?
51. Что такое коэффициент технического использования машин как комплексный показатель надежности?
52. Что такое комплексный показатель: коэффициент оперативной готовности технического объекта?
53. Приведите числовые характеристики (параметры) распределения случайных величин и формулы для их расчета.
54. Каковы цель, назначение и особенности испытаний сельскохозяйственной техники на надежность?
55. Каков порядок обработки статистических данных о надежности сельскохозяйственной техники при ее эксплуатации и ремонте?
56. Каковы основные законы распределения случайных величин, применяемые при оценке надежности сельскохозяйственной техники, и порядок их определения.
57. Каковы основы технической диагностики и прогнозирования ресурса технических систем и их элементов? Цель и задачи технической диагностики.
58. Какие средства технической диагностики применяют в хозяйстве, где вы работаете, или близлежащем хозяйстве?
59. Каковы основные требования к ремонтпригодности сельскохозяйственной техники?

## Библиографический список

1. *Валуев, Н. В.* Надёжность технических систем / Н. В. Валуев, А. Г. Пидяк. – Зерноград, 2001.
2. *Ермолов, Л. С.* Основы надёжности сельскохозяйственной техники / Л. С. Ермолов, В. М. Кряжков, В. Е. Черкун. – М. : Колос, 1974.
3. Надёжность в технике. Основные понятия. Термины и определения. ГОСТ 27.002–89. – М. : Изд-во стандартов, 1990. – 35 с.
4. Надёжность и ремонт машин / под. ред. В. В. Курчаткина. – М. : Колос, 2000.
5. Надёжность сельскохозяйственной техники : учеб. пособие. – Алма-Ата : Кайнар, 1990. – 280 с.
6. Основы надёжности и качества машин // Технический сервис машин сельскохозяйственного назначения : учебник для студентов вузов / В. В. Варнаков, В. В. Стрельцов, В. Н. Попов и др. – М. : КолосС, 2003. – 253 с.
7. ОСТ 24.060.03. Расчет количественных показателей надёжности дизеля. Методика.
8. ОСТ 70.2.8–82. Испытание сельскохозяйственной техники. Надёжность. Сбор и обработка информации.
9. *Проников, А. С.* Основы надёжности и долговечности машин. – М. : Изд-во стандартов, 1979.
10. *Селиванов, А. И.* Теоретические основы ремонта и надёжности сельскохозяйственной техники / А. И. Селиванов, Ю. Н. Артемьев. – М. : Колос, 1978.
11. *Сидоров, А. И.* Надёжность и ремонт машин : метод. указ. по изучению дисциплины / А. И. Сидоров, А. Н. Батищев. – М. : ВСХИЗО, 1993.
12. *Юдин, М. И.* Организация ремонтно-обслуживающего производства в сельском хозяйстве : учебник / М. И. Юдин, Н. И. Стукопин, О. Г. Ширай // КГАУ. – Краснодар, 2002. – 944 с.

## ПРИЛОЖЕНИЕ

Таблица 1

**Интегральная функция (функция распределения) закона  
нормального распределения  $F_0\left(\frac{I_{ki} - \bar{I}}{\sigma}\right)$**

| $\frac{I_{ki} - \bar{I}}{\sigma}$ | 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 | 70 | 71 | 71   | 71   | 72   | 72   | 72   |
| 0,6                               | 0,73 | 73 | 73 | 74 | 74 | 74   | 75   | 75   | 75   | 76   |
| 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 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 |

Таблица 2

## Параметры и коэффициенты распределения Вейбулла (ЗРВ)

$$a = \frac{\bar{H} - C}{K_b}; \quad a = \frac{\sigma}{C_b}; \quad \bar{H} = a \cdot K_b + C_b$$

| V    | b    | K <sub>b</sub> | C <sub>b</sub> | V     | b    | K <sub>b</sub> | C <sub>b</sub> | V    | b    | K <sub>b</sub> | C <sub>b</sub> |
|------|------|----------------|----------------|-------|------|----------------|----------------|------|------|----------------|----------------|
| 1    | 2    | 3              | 4              | 1     | 2    | 3              | 4              | 1    | 2    | 3              | 4              |
| 1,26 | 0,80 | 1,13           | 1,43           | 0,55  | 1,90 | 0,89           | 0,49           | 0,36 | 3,00 | 0,89           | 0,33           |
| 1,11 | 0,90 | 1,07           | 1,20           | 0,52  | 2,00 | 0,89           | 0,46           | 0,35 | 3,10 | 0,89           | 0,32           |
| 1,00 | 1,00 | 1,00           | 1,00           | 0,50  | 2,10 | 0,89           | 0,44           | 0,34 | 3,20 | 0,90           | 0,31           |
| 0,91 | 1,10 | 0,97           | 0,88           | 0,48  | 2,20 | 0,89           | 0,43           | 0,33 | 3,30 | 0,90           | 0,30           |
| 0,84 | 1,20 | 0,94           | 0,79           | 0,46  | 2,30 | 0,89           | 0,41           | 0,33 | 3,40 | 0,90           | 0,29           |
| 0,78 | 1,30 | 0,92           | 0,72           | 0,44  | 2,40 | 0,89           | 0,39           | 0,32 | 3,50 | 0,90           | 0,29           |
| 0,72 | 1,40 | 0,91           | 0,66           | 0,43  | 2,50 | 0,89           | 0,38           | 0,31 | 3,60 | 0,90           | 0,28           |
| 0,68 | 1,50 | 0,90           | 0,61           | 0,41  | 2,60 | 0,89           | 0,37           | 0,30 | 3,70 | 0,90           | 0,27           |
| 0,64 | 1,60 | 0,90           | 0,57           | 0,40  | 2,70 | 0,89           | 0,35           | 0,29 | 3,80 | 0,90           | 0,27           |
| 0,61 | 1,70 | 0,89           | 0,54           | 0,390 | 2,80 | 0,89           | 0,34           | 0,29 | 3,90 | 0,91           | 0,26           |
| 0,58 | 1,80 | 0,89           | 0,51           | 0,38  | 2,90 | 0,89           | 0,34           | 0,28 | 4,00 | 0,91           | 0,25           |

Таблица 3

Интегральная функция (функция распределения)  $F_T\left(\frac{H_{ki}-C}{a}\right)$   
закона распределения Вейбула

| $\frac{H_{ki}-C}{a}$ | b    |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|----------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| a                    | 0,9  | 1,0  | 1,1  | 1,2  | 1,3  | 1,4  | 1,5  | 1,6  | 1,7  | 1,8  | 1,9  |
| 0,1                  | 0,12 | 0,10 | 0,08 | 0,06 | 0,05 | 0,04 | 0,03 | 0,03 | 0,02 | 0,02 | 0,01 |
| 0,2                  | 0,21 | 0,18 | 0,16 | 0,14 | 0,12 | 0,10 | 0,09 | 0,07 | 0,06 | 0,05 | 0,05 |
| 0,3                  | 0,29 | 0,26 | 0,23 | 0,21 | 0,19 | 0,17 | 0,15 | 0,14 | 0,12 | 0,11 | 0,10 |
| 0,4                  | 0,35 | 0,33 | 0,31 | 0,28 | 0,26 | 0,24 | 0,22 | 0,21 | 0,19 | 0,18 | 0,16 |
| 0,5                  | 0,41 | 0,39 | 0,37 | 0,35 | 0,33 | 0,32 | 0,30 | 0,28 | 0,27 | 0,25 | 0,24 |
| 0,6                  | 0,47 | 0,45 | 0,43 | 0,42 | 0,40 | 0,39 | 0,37 | 0,36 | 0,34 | 0,33 | 0,32 |
| 0,7                  | 0,52 | 0,50 | 0,49 | 0,48 | 0,47 | 0,46 | 0,44 | 0,43 | 0,43 | 0,41 | 0,40 |
| 0,8                  | 0,56 | 0,55 | 0,54 | 0,54 | 0,53 | 0,52 | 0,51 | 0,50 | 0,50 | 0,49 | 0,48 |
| 0,9                  | 0,60 | 0,59 | 0,59 | 0,59 | 0,58 | 0,58 | 0,57 | 0,57 | 0,57 | 0,56 | 0,56 |
| 1,0                  | 0,63 | 0,63 | 0,63 | 0,63 | 0,63 | 0,63 | 0,63 | 0,63 | 0,63 | 0,63 | 0,63 |
| 1,1                  | 0,66 | 0,67 | 0,67 | 0,67 | 0,68 | 0,68 | 0,68 | 0,69 | 0,69 | 0,70 | 0,70 |

Продолжение

| $\frac{H_{ki}-C}{a}$ | b    |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|----------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| a                    | 0,9  | 1,0  | 1,1  | 1,2  | 1,3  | 1,4  | 1,5  | 1,6  | 1,7  | 1,8  | 1,9  |
| 1,2                  | 0,69 | 0,70 | 0,71 | 0,71 | 0,72 | 0,73 | 0,73 | 0,74 | 0,74 | 0,75 | 0,76 |
| 1,3                  | 0,72 | 0,73 | 0,74 | 0,75 | 0,76 | 0,76 | 0,77 | 0,78 | 0,79 | 0,80 | 0,81 |
| 1,4                  | 0,74 | 0,75 | 0,77 | 0,78 | 0,79 | 0,80 | 0,81 | 0,82 | 0,83 | 0,84 | 0,85 |
| 1,5                  | 0,76 | 0,78 | 0,79 | 0,80 | 0,82 | 0,83 | 0,84 | 0,85 | 0,86 | 0,87 | 0,89 |
| 1,6                  | 0,78 | 0,80 | 0,81 | 0,83 | 0,84 | 0,86 | 0,87 | 0,88 | 0,89 | 0,90 | 0,91 |
| 1,7                  | 0,80 | 0,82 | 0,83 | 0,85 | 0,86 | 0,88 | 0,89 | 0,90 | 0,92 | 0,93 | 0,94 |
| 1,8                  | 0,82 | 0,84 | 0,85 | 0,87 | 0,88 | 0,90 | 0,91 | 0,92 | 0,93 | 0,94 | 0,95 |
| 1,9                  | 0,83 | 0,85 | 0,87 | 0,89 | 0,90 | 0,91 | 0,93 | 0,94 | 0,95 | 0,96 | 0,97 |
| 2,0                  | 0,85 | 0,87 | 0,88 | 0,90 | 0,92 | 0,93 | 0,94 | 0,95 | 0,96 | 0,97 | 0,98 |
| 2,1                  | 0,86 | 0,88 | 0,90 | 0,91 | 0,93 | 0,94 | 0,95 | 0,96 | 0,97 | 0,98 | 0,98 |
| 2,2                  | 0,87 | 0,89 | 0,91 | 0,92 | 0,94 | 0,95 | 0,96 | 0,97 | 0,98 | 0,98 | 0,99 |
| 2,3                  | 0,88 | 0,90 | 0,92 | 0,93 | 0,95 | 0,96 | 0,97 | 0,98 | 0,99 | 0,99 | 0,99 |
| 2,4                  | 0,89 | 0,91 | 0,93 | 0,94 | 0,96 | 0,97 | 0,98 | 0,98 | 0,99 | 0,99 | 1,00 |
| 2,5                  | 0,90 | 0,92 | 0,94 | 0,95 | 0,96 | 0,97 | 0,98 | 0,99 | 0,99 | 0,99 | 1,00 |
| 2,6                  | 0,91 | 0,93 | 0,94 | 0,96 | 0,97 | 0,98 | 0,99 | 0,99 | 0,99 | 1,00 | 1,00 |
| 2,7                  | 0,91 | 0,93 | 0,95 | 0,96 | 0,97 | 0,98 | 0,99 | 0,99 | 1,00 | 1,00 | 1,00 |
| 2,8                  | 0,92 | 0,94 | 0,96 | 0,97 | 0,98 | 0,99 | 0,99 | 0,99 | 1,00 | 1,00 | 1,00 |
| 2,9                  | 0,93 | 0,95 | 0,96 | 0,97 | 0,98 | 0,99 | 0,99 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 |
| 3,0                  | 0,93 | 0,95 | 0,97 | 0,98 | 0,99 | 0,99 | 0,99 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 |
| 3,5                  | 0,95 | 0,96 | 0,98 | 0,99 | 0,99 | 0,99 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 |
| 4,0                  | 0,97 | 0,98 | 0,99 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 |

Продолжение

| $\frac{H_{ki}-C}{a}$ | b    |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|----------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| a                    | 2,0  | 2,1  | 2,2  | 2,3  | 2,4  | 2,5  | 2,6  | 2,7  | 2,8  | 2,9  |
| 0,1                  | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 0,2                  | 0,04 | 0,03 | 0,03 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,01 | 0,01 | 0,01 |
| 0,3                  | 0,09 | 0,08 | 0,07 | 0,06 | 0,05 | 0,05 | 0,04 | 0,04 | 0,03 | 0,03 |
| 0,4                  | 0,15 | 0,14 | 0,12 | 0,11 | 0,10 | 0,10 | 0,09 | 0,08 | 0,07 | 0,07 |
| 0,5                  | 0,22 | 0,21 | 0,20 | 0,18 | 0,17 | 0,16 | 0,15 | 0,14 | 0,13 | 0,13 |
| 0,6                  | 0,30 | 0,29 | 0,28 | 0,27 | 0,25 | 0,24 | 0,23 | 0,22 | 0,21 | 0,20 |
| 0,7                  | 0,39 | 0,38 | 0,37 | 0,36 | 0,35 | 0,34 | 0,33 | 0,32 | 0,31 | 0,30 |
| 0,8                  | 0,47 | 0,47 | 0,46 | 0,45 | 0,44 | 0,44 | 0,43 | 0,42 | 0,41 | 0,41 |
| 0,9                  | 0,56 | 0,55 | 0,55 | 0,54 | 0,54 | 0,54 | 0,53 | 0,53 | 0,53 | 0,52 |

Продолжение

| $\frac{H_{ki} - C}{a}$ | $b$  |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
|                        | 2,0  | 2,1  | 2,2  | 2,3  | 2,4  | 2,5  | 2,6  | 2,7  | 2,8  | 2,9  |
| 1,0                    | 0,63 | 0,63 | 0,63 | 0,63 | 0,63 | 0,63 | 0,63 | 0,63 | 0,63 | 0,63 |
| 1,1                    | 0,70 | 0,71 | 0,71 | 0,71 | 0,72 | 0,72 | 0,72 | 0,73 | 0,73 | 0,73 |
| 1,2                    | 0,76 | 0,77 | 0,78 | 0,78 | 0,79 | 0,79 | 0,80 | 0,81 | 0,81 | 0,82 |
| 1,3                    | 0,82 | 0,82 | 0,83 | 0,84 | 0,85 | 0,85 | 0,86 | 0,87 | 0,88 | 0,88 |
| 1,4                    | 0,86 | 0,87 | 0,88 | 0,89 | 0,89 | 0,90 | 0,91 | 0,92 | 0,92 | 0,93 |
| 1,5                    | 0,90 | 0,90 | 0,91 | 0,92 | 0,93 | 0,94 | 0,94 | 0,95 | 0,96 | 0,96 |
| 1,6                    | 0,92 | 0,93 | 0,94 | 0,95 | 0,95 | 0,96 | 0,97 | 0,97 | 0,98 | 0,98 |
| 1,7                    | 0,94 | 0,95 | 0,96 | 0,97 | 0,97 | 0,98 | 0,98 | 0,98 | 0,99 | 0,99 |
| 1,8                    | 0,96 | 0,97 | 0,97 | 0,98 | 0,98 | 0,99 | 0,99 | 0,99 | 0,99 | 1,00 |
| 1,9                    | 0,97 | 0,98 | 0,98 | 0,99 | 0,99 | 0,99 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 |
| 2,0                    | 0,98 | 0,99 | 0,99 | 0,99 | 0,99 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 |
| 2,1                    | 0,99 | 0,99 | 0,99 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 |
| 2,2                    | 0,99 | 0,99 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 |
| 2,3                    | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 |
| 2,4                    | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 |

| $\frac{H_{ki} - C}{a}$ | $b$  |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
|                        | 3,0  | 3,1  | 3,2  | 3,3  | 3,4  | 3,5  | 3,6  | 3,7  | 3,8  | 3,9  | 4,0  |
| 0,1                    | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 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 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 0,3                    | 0,03 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 |
| 0,4                    | 0,06 | 0,06 | 0,05 | 0,05 | 0,04 | 0,04 | 0,04 | 0,03 | 0,03 | 0,03 | 0,03 |
| 0,5                    | 0,12 | 0,11 | 0,10 | 0,10 | 0,09 | 0,09 | 0,08 | 0,07 | 0,07 | 0,06 | 0,06 |
| 0,6                    | 0,19 | 0,19 | 0,18 | 0,17 | 0,16 | 0,15 | 0,15 | 0,14 | 0,13 | 0,13 | 0,12 |
| 0,7                    | 0,29 | 0,28 | 0,27 | 0,27 | 0,26 | 0,25 | 0,24 | 0,23 | 0,23 | 0,22 | 0,21 |
| 0,8                    | 0,40 | 0,39 | 0,39 | 0,38 | 0,37 | 0,37 | 0,36 | 0,35 | 0,35 | 0,34 | 0,34 |
| 0,9                    | 0,52 | 0,51 | 0,51 | 0,51 | 0,50 | 0,50 | 0,50 | 0,49 | 0,49 | 0,48 | 0,48 |
| 1,0                    | 0,63 | 0,63 | 0,63 | 0,63 | 0,63 | 0,63 | 0,63 | 0,63 | 0,63 | 0,63 | 0,63 |
| 1,1                    | 0,74 | 0,74 | 0,74 | 0,75 | 0,75 | 0,75 | 0,76 | 0,76 | 0,76 | 0,77 | 0,77 |
| 1,2                    | 0,82 | 0,83 | 0,83 | 0,84 | 0,84 | 0,85 | 0,85 | 0,86 | 0,86 | 0,87 | 0,87 |

Продолжение

| $\frac{H_{ki} - C}{a}$ | $b$  |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
|                        | 3,0  | 3,1  | 3,2  | 3,3  | 3,4  | 3,5  | 3,6  | 3,7  | 3,8  | 3,9  | 4,0  |
| 1,3                    | 0,89 | 0,90 | 0,90 | 0,91 | 0,91 | 0,92 | 0,92 | 0,93 | 0,93 | 0,94 | 0,94 |
| 1,4                    | 0,94 | 0,94 | 0,95 | 0,95 | 0,96 | 0,96 | 0,97 | 0,97 | 0,97 | 0,98 | 0,98 |
| 1,5                    | 0,97 | 0,97 | 0,97 | 0,98 | 0,98 | 0,98 | 0,99 | 0,99 | 0,99 | 0,99 | 0,99 |
| 1,6                    | 0,98 | 0,99 | 0,99 | 0,99 | 0,99 | 0,99 | 0,99 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 |
| 1,7                    | 0,99 | 0,99 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 |
| 1,8                    | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 |
| 1,9                    | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 |
| 2,0                    | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 |

Таблица 4

Значение коэффициента  $t_{\beta}$ 

| $n \backslash \beta$ | 0,80 | 0,90 | 0,95 | 0,98 | 0,99 | 0,995 | 0,999 |
|----------------------|------|------|------|------|------|-------|-------|
| 2                    | 1,89 | 2,92 | 4,30 | 6,96 | 9,92 | 14,00 | 31,60 |
| 3                    | 1,64 | 2,35 | 3,18 | 4,54 | 5,84 | 7,45  | 12,92 |
| 4                    | 1,53 | 2,13 | 2,78 | 3,75 | 4,60 | 5,60  | 8,61  |
| 5                    | 1,48 | 2,01 | 2,57 | 3,36 | 4,03 | 4,77  | 6,87  |
| 6                    | 1,44 | 1,94 | 2,45 | 3,14 | 3,70 | 4,32  | 5,96  |
| 7                    | 1,41 | 1,89 | 2,36 | 3,00 | 3,50 | 4,03  | 5,40  |
| 8                    | 1,40 | 1,86 | 2,30 | 2,89 | 3,35 | 3,83  | 5,04  |
| 9                    | 1,38 | 1,83 | 2,26 | 2,82 | 3,25 | 3,69  | 4,78  |
| 10                   | 1,37 | 1,81 | 2,23 | 2,76 | 3,17 | 3,58  | 4,59  |
| 12                   | 1,36 | 1,78 | 2,18 | 2,08 | 3,05 | 3,43  | 4,32  |
| 14                   | 1,35 | 1,76 | 2,14 | 2,62 | 2,98 | 3,33  | 4,14  |
| 16                   | 1,34 | 1,75 | 2,12 | 2,58 | 2,92 | 3,25  | 4,01  |
| 18                   | 1,33 | 1,73 | 2,10 | 2,25 | 2,88 | 3,20  | 3,92  |
| 20                   | 1,32 | 1,72 | 2,09 | 2,53 | 2,84 | 3,15  | 3,85  |
| 22                   | 1,32 | 1,72 | 2,07 | 2,51 | 2,82 | 3,12  | 3,79  |
| 24                   | 1,32 | 1,71 | 2,06 | 2,49 | 2,80 | 3,09  | 3,74  |
| 26                   | 1,31 | 1,70 | 2,06 | 2,48 | 2,78 | 3,07  | 3,71  |
| 28                   | 1,31 | 1,70 | 2,05 | 2,47 | 2,76 | 3,05  | 3,67  |
| 30                   | 1,31 | 1,70 | 2,04 | 2,46 | 2,75 | 3,03  | 3,65  |
| 40                   | 1,30 | 1,68 | 2,02 | 2,42 | 2,70 | 2,97  | 3,55  |
| 50                   | 1,30 | 1,68 | 2,01 | 2,40 | 2,68 | 2,94  | 3,50  |

Таблица 5

Значения

| $\alpha \backslash n_{cp}$ | 3    | 5    | 7    | 10   | 25   | 50   |
|----------------------------|------|------|------|------|------|------|
| 0,999                      | 3,36 | 2,64 | 2,42 | 2,1  | 1,66 | 1,46 |
| 0,998                      | 3,16 | 2,60 | 2,28 | 2,05 | 1,30 | 1,42 |
| 0,996                      | 3,0  | 2,50 | 2,21 | 1,98 | 1,55 | 1,38 |
| 0,994                      | 2,86 | 2,36 | 2,14 | 1,92 | 1,52 | 1,36 |
| 0,992                      | 2,73 | 2,30 | 2,07 | 1,88 | 1,50 | 1,35 |
| 0,990                      | 2,65 | 2,22 | 2,00 | 1,81 | 1,47 | 1,34 |
| 0,980                      | 2,50 | 2,10 | 1,92 | 1,75 | 1,41 | 1,30 |
| 0,960                      | 2,36 | 1,96 | 1,81 | 1,65 | 1,35 | 1,25 |
| 0,940                      | 2,13 | 1,82 | 1,70 | 1,55 | 1,30 | 1,22 |
| 0,920                      | 2,0  | 1,76 | 1,54 | 1,50 | 1,27 | 1,20 |
| 0,900                      | 1,96 | 1,62 | 1,50 | 1,45 | 1,24 | 1,18 |
| 0,800                      | 1,63 | 1,50 | 1,40 | 1,30 | 1,21 | 1,16 |

Учебное издание

# **ОСНОВЫ НАДЕЖНОСТИ МАШИН**

*Учебное пособие для вузов*