

А. В. ПИТУХИН,
В. Н. ШИЛОВСКИЙ,
В. М. КОСТЮКЕВИЧ

НАДЕЖНОСТЬ ЛЕСОЗАГОТОВИТЕЛЬНЫХ МАШИН И ОБОРУДОВАНИЯ

С 1433434

РЕКОМЕНДОВАНО
УМО по университетскому
политехническому образованию
в качестве учебного пособия
для студентов высших учебных заведений,
обучающихся по направлению подготовки
150400 — «Технологические машины
и оборудование»

Вологодская областная
универсальная
научная библиотека
им. И.В. Бабушкина



САНКТ-ПЕТЕРБУРГ · МОСКВА · КРАСНОДАР
2010

ББК 43.904
П 32

Питухин А. В., Шиловский В. Н., Костюкевич В. М.

П 32 Надежность лесозаготовительных машин и оборудования: Учебное пособие. — СПб.: Издательство «Лань», 2010. — 288 с.: ил. — (Учебники для вузов. Специальная литература).

ISBN 978-5-8114-0990-7

В учебном пособии изложены материалы по общей теории надежности и практические примеры ее проверки относительно лесозаготовительных и сельскохозяйственных машин и оборудования, основанные на результатах исследования тракторов ОАО «ОТЗ».

Данная книга предназначена для студентов высших учебных учреждений, обучающихся по направлению «Технологические машины и оборудование», лесоинженерных и сельскохозяйственных специальностей.

ББК 43.904

Рецензенты:

А. М. КОЧНЕВ, доктор технических наук, профессор кафедры «Технологии лесозаготовительных производств» Санкт-Петербургской лесотехнической академии; *И. Р. ШЕГЕЛЬМАН*, доктор технических наук, профессор, директор Карельского НИИ лесопромышленного комплекса Петрозаводского государственного университета.

Обложка
А. Ю. ЛАПШИН

*Охраняется законом РФ об авторском праве.
Воспроизведение всей книги или любой ее части
запрещается без письменного разрешения издателя.
Любые попытки нарушения закона
будут преследоваться в судебном порядке.*

© Издательство «Лань», 2010
© А. В. Питухин, В. Н. Шиловский,
В. М. Костюкевич, 2010
© Издательство «Лань»,
художественное оформление, 2010

ВВЕДЕНИЕ

В учебном пособии рассматриваются общие теоретические вопросы, связанные с физическими основами надежности техники, методами оценки и способами повышения надежности машин по результатам их испытаний.

Данная книга может быть полезна студентам как очного, так и заочного обучения, имеющим объективные трудности с обеспечением специальной и учебной литературой по надежности машин и оборудования. Роль этой работы особенно возрастает с возобновлением и расширением заочного обучения и появлением новых специализаций, бакалавриата, магистерских программ, связанных с техническим сервисом лесозаготовительных и транспортных машин, осваиваемых лесомеханическими, лесоинженерными и сельскохозяйственными факультетами.

Для специалистов технического сервиса машин в пособии отражены практические рекомендации по использованию результатов сбора и обработки информации о надежности техники как до, так и после проведенного ремонта. Все это подчеркивает необходимость изучения курса «Надежность машин и оборудования лесного комплекса» не только будущими конструкторами, но и специалистами отраслей, эксплуатирующих и ремонтирующих технику.

ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ТЕРМИНЫ. СВОЙСТВА И ПОКАЗАТЕЛИ НАДЕЖНОСТИ

1.1. ОБЩИЕ ПОНЯТИЯ

Надежность — свойство объекта сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и в условиях применения, технического обслуживания, хранения, транспортирования.

Надежность является комплексным свойством, которое включает в себя следующее: безотказность, долговечность, ремонтопригодность, сохраняемость.

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

Долговечность — свойство объекта сохранять работоспособное состояние до наступления предельного состояния при установленной системе технического обслуживания и ремонта.

Ремонтопригодность — это свойство объекта, заключающееся в приспособленности к поддержанию и восстановлению работоспособного состояния путем технического обслуживания и ремонта.

Сохраняемость — свойство объекта сохранять в заданных пределах значения параметров, характеризующих способности объекта выполнять требуемые функции, в течение и после хранения и(или) транспортировки.

Надежность является одним из показателей качества объекта. Фактические показатели качества характеризуют уровень и соответствие всех параметров объекта тем величинам, которые предусмотрены техническим заданием (ТЗ), техническими условиями (ТУ) и картой уровня (КУ) объекта. Качество характеризуется состоянием объекта, т. е. его способностью в течение определенного, заданного промежутка времени иметь соответствующее состояние, предусмотренное технической документацией.

1.2. СОСТОЯНИЕ ОБЪЕКТА

Исправное состояние — состояние объекта, при котором он соответствует всем требованиям нормативно-технической и(или) конструкторской (проектной) документации (НТД).

Неисправное состояние (неисправность) — состояние объекта, при котором он не соответствует хотя бы одному из требований нормативно-технической и(или) конструкторской (проектной) документации.

Работоспособное состояние (работоспособность) — состояние объекта, при котором значения всех параметров, характеризующих способность выполнять заданные функции, соответствуют требованиям нормативно-технической и(или) конструкторской (проектной) документации.

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

Предельное состояние — состояние объекта, при котором его дальнейшая эксплуатация недопустима или нецелесообразна, а восстановление работоспособного состояния невозможно или нецелесообразно.

Критерий предельного состояния — признак или совокупность признаков предельного состояния объекта, установленные нормативно-технической и(или) конструкторской (проектной) документацией.

ДЕФЕКТЫ, ПОВРЕЖДЕНИЯ, ОТКАЗЫ

Дефект — каждое отдельное несоответствие объекта установленным требованиям НТД. Примером дефекта может быть несоблюдение эстетических требований, например нарушение однородности цвета лакокрасочного покрытия.

Повреждение — событие, заключающееся в нарушении исправного состояния объекта при сохранении работоспособности.

Примером повреждения может быть деформация объекта или его составной части, например крыла автомобиля без нарушения возможности вращения и поворота колеса.

Отказ — событие, заключающееся в нарушении работоспособного состояния объекта.

Критерий отказа — признак или совокупность признаков нарушения работоспособного состояния объекта, установленные НТД.

Причина отказа — явления, вызвавшие возникновение отказа.

Последствие отказа — явления, обусловленные возникновением отказа.

Ресурсный отказ — отказ, в результате которого объект достигает предельного состояния.

Независимый отказ — отказ, не обусловленный другими отказами.

Зависимый отказ — отказ, обусловленный другими отказами. Например, поломка зубьев шестерен коробки передач из-за скола зуба одной из шестерен.

Внезапный отказ — отказ, характеризующийся скачкообразным изменением значений одного или нескольких параметров объекта. Внезапные отказы в основном связаны с трещинами и поломками и с прекращением функционирования объекта (функциональные отказы).

Постепенный отказ — отказ, возникший в результате постепенного изменения значений одного или нескольких параметров объекта. Постепенные отказы связаны с процессами изнашивания, коррозии, старения и ползучести материалов. Изменение технологических, экономических

и других параметров происходит постепенно (параметрические отказы).

Явный отказ — отказ, обнаруживаемый визуально или штатными методами контроля и диагностики.

Скрытый отказ — отказ, обнаруживаемый при проведении технического обслуживания, ремонта или специальными методами диагностики.

Конструктивный отказ — отказ, возникший по причине, связанной с несовершенством или нарушением установленных правил и(или) норм проектирования и конструирования.

Производственный отказ — отказ, возникший по причине, связанной с несовершенством или нарушением установленного процесса изготовления или ремонта объекта. Иногда производственные отказы называют технологическими.

Эксплуатационный отказ — отказ, возникший из-за нарушений установленных правил и(или) условий эксплуатации.

Деградационный отказ — отказ, обусловленный естественными процессами старения, изнашивания, коррозии, усталости (отказ, возникший из-за длительной эксплуатации объекта, спроектированного, изготовленного и эксплуатируемого без каких-либо нарушений).

1.4. ВРЕМЕННЫЕ ПОНЯТИЯ

Наработка — продолжительность или объем работы, выполненный объектом. Она может измеряться в моточасах, машиночасах, километрах пробега, в единицах обработанной площади, в кубометрах заготовленной древесины и т. д.

Наработка до отказа — наработка от начала эксплуатации до возникновения первого отказа. Наработка до отказа применяется в основном для ответственных, а также для невосстанавливаемых (неремонтируемых) объектов.

Наработка между отказами — наработка между отказами восстанавливаемых (ремонтируемых) объектов.

Время восстановления — продолжительность восстановления работоспособного состояния.

Ресурс — суммарная наработка объектов от начала его эксплуатации (или ее возобновления после ремонта) до перехода в предельное состояние. Существует ресурс до капитального ремонта, между капитальными ремонтами, а не только полный ресурс объекта до списания.

Срок службы — календарная продолжительность эксплуатации объекта до перехода в предельное состояние.

Срок сохраняемости — календарная продолжительность хранения и(или) транспортирования объекта, в течение которой сохраняются в заданных пределах значений параметров объекта, характеризующих способность выполнять заданные функции.

Остаточный ресурс — суммарная наработка объекта от момента контроля его технического состояния до перехода в предельное состояние.

Назначенный ресурс (срок службы, срок хранения) — суммарная наработка (срок службы), после которой эксплуатация (хранение) объекта прекращается. Данное понятие в основном применимо для особо ответственных с точки зрения техники безопасности объектов.

1.5.

ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБСЛУЖИВАНИЕ, РЕМОНТ

Обслуживаемый (необслуживаемый) объект — объект, проведение технического обслуживания которого предусмотрено (не предусмотрено) нормативно-технической документацией — НТД.

Восстанавливаемый (невосстанавливаемый) объект — объект, восстановление которого предусмотрено (не предусмотрено) НТД. Например, подшипники качения являются в основном невосстанавливаемыми объектами.

Ремонтируемый (неремонтируемый) объект — объект, восстановление которого предусмотрено (не предусмотрено) НТД после достижения предельного состояния. При наличии в агрегате невосстанавливаемых элементов, например в коробке передач — подшипников, резино-технических из-

делий, сам агрегат, в данном случае коробка передач, после достижения предельного состояния может быть восстановлен и, таким образом, является ремонтируемым объектом.

Диагностирование — процесс определения технического состояния объекта без его разборки путем сопоставления измеренных показателей с нормативными. Диагностирование является составляющей процессов технического обслуживания и ремонта.

Техническое обслуживание — комплекс профилактических организационно-технических мероприятий, направленных на поддержание объекта в исправном или работоспособном состоянии и обеспечение надежности, безопасности и экономичности работы; поддержание параметров технического состояния; предупреждение отказов и неисправностей, а также выявление их с целью своевременного устранения.

Ремонт — комплекс операций по восстановлению исправного или работоспособного состояния объекта.

1.6. ПОКАЗАТЕЛИ НАДЕЖНОСТИ

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

Единичный показатель надежности — показатель, характеризующий одно свойство надежности.

Комплексный показатель надежности — показатель, характеризующий несколько свойств надежности.

1.6.1. ЕДИНИЧНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ НАДЕЖНОСТИ

1.6.1.1. ПОКАЗАТЕЛИ БЕЗОТКАЗНОСТИ

Вероятность безотказной работы — вероятность того, что в пределах заданной наработки отказ объекта не возникнет.

Возникновение отказа — случайное событие. Наработка от начала эксплуатации до возникновения отказа —

случайная величина. Вероятность безотказной работы $P(t)$ объекта в интервале от 0 до t можно записать так:

$$P(t) = P\{\tau > t\}, \quad (1.1)$$

где $P\{\tau > t\}$ — вероятность того, что наработка до возникновения отказа превысит наработку t .

Вероятность безотказной работы с вероятностью отказа за конкретный период t , т. е. с функцией распределения наработки до отказа, $F(t)$ связана выражением, представляющим сумму вероятности несовместимых событий, образующих полное событие:

$$P(t) + F(t) = 1. \quad (1.2)$$

Зависимости вероятности безотказной работы $P(t)$ и вероятности отказа $F(t)$ объекта от величины его наработки представлены на рис. 1.1.

Дифференциальная функция распределения (плотность распределения) наработки до отказа $f(t)$ связана с основной (интегральной) функцией распределения известным выражением:

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = -\frac{dP(t)}{dt}. \quad (1.3)$$

Таким образом, вероятность безотказной работы может быть определена путем интегрирования плотности распределения:

$$P(t) = \int_t^{\infty} f(t) \cdot dt. \quad (1.4)$$

Вероятность отказа в интервале от 0 до t будет записана так

$$F(t) = \int_0^t f(t) \cdot dt. \quad (1.5)$$

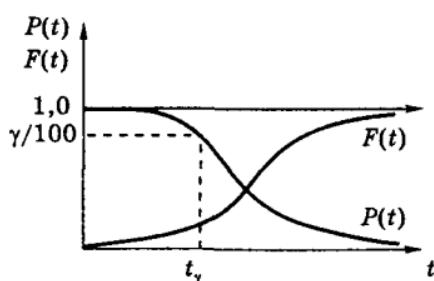


Рис. 1.1
Зависимости вероятности безотказной работы $P(t)$ и вероятности отказа $F(t)$ одного и того же объекта за одну и ту же наработку t

Точечную статистическую оценку для вероятности безотказной работы $P(t)$ от 0 до t можно определить по формуле

$$P(t) = 1 - \frac{n(t)}{N}, \quad (1.6)$$

где N — число объектов, работоспособных в начальный момент времени; $n(t)$ — число объектов, отказавших на отрезке от 0 до t .

Средняя наработка до отказа — математическое ожидание наработки до первого отказа. Данный показатель надежности применяется для ответственных, имеющих жесткие сроки гарантии до первого отказа, а также для невосстанавливаемых объектов.

Статистическая оценка средней наработки до отказа определяется по формуле

$$T_{\text{ср}} = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N \tau_i, \quad (1.7)$$

где τ_i — наработка до первого отказа i -го объекта, $i = 1, \dots, N$.

Гамма-процентная наработка до отказа — наработка, в течение которой отказ объекта не возникает с вероятностью γ , выраженной в процентах:

$$P(t_\gamma) = \int_{\gamma}^{\infty} f(t) \cdot dt = 1 - \int_0^{t_\gamma} f(t) \cdot dt = 1 - F(t_\gamma). \quad (1.8)$$

Геометрическая иллюстрация зависимости (1.8) приведена на рис. 1.1. При $\gamma = 80\%$ и $t_{80\%} = 500$ моточасов подразумевается, что не менее 80% эксплуатируемых испытываемых объектов будут иметь наработку до первого отказа не менее 500 моточасов.

Гамма-процентная наработка до отказа назначается для того, чтобы предусмотренная НТД средняя наработка до отказа достигалась не за счет высоких показателей по наработке отдельных (малочисленных) объектов выборки, а за счет основного числа ($\gamma = 80\%; \gamma = 90\%$) объектов, имеющих наработку до первого отказа не менее установленного нормативно-технической документацией t_γ .

Средняя наработка на отказ — отношение суммарной наработки восстанавливаемого объекта к математическому ожиданию числа его отказов в течение этой наработки:

$$T = \frac{t}{M\{r(t)\}}, \quad (1.9)$$

где t — суммарная наработка; $M\{r(t)\}$ — математическое ожидание числа отказов, в течение наработки t .

Интенсивность отказов — это вероятность отказа в достаточно малую единицу времени. Интенсивность отказов (условная плотность вероятности возникновения отказа невосстанавливаемого объекта, определяемая для данного момента времени при условии, что отказа до этого момента не было) статистически определяется как отношение числа объектов, отказавших $n_{\text{отк}}$ в единицу времени (достаточно малый промежуток времени Δt), к числу объектов, работоспособных в данный момент $n_p(t)$:

$$\lambda(t) = \frac{n_{\text{отк}}}{\Delta t} \cdot \frac{1}{n_p(t)}. \quad (1.10)$$

Разделив первый множитель и умножив второй на общее число объектов N , получим

$$\lambda(t) = \frac{n_{\text{отк}}}{\Delta t \cdot N} \cdot \frac{1 \cdot N}{n_p(t)}. \quad (1.11)$$

Отношение числа отказавших объектов за единицу времени к общему числу объектов — это плотность вероятности отказа $f(t)$, а так как вероятность безотказной $P(t)$ работы статистически определяется как отношение числа работоспособных объектов в момент времени t к общему числу объектов, то мы получаем окончательную формулу для интенсивности отказов

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{P(t)} = \frac{f(t)}{1 - F(t)}. \quad (1.12)$$

Учитывая формулу (1.3) из выражения (1.12) получаем

$$\lambda(t) = -\frac{dP(t)}{dt} \cdot \frac{1}{P(t)}, \quad (1.13)$$

откуда выразим $P(t)$ путем интегрирования

$$\int_0^t \frac{dP(t)}{P(t)} = - \int_0^t \lambda(t) dt, \quad \ln P(t) = - \int_0^t \lambda(t) dt$$

и

$$P(t) = \exp \left(- \int_0^t \lambda(t) dt \right). \quad (1.14)$$

Эта универсальная формула определения вероятности безотказной работы невосстанавливаемого элемента для любого закона распределения. Зная интенсивность отказов, можно для любого момента времени или пробега определить вероятность безотказной работы и наоборот.

Параметр потока отказов — отношение математического ожидания числа отказов восстанавливаемого объекта за достаточно малую наработку к ее значению.

Установившееся (стационарное) значение параметра потока отказов можно определить по формуле

$$\omega(t) = \lim_{t \rightarrow \infty} \omega(t) = \frac{1}{T}, \quad (1.15)$$

где T — средняя наработка на отказ.

Осредненный параметр потока отказов — отношение математического ожидания числа отказов восстанавливаемого объекта за конечную наработку к ее значению.

Если наработка между отказами имеет показательное (экспоненциальное) распределение $f(t) = \lambda \cdot \exp(-\lambda t)$, то $\omega = \lambda = \text{const.}$

1.6.1.2. ПОКАЗАТЕЛИ ДОЛГОВЕЧНОСТИ

Гамма-процентный ресурс — суммарная наработка, в течение которой объект не достигает предельного состояния с вероятностью γ , выраженной в процентах.

Гамма-процентный ресурс — $T_{p\gamma}$ назначается с целью ограничения минимальной наработки, которую основная часть объектов (гамма-процентов: $\gamma = 80\%$; $\gamma = 90\%$; $\gamma = 95\%$ и т. д.) должна отрабатывать до перехода в предельное состояние. Гамма-процентный ресурс количественно меньше

среднего при $\gamma > 50\%$. Отношение величины среднего ресурса к величине 80%-ного ресурса транспортных, сельскохозяйственных и лесных машин при нормальном распределении ресурса примерно равно 1,5, при законе Вейбулла — 2, а при экспоненциальном распределении колеблется от 4 до 6.

Средний ресурс — математическое ожидание ресурса — T_p .

Медианный ресурс — ресурс при $\gamma = 50\%$.

Средний срок службы ($T_{сл}$) — математическое ожидание ресурса, выраженное календарным временем эксплуатации объекта с учетом сменности работы, продолжительности всех видов ремонта и технического обслуживания.

Иногда применяется такой показатель долговечности, как гамма-процентный срок службы ($T_{слy}$).

При рассмотрении всех видов ресурсов необходимо учитывать характер объекта. Например, если объект ремонтируемый, т. е. предполагается капитальный ремонт, восстанавливающий его работоспособное состояние после наступления предельного, то все вышеуказанные понятия ресурсов дополняются словами «до капитального ремонта».

Если в результате наступления предельного состояния объекта он согласно нормативно-технической документации является не ремонтируемым или ремонтируемым, но больше эксплуатироваться не будет, то показатели долговечности называются полными (полный средний ресурс, полный гамма-процентный ресурс и т. п.).

1.6.1.3. ПОКАЗАТЕЛИ РЕМОНТОПРИГОДНОСТИ

Вероятность восстановления работоспособного состояния — вероятность того, что время восстановления работоспособного состояния объекта не превысит заданное значение — $P_b(t)$.

Среднее время восстановления работоспособности состояния — математическое ожидание времени восстановления работоспособного состояния объекта после отказа — T_b .

Гамма-процентное время восстановления — время восстановления, в течение которого объект будет восстановлен с вероятностью γ , выраженной в процентах — $T_{\text{вн}}$.

Средняя трудоемкость восстановления — математическое ожидание трудоемкости восстановления объекта после отказа — $S_{\text{вн}}$.

Средняя трудоемкость операций технического обслуживания — математическое ожидание трудоемкости операций технического обслуживания — $S_{\text{то}}$.

При оценке ремонтопригодности машин и оборудования могут применяться такие показатели, как интенсивность восстановления, удельная суммарная трудоемкость текущих ремонтов и удельная суммарная трудоемкость операций технического обслуживания (например, за 100 моточасов наработка за год эксплуатации и т. п.).

1.6.1.4. ПОКАЗАТЕЛИ СОХРАНЯЕМОСТИ

Средний срок сохраняемости — математическое ожидание срока сохраняемости — T_c .

Наряду со средним сроком сохраняемости применяется такой показатель, как гамма-процентный срок сохраняемости — $T_{\text{с}y}$.

1.6.2. КОМПЛЕКСНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ НАДЕЖНОСТИ

В некоторых случаях весьма информативными являются комплексные показатели надежности, позволяющие оценить сразу несколько свойств, характеризующих надежность.

Для комплексной оценки надежности лесных и сельскохозяйственных машин чаще всего применяются такие показатели, как коэффициент готовности и коэффициент технического использования, отражающие как безотказность, так и ремонтопригодность объекта.

Коэффициент готовности (K_r) — вероятность того, что объект окажется в работоспособном состоянии в произвольный момент времени кроме планируемых периодов, в течение которых использование объекта по назначению не предусматривается.

Величина K_r с учетом изменения состояния объекта за весь период эксплуатации является функцией вероятности работоспособного состояния $\Gamma(t)$, которая с увеличением наработки (срока службы) объекта уменьшается, приближаясь с течением времени к своему постоянному значению, каким и является K_r (рис. 1.2).

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \Gamma(t) \approx K_r = \frac{T}{T + T_B} \quad \text{или} \quad K_r = \frac{\sum t_i}{\sum t_i + \sum t_{bi}}, \quad (1.16)$$

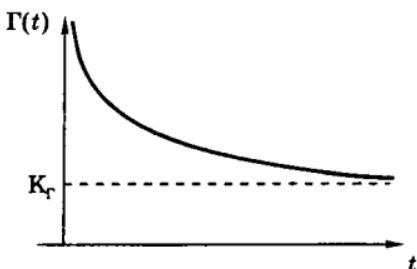


Рис. 1.2

Зависимость функции вероятности работоспособного состояния $\Gamma(t)$ от времени

где T — средняя наработка на отказ; T_B — среднее время восстановления; $\sum t_i$ — суммарная наработка (в часах) всех объектов за рассматриваемый период; $\sum t_{bi}$ — суммарная продолжительность ремонтных работ (в часах) за тот же период.

Иначе говоря, коэффициент готовности можно понимать как долю времени, в течение которого машина работоспособна, от рассматриваемого периода ее эксплуатации.

Коэффициент технического использования ($K_{ти}$) — отношение математического ожидания суммарного времени пребывания объекта в работоспособном состоянии за некоторый период эксплуатации к математическому ожиданию суммарного времени пребывания объекта в работоспособном состоянии и простоях, обусловленных техническим обслуживанием и ремонтом, за тот же период эксплуатации:

$$K_{ти} = \frac{\sum t_i}{\sum t_i + \sum t_{pi} + \sum t_{TOi}}, \quad (1.17)$$

где $\sum t_{TOi}$ — суммарные простоя во всех видах технического обслуживания за рассматриваемый период эксплуатации.

Кроме указанных основных комплексных показателей надежности, могут применяться и такие, как коэффициент сохранения эффективности, коэффициент оперативной готовности.

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ НАДЕЖНОСТИ. ПРИЧИНЫ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ОТКАЗОВ

2.1. ОБЪЕКТИВНЫЕ И СУБЪЕКТИВНЫЕ ПРИЧИНЫ ОТКАЗОВ

Причины возникновения отказов машин и оборудования происходят по объективным и субъективным причинам.

Субъективные причины подразделяются на конструктивные, производственные и эксплуатационные, приведенные в подразделе 1.3 пособия.

Объективные причины включают как раздельное, так и одновременное совместное действие физического, химического и других полей, объективно существующих в природе.

Таким образом, по объективным причинам, которые могут быть ослаблены или усилены субъективными (человеческим фактором), детали машин и оборудования разрушаются в основном:

1. Под действием несущих нагрузок, температуры и скоростей — параметров физического поля, т. е. факторов P , V , T (сила — давление, скорость, температура).

2. От воздействия кислотной или щелочной среды (химического поля).

3. Вследствие совместного действия физического и химического полей.

Помимо указанных основных причин, разрушение элементов конструкций может происходить под воздействием радиационного окрупчивания, старения, воздействия микроорганизмов

и т. д. В соответствии с нормативно-технической документацией оценка показателей надежности объектов осуществляется на основании числа отказов, произошедших из-за конструктивных и производственных причин, доля которых, например, для лесозаготовительных машин составляет соответственно 20–25% и 45–50%. Эксплуатационные отказы, доля которых для тех же лесозаготовительных машин составляет 25–39%, при оценке надежности объектов не учитываются, так как они не обусловлены конструктивными и технологическими факторами их производства.

При оценке надежности не учитываются также зависимые отказы и отказы, возникшие после исчерпания установленного ресурса объекта, т. е. отказы, возникшие из-за длительности эксплуатации и обусловленные в основном вышеупомянутыми объективными причинами. Не учитываются отказы, устраниемые проведением операций очередного или внеочередного технического обслуживания.

Отказы могут быть случайными (единичными) и систематическими (массовыми). Систематический отказ — многократно повторяющийся на большей части эксплуатируемых объектов, однородный по определенным признакам, обусловленный в основном одними и теми же причинами конструктивного или производственного характера, возникающий при определенной наработке объекта. Например, временная замена материала катков трелевочной машины на материал с худшими характеристиками может привести к преждевременному износу катков на всех машинах при одинаковой наработке, т. е. к массовым отказам.

Систематические отказы в основном подчиняются нормальному распределению или распределению Вейбулла.

Единичные отказы происходят по широкому спектру причин, связанных в том числе, например, и с качеством проката, из которого изготовлен объект. Примером единичного отказа может быть поломка одного распределительного вала двигателя из двадцати наблюдаемых объектов за наработку 5 тыс. моточасов.

Единичные отказы в большинстве своем подчиняются экспоненциальному закону распределения с коэффициентом вариации средней наработки до отказа (на отказ), близком к единице. Для определения характеристик данного закона требуются длительные испытания большого числа объектов в связи с существенным рассеиванием отказов как по объектам, так и по наработке.

По последствиям отказы можно разделить на параметрические и отказы функционирования. Параметрический отказ характеризуется выходом параметров объекта за допустимые пределы (например, снижение мощности двигателя или производительности шестеренного насоса более чем на 15% от номинальной). Отказ функционирования приводит к прекращению выполнения объектом своих функций (например, поломка вала, зубьев шестерен).

В зависимости от трудоемкости устранения отказы делятся на три группы сложности. К первой относятся отказы, устраниемые восстановлением или заменой недорогих и нематериоемких деталей, расположенных снаружи сборочных единиц и агрегатов, без разборки последних. Продолжительность устранения отказов первой группы сложности лесозаготовительных машин не превышает одного календарного часа. Примером может служить замена электролампочки.

Ко второй группе сложности относятся отказы, устраниемые восстановлением или заменой легкодоступных деталей, сборочных единиц, устранение которых может потребовать вскрытия внутренних полостей агрегатов. Устранение отказов второй группы сложности может потребовать до четырех часов календарного времени и предусматривает замену не самых дорогих и металлоемких элементов объекта. Примером может служить замена ленты гусеницы в сборе.

Для устранения отказов третьей группы сложности требуется снятие и разборка основных агрегатов с продолжительностью ремонта до восьми и более часов календарного времени. Примером может служить замена цилиндропоршневой группы двигателя внутреннего сгорания.

Отказы в соответствии со всей физической природой (объективными причинами) бывают связаны с деформацией и механическим разрушением материалов, тепловым разрушением, изнашиванием поверхностей деталей, коррозионным, электроэрозионным, радиационным разрушением, потерей приданых служебных, например, упругих или магнитных свойств и другими физическими и химическими явлениями.

Невосстанавливаемые объекты после первого отказа дальнейшей эксплуатации не подлежат и списываются. Восстанавливаемые объекты до наступления предельного состояния при наличии отказов восстанавливаются и вновь поступают в эксплуатацию. Например, до наступления предельного состояния стрелы манипулятора, т. е. до появления трещины в $1/3$ периметра поперечного сечения, она может иметь малые (до 20 мм) трещины и многократно завариваться.

Как уже отмечалось, электрическая лампочка фары не является восстанавливаемым и ремонтируемым изделием, но сама фара является восстанавливаемым объектом путем замены составляющих ее элементов, например той же перегоревшей электролампочки. Вал коробки передач в случае износа мест под подшипники качения является восстанавливаемым объектом путем наплавки соответствующего слоя металла взамен изношенного, а в случае излома — невосстанавливаемым (неремонтируемым).

Таким образом, отказы существуют устранимые и неустранимые. Поломка вала коробки передач является устранимым для сборочной единицы — коробки передач путем ее восстановления через замену сломанного вала на новый.

Физическое поле, представляющее совокупность температуры (T), скорости (V) и нагрузки (P), бывает стационарным и изменяющимся во времени. Существует множество видов физического поля, разрушающих конструкцию объекта при том или ином сочетании характеризующих поле параметров. Основные виды физического поля: силовое (механическое), тепловое, электрическое, магнитное, звуковое, световое и др.

Разрушающее действие объективно существующего в природе физического поля может быть замедлено (или, наоборот, усилено) грамотными (или, наоборот, неопытными) действиями как конструктора, технолога, так и производственника, изготавливающего изделие в металле или использующего изделие в рядовой эксплуатации.

Объективно действующие процессы разрушения и изнашивания элементов объекта могут быть заторможены специалистами заводов-изготовителей техники и специалистами предприятий, ее эксплуатирующих, при соответствующем знании ими теории надежности и соблюдении правил проектирования, изготовления, эксплуатации.

2.2. ПРИРОДА ВНЕШНЕГО ТРЕНИЯ ТВЕРДЫХ ТЕЛ

Причина износа деталей машин — внешнее трение, которое можно трактовать как сопротивление; т. е. внешнее трение есть явление сопротивления относительному перемещению, возникающему между двумя телами в зонах соприкосновения их поверхностей. Причина трения — действие физического и химического полей.

Основная характеристика внешнего трения — сила трения. Сила трения скольжения, как известно, обусловлена двумя основными параметрами:

$$F_{\text{ск}} = f \cdot P, \quad (2.1)$$

где $F_{\text{ск}}$ — сила трения скольжения; f — коэффициент трения скольжения; P — нормальная к плоскости трения нагрузка.

Сила сухого трения качения ($F_{\text{кач}}$) шара или цилиндра (по закону Кулона) определяется следующими параметрами:

$$F_{\text{кач}} = f_k \cdot \frac{P}{r}, \quad (2.2)$$

где f_k — коэффициент трения качения; r — радиус качения.

Сила трения (F) по адгезионно-деформационной теории И. В. Крагельского зависит от факторов механического и молекулярного присхождения:

$$F = \tau_{\text{мех}} + \tau_{\text{мол}} = \alpha \cdot S_{\phi} + \beta \cdot P, \quad (2.3)$$

где $\tau_{\text{мех}}$, $\tau_{\text{мол}}$ — силы соответственно механического и молекулярного происхождения; S_{ϕ} — площадь трущихся поверхностей; α , β — коэффициенты, определяемые опытным путем.

Величина силы трения зависит от вида трения, которое может быть сухим, полужидкостным (полусухим) и жидкостным.

Сила трения при жидкостном трении согласно теории Н. Н. Петрова зависит от следующих факторов:

$$F = \frac{\eta \cdot S \cdot v}{h}, \quad (2.4)$$

где η — динамическая вязкость масла; S — площадь поверхности, скользящих одна относительно другой; v — относительная скорость перемещения трущихся поверхностей; h — толщина масляного слоя.

Сила трения качения меньше силы трения скольжения, так же как сила сухого трения выше, чем жидкостного. Поэтому при проектировании машин предпочтительнее предусматривать подшипники качения вместо подшипников скольжения и обеспечивать при их эксплуатации жидкостное трение.

Наивыгоднейший зазор ($S_{\text{наивыг}}$) между валом и втулкой, исходя из минимальной силы трения в слое смазки, находящейся между сопрягаемыми деталями, обусловлен следующими параметрами:

$$S_{\text{наивыг}} = D - d = 0,46 \cdot d \cdot \sqrt{\frac{n \cdot \eta}{p \cdot c}}, \quad (2.5)$$

где D — внутренний диаметр втулки; d — диаметр вала; n — число оборотов вращения вала в секунду; η — динамическая вязкость жидкости; p — давление в слое жидкости; c — геометрический параметр сопряжения.

$$c = \frac{d - l}{l}, \quad (2.6)$$

где l — длина подшипника.

Обеспечение наивыгоднейшего зазора, т. е. минимального слоя смазки между трущимися поверхностями кон-

структуром и последующее обеспечение необходимого уровня смазки при эксплуатации машины, гарантирует высокую надежность сопряжения в течение всего расчетного срока его службы.

Рассмотрим три теоретических положения, характеризующих природу сил трения.

I. Сила внешнего трения имеет тройственную механо-физико-химическую природу, т. е.:

$$F = \gamma_1 \cdot F_m + \gamma_2 \cdot F_d + \gamma_3 \cdot F_a, \quad (2.7)$$

где F — суммарная сила трения; F_m , F_d , F_a — составляющие, учитывающие механическую и физическую природу процесса трения (механическое взаимодействие шероховатостей поверхностей, деформацию поверхностного слоя, атомное взаимодействие поверхностей); γ_1 , γ_2 , γ_3 — коэффициенты, учитывающие химическую природу процесса.

II. Работа сил трения (A) расходуется на образование теплоты и поглощение энергии, т. е.:

$$A = Q + \Delta E, \quad (2.8)$$

где Q — работа, перешедшая в теплоту; ΔE — количество энергии, поглощенной поверхностными слоями труящихся деталей.

На основании двух первых положений теории внешнего трения твердых тел можно записать следующее уравнение износа:

$$I = \int_0^t \varphi(M, B, H, C, t) dt, \quad (2.9)$$

где I — износ детали; M — материал со всеми его свойствами; B — характер взаимодействия поверхностей, учитывающий род и вид трения; H — нагрузка (статическая, динамическая); C — химическое поле (среда); t — время изнашивания; dt — приращение времени процесса изнашивания.

III. Третье теоретическое положение (об установившемся процессе трения) гласит: в результате установившегося (нормального) трения происходит изнашивание

детали и динамическое саморегулирование образования и разрушения вторичных структур.

Существует область режима трения, в которой интеграл отношения запасенной энергии (ΔE) к работе сил трения (A) по деформируемому объему (dV) принимает минимальное значение:

$$\int_V \frac{\Delta E}{A} dV = \min, \quad (2.10)$$

где V — объем, воспринимающий нагружение трением.

Таким образом, при заданных конструкцией характере взаимодействия деталей сопряжения, режиме трения и свойствах химического поля можно путем подбора материала и его обработки обеспечить установившийся нормальный (не аварийный) износ деталей, благодаря чему значительно повысить надежность техники.

2.3. ВИДЫ И ЗАКОНОМЕРНОСТИ ИЗНАШИВАНИЯ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

Изнашивание — процесс разрушения и отделения материала с поверхности твердого тела и(или) накопления его остаточной деформации при трении, проявляющийся в постоянном изменении размеров и(или) формы тела.

Процесс изнашивания зависит от материала и качества обработки поверхностей, смазки, нагрузки, скорости относительного перемещения поверхностей и теплового режима работы сопряжения. Процесс изнашивания количественно характеризуется двумя параметрами: износ; интенсивность изнашивания.

Износ деталей — результат их изнашивания, определяемый в установленных единицах (в единицах длины, объема, массы и др.), проявляющийся в виде отделения и (или) остаточной деформации материала.

Интенсивность изнашивания — это относительные величины износа (отношение износа ко времени, в течение которого происходил износ или пути трения).

Поверхности сопряженных деталей имеют определенную шероховатость, т. е. обладают микронеровностями. При трении возникает взаимодействие — срезание и смятие отдельных микронеровностей трущихся поверхностей между собой и с абразивными частицами, попавшими в смазку. Разрушение микронеровностей приводит к изменениям параметров шероховатости, размеров и формы деталей.

В результате многократного упругого деформирования микронеровностей возникают поверхностные усталостные трещины и происходит выкрашивание поверхности. Взаимодействие микронеровностей при больших давлениях и скоростях вызывает локальный нагрев с последующим изменением структуры металла, повышением его хрупкости, может приводить к термическим трещинам и даже к расплавлению. Одновременно происходит молекулярное взаимодействие поверхностей отдельных участков контактирующих микронеровностей и перенос частиц металла с одной поверхности на другую.

Износ сопряженных деталей увеличивается в течение всего времени эксплуатации машин и оборудования, но интенсивность изнашивания различна на разных этапах работы.

Процесс изнашивания сопряженных деталей графически может быть представлен кривой изнашивания (кривая Лоренца на рис. 2.1).

Величина износа деталей увеличивается в течение всего времени работы до предельного состояния, но интенсивность изнашивания $V(t)$ различна на разных этапах работы. Поверхности деталей после изготовления имеют определенную шероховатость (микронеровности) и макронеровности формы, образовавшиеся при изготовлении и сборке (конусности, овальности неплоскости и т. д.). Фактическая площадь контакта трущихся деталей в начальный период мала, поэтому происходит интенсивный износ деталей — этап приработки $0t_1$.

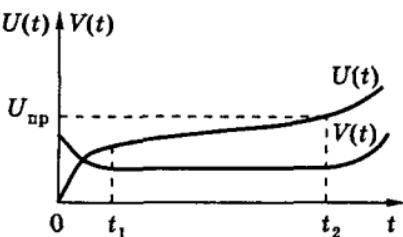


Рис. 2.1
Кривая изнашивания

(рис. 2.1). Приработка — это процесс изменения геометрии и шероховатости поверхностей трения, физико-механических свойств поверхностных слоев материала, сопровождается повышенной температурой и интенсивностью изнашивания. В конце этапа приработки на поверхности контактирующих деталей образуется равновесная шероховатость, обеспечивающая наилучшие условия для последующей работы сопряженных деталей на этапе нормальной эксплуатации $t_1 - t_2$. Уменьшение приработочных износов достигается работой деталей в облегченных нагрузочных и скоростных режимах, применением специальных эксплуатационных режимов. В окрестности точки t_1 чаще встречаются внезапные отказы.

Период нормальной эксплуатации (рис. 2.1) характеризуется постоянной скоростью изнашивания $V(t)$ и линейно-возрастающей прямой или близкой к ней кривой износа $U(t)$. Этот период характеризуется стабильностью рабочих процессов, при котором происходят постепенное изменение размеров и форм деталей и увеличение зазоров.

Это приводит к ухудшению условий смазывания, повышению динамических, ударных нагрузок; неточностям в зацеплении зубчатых передач, разрушению специально обработанных износостойких поверхностных слоев. В результате интенсивность изнашивания повышается, что приводит к периоду аварийного изнашивания после момента времени t_2 (рис. 2.1). С целью исключения полного разрушения детали и всего сопряжения устанавливают величину предельного износа $U_{\text{пр}}$, соответствующую предельному состоянию.

Знание физических основ процессов изменения технического состояния лесных машин и оборудования важно как для совершенствования их конструкции, так и для выбора наиболее эффективных мероприятий по предупреждению отказов при эксплуатации.

Изнашивание можно разделить на четыре группы:

1. Механическое изнашивание является результатом механических действий и включает резание, царапание, деформирование, отслаивание и выкрашивание микрообъ-

емов материала. Основными видами механического изнашивания являются:

а) *абразивное изнашивание* — механическое изнашивание материала, происходящее в результате режущего и царапающего действия на него твердых частиц, находящихся в свободном или закрепленном состоянии. (Подвержены звенья гусениц, лемехи и т. д.);

б) *гидроабразивное изнашивание*, происходящее под действием твердых частиц, взвешенных в жидкости и перемещающихся относительно изнашивающейся детали, ему подвержены водяные, топливные и масляные каналы, а также детали, смазываемые под давлением. При этом абразивными частицами являются не только частицы песка и других соединений, попадающие на трещущиеся поверхности снаружи, но и частицы нагара и продукты износа, образующиеся внутри деталей машин и оборудования;

в) *газоабразивное изнашивание*, возникающее под воздействием частиц, взвешенных в газе. Этому виду изнашивания подвержены впускные и выпускные системы двигателей внутреннего сгорания. Наибольший износ трещущихся поверхностей деталей машин и оборудования вызывают частицы песка, поэтому обеспечение чистоты воздуха и эксплуатационных жидкостей, поступающих во внутренние полости агрегатов, является важным методом уменьшения интенсивности абразивного изнашивания;

г) *усталостное изнашивание* — механическое изнашивание в результате усталостного разрушения поверхности при многократном деформировании микрообъемов материала поверхностного слоя детали, которому чаще всего подвержены подшипники, рабочие поверхности зубьев шестерен и тому подобные объекты. Усталостное изнашивание проявляется в виде выкрашивания — отделения частиц материала, приводящего к образованию ямок на поверхности трения. На развитие питтинга большое влияние оказывает расклинивающее действие масла, заключающееся в разрушении поверхностных слоев высоким давлением масла при затекании его в микротрешины;

д) кавитационное изнашивание — гидроэрозийное изнашивание при движении твердого тела относительно жидкости, во время которого пузырьки газа разрываются вблизи поверхности, что создает местное повышение давления и температуры, образуя язвы. Разрушение кавитационных пузырьков сопровождается гидравлическими ударами по поверхности детали и образованием полостей. Примером кавитационного изнашивания являются язвы, наблюдаемые на наружных поверхностях гильз цилиндров двигателя, на полостях водяных насосов;

е) эрозионное изнашивание включает в себя гидро- и газоэрзационное изнашивание, которые вызывают разрушение поверхности металла в результате воздействия потока жидкости (газа) на такие детали, как шлицы вторичного вала коробки передач, выпускной клапан двигателя внутреннего сгорания и т. д. Они представляют собой процесс отделения от поверхности и вымывания отдельных микрообъемов материала.

2. Молекулярно-механическое или изнашивание при заедании — это изнашивание в результате схватывания, глубинного вырывания металла, происходящее вследствие действия молекулярных сил, которому подвергаются детали типа осей балансиров, втулок колес плуга, шарниры и т. д. Изнашивание при схватывании рабочих поверхностей определяется свойствами материалов трущихся деталей и зависит от скорости скольжения поверхностей, а также от температуры. Схватывание рабочих поверхностей может вызывать их задир — повреждение поверхностей трения в виде широких и глубоких борозд в направлении скольжения.

3. Изнашивание при действии электрического тока происходит при замыкании (размыкании) электрических контактов, при котором частицы материала контактов вырываются под воздействием электрической дуги. Он включает в себя один вид изнашивания — электроэрзационное изнашивание, во время которого происходит воздействие разрядов на контакты прерывателя, коллектор и щетки электроагрегатов и т. д.

4. Коррозионно-механическое изнашивание является результатом механического воздействия, сопровождаемого химическим или электрическим взаимодействием материала с окружающей средой, и подразделяется на:

а) *окислительное изнашивание* — коррозийно-механическое, которому подвергаются пальцы поршней, шейки коленчатых валов. При окислительном изнашивании кислород воздуха или растворенный в масле образует на металле окисную пленку, которая механически удаляется при трении. Пластическая деформация поверхностных слоев усиливает процесс окисления;

б) *водородное изнашивание* — разрушение поверхностного слоя вследствие расширения (взрыва) поглощенного металлом водорода таких деталей, как гильзы цилиндров, тормозные барабаны и т. д.;

в) *изнашивание при фреттинг-процессе* — это коррозионно-механическое или механическое разрушение соприкасающихся тел при малых колебательных относительных

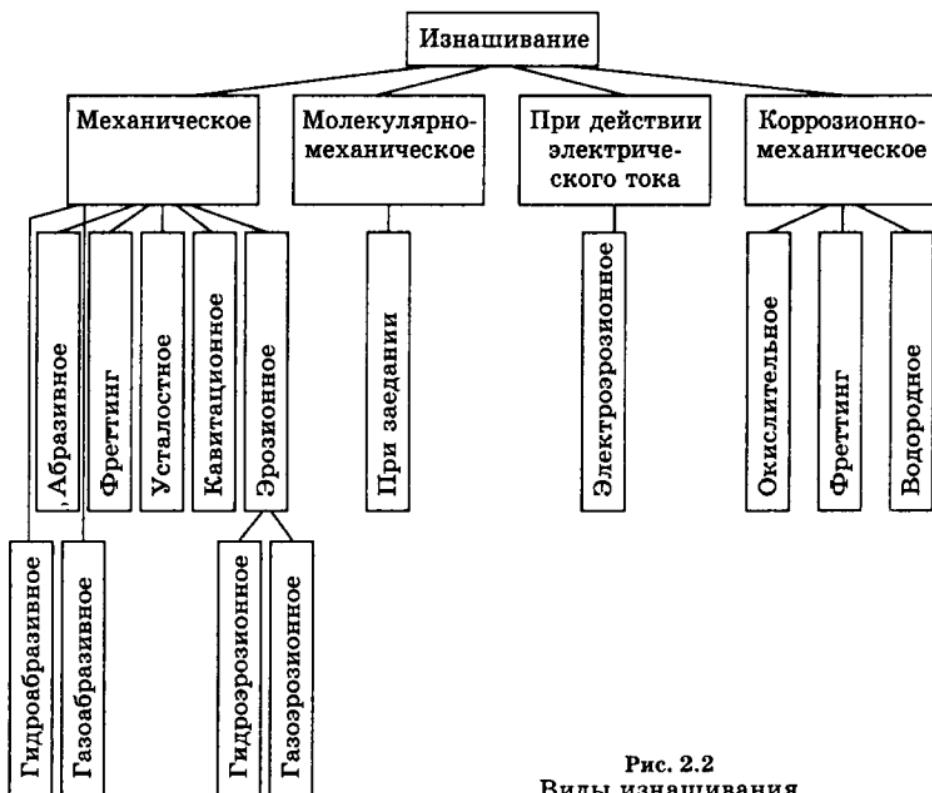


Рис. 2.2
Виды изнашивания

перемещениях, например отверстий картера под подшипники коробки передач, шлицев вторичного вала и др.

Все описанные выше виды изнашивания схематично представлены на рис. 2.2.

Про эрозию металлов надо сказать отдельно: она является комплексным физическим и физико-химическим процессом (*erosio* — разъедание), протекающим в результате окисления, наклепа, температурных напряжений, хрупкого и усталостного разрушения.

Повышение сопротивления деталей эрозии решается подбором высокотвердых тугоплавких и достаточно пластичных материалов, иногда армированием.

Фундаментальные закономерности абразивного изнашивания (предложенные М. М. Хрущевым) следующие:

1. Значение износа при постоянных условиях прямо пропорционально пути трения.

2. Износ при прочих постоянных условиях не зависит от скорости трения, т. е. скорость изнашивания прямо пропорциональна скорости трения:

$$\frac{dh}{dt} = C \cdot P \cdot v, \quad (2.11)$$

где h — значение износа; t — время; C — коэффициент пропорциональности; P — нагрузка; v — скорость трения.

3. Значение скорости (интенсивности) изнашивания при прочих постоянных условиях прямо пропорционально значению нормальной нагрузки P , т. е.:

$$\frac{dh}{ds} = C \cdot P, \quad (2.12)$$

где s — длина пути трения.

4. Для конструкционных и некоторых инструментальных углеродистых и легированных сталей, испытанных в состоянии после закалки и отпуска, относительная износстойкость возрастает линейно с увеличением твердости и выражается следующими факторами (параметрами):

$$\varepsilon = \varepsilon_0 + b' \cdot (H - H_0), \quad (2.13)$$

где ε_0 — относительная износстойкость стали в отожженном состоянии; b' — коэффициент, зависящий от хими-

ческого состава стали; H — твердость стали; H_0 — твердость стали в отожженном состоянии.

5. Относительная износстойкость механически наклеенных металлов и сталей не зависит от твердости, определенной после наклена.

Механо-физико-химическое изнашивание (как и окислительное по Б. И. Костецкому) включает следующие фазы процесса:

1. Непосредственный механический контакт труящихся поверхностей с образованием деформированного слоя.

2. Химическая реакция активного слоя металла с активными элементами среды с образованием ослабленных вторичных структур, толщина которых в пределах 0,01–0,02 мкм.

3. Разрушение вторичных структур последующими механическими воздействиями.

Предельного износа деталь достигнет, если она накопит m разрушений вторичных структур. Число актов m разрушений пленки будет

$$m = \frac{U_{\text{пр}}}{M_{ni}}, \quad (2.14)$$

где $U_{\text{пр}}$ — предельный износ детали; M_{ni} — математическое ожидание толщины пленки вторичных структур.

Если в какой-то момент времени t_p от начала работы детали пленка вторичных структур не была разрушена, то это означает, что ее время существования больше или равно времени t_p .

Вероятность того, что время существования пленки больше времени t_p , будет

$$P(t_p) = 1 - \Phi\left(\frac{T_p - C}{\sigma}\right), \quad (2.15)$$

где $\Phi(T_p - C/\sigma)$ — функция Лапласа; T_p — наработка детали до предельного состояния $\left(T_p = \sum_{j=1}^m t_{pj} \right)$; C, σ — соответственно математическое ожидание и среднее квадра-

тическое отклонение наработки детали при механо-физико-химическом изнашивании.

Если за время t_i деталь накопит j разрушений пленки вторичных структур, будем считать, что она находится в состоянии $i(j)$.

2.4.

ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ФОРМИРОВАНИЯ ИЗНОСОСТОЙКИХ СТРУКТУР ДЕТАЛЕЙ МАШИН

Основные способы создания износостойких структур деталей машин можно сформулировать в следующей последовательности:

1. Создание объемной бездефектной структуры, т. е. создание нитевидных кристаллов.
2. Измельчение зерна материала до размеров 0,1...0,01 мкм.
3. Повышение плотности дефектов кристаллического строения материала до значений $10^{11}...10^{13}$ см $^{-2}$.
4. Измельчение зерна и равномерное распределение несовершенств кристаллического строения и, прежде всего, дислокаций.
5. Применение самосмазывающихся композитов из системы «металл–полимер».
6. Применение дисперсно-упрочненных композитов.
7. Перевод поверхностного слоя с решетчатого (кристаллического) строения в аморфное.
8. Плакирование поверхностей трения конденсированным слоем интерметаллидных соединений.
9. Плакирование поверхностей трения бездефектными структурами.
10. Получение поверхностного слоя с принципиально новым строением, с изменением геометрии и плотности упаковки атомов и их связи в решетке металла.

Основная причина потери работоспособности машин — эрозия (износ и коррозия) деталей, которую можно снизить, упрочнив поверхность трения и повысив объемную прочность металла. Большую помощь здесь могут оказать нанотехнологии, интенсивно развивающиеся в настоящее время.

РАЗРУШЕНИЕ ПРИ ДЕЙСТВИИ ОДНОКРАТНОЙ НАГРУЗКИ

При однократном приложении постоянно возрастающей нагрузки разрушение материалов может в зависимости от степени пластической деформации быть хрупким, квазихрупким и вязким.

Пластические деформации (изгиб, коробление, скручивание, растяжение и т. д.) возникают под воздействием сил, вызывающих напряжения более пределов упругости и текучести материала объекта.

Хрупкое разрушение происходит в результате распространения магистральной трещины после макроскопически незначительной пластической деформации, сосредоточенной в приповерхностной зоне трещины.

При квазихрупком разрушении существуют пластическая зона перед фронтом трещины и пластически деформированный материал у поверхности трещины. Остальной, значительно больший по величине, объем тела находится в упругом состоянии.

Вязкое разрушение происходит после существенной пластической деформации, протекающей по всему или почти по всему объему тела.

Иногда выделяют еще квазивязкое разрушение, занимающее промежуточное положение между вязким и квазихрупким.

Различие в поведении пластичных и хрупких материалов под нагрузкой весьма существенно. Пластическая деформация предохраняет материал при перегрузке от разрушения. Материалы в хрупком состоянии обладают очень малой энергоемкостью и поэтому плохо сопротивляются действию динамических нагрузок. Они также плохо сопротивляются растягивающим нагрузкам и весьма чувствительны к конструктивным концентриаторам напряжения и дефектам.

Хрупкое и вязкое разрушения в изломе выглядят по-разному. Полностью хрупкий разрыв распространяется в кристаллических телах вдоль кристаллографических плоскостей и дает гладкую поверхность излома, состоящую из

плоских граней расколотых кристаллитов. Образуются так называемые кристаллические фасетки, характеризующиеся металлическим блеском. Такой вид разрушения часто называют «скол» или «отрыв». В месте отрыва заметной остаточной деформации металла не наблюдается. Отрыв вызывается действием нормальных напряжений.

Вязкое разрушение сопровождается пластической деформацией. При пластическом разрыве кроме нормальных напряжений в разрушении участвуют и касательные, так как пластическая деформация вызывается действием только касательных напряжений.

Излом содержит информацию об особенностях и причинах разрушения. Методами фрактографии решаются такие задачи, как оценка металлургического качества и структуры металла, изучение закономерности процесса разрушения, влияние структурных, технологических и прочих факторов на разрушение; установление характера и причин эксплуатационных разрушений.

Возможны случаи образования изломов вязких по степени пластической деформации, но хрупких по микромеханизму и энергии разрушения.

С инженерной точки зрения хрупкое разрушение — это вид разрушения, при котором пластические деформации существенно ограничены. Хрупкие разрушения отдельных конструкций происходят достаточно часто при низких температурах. Разрушение без наступления значительных пластических деформаций может произойти, если имеется концентратор, локализующий область образования трещины.

2.6. УСТАЛОСТНОЕ РАЗРУШЕНИЕ

Под действием переменных напряжений в материалах происходит процесс постепенного накопления повреждений, приводящий к образованию трещин, их развитию и разрушению.

Усталость металла — явление, при котором напряжения разрушения при многократных циклических нагруз-

ках могут быть ниже не только предела прочности или текучести, но и упругости.

Цикл напряжений характеризуется максимальным σ_{\max} , минимальным σ_{\min} напряжениями, амплитудой напряжений σ_a , средним напряжением цикла σ_m и коэффициентом асимметрии R .

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2}. \quad (2.16)$$

$$R = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}}. \quad (2.17)$$

Пример осциллограммы напряжений представлен на рис. 2.3. Знакопеременный симметричный цикл напряжений имеет коэффициент асимметрии $R = -1$.

Способность металла сопротивляться усталостному разрушению называют выносливостью, или циклической прочностью. Основная характеристика циклической прочности — кривая выносливости (кривая Веллера) устанавливает зависимость между амплитудой напряжения цикла σ и числом циклов нагружения до разрушения N .

Основным критерием, характеризующим способность металла сопротивляться усталостному разрушению, является предел выносливости, обозначаемый через σ_{-1} , индекс -1 означает, что при данной характеристике знакопеременного симметричного цикла конструкция выдержит так называемое базовое число нагружений — $N_{\text{баз}}$, равное для большинства конструкций $10^6 \dots 10^7$ нагружений. Предел выносливости в общем виде обозначается σ_R .

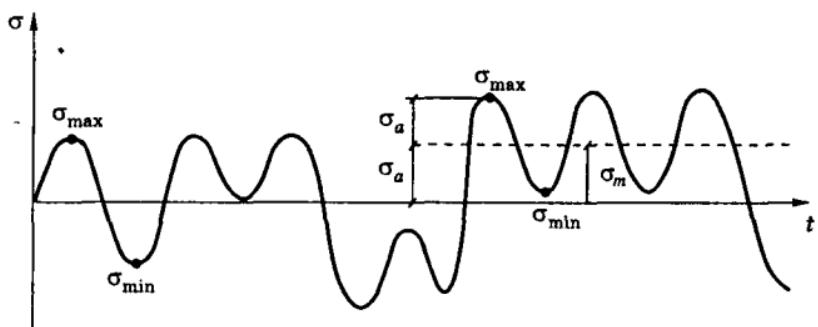


Рис. 2.3
Вариант изменения напряжений (амплитуд напряжений)
в металлоконструкции элемента машин

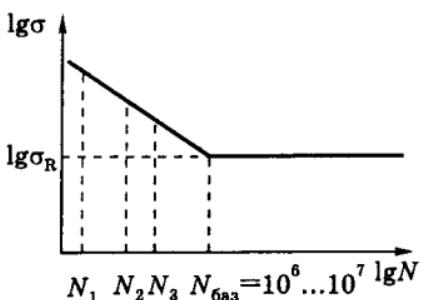


Рис. 2.4
Кривая выносливости
условной
металлоконструкции

Из рис. 2.3 видно, что амплитуды напряжений возникают с различными значениями R , а не только с коэффициентами, равными $R = -1$. Поэтому все амплитуды (σ_a) с помощью эквивалентного напряжения приводятся к дающим такие же усталостные повреждения амплитудам ($\sigma_{экв}$) симметричного цикла по формуле

$$\sigma_{экв} = \sigma_a + \psi \cdot \sigma_m, \quad (2.18)$$

где σ_m — среднее напряжение цикла ($\sigma_m = (\sigma_{max} + \sigma_{min})/2$); ψ — коэффициент чувствительности к асимметрии цикла.

Пример варианта кривой выносливости металлического образца представлен на рис. 2.4.

Из кривой выносливости видно, что при увеличении амплитуд напряжений, значительно больших предела выносливости, число циклов нагружений до разрушения (N_3, N_2, N_1) резко уменьшается.

Поэтому при нарушении правил эксплуатации, например путем регулировки давления клапанов гидрораспределителя гидропривода манипулятора на большую величину, чем предусмотрено НТД, возрастает грузоподъемность манипулятора сверх допустимой величины. В связи с этим удельный вес максимальных амплитуд напряжений, возникающих в металлоконструкции манипулятора при его эксплуатации, существенно возрастет, а ресурс манипулятора резко снизится.

Быстрое разрушение металлоконструкций произойдет не от разовых перегрузок, превышающих предел прочности или текучести, а от аварийного накопления усталостных повреждений, вызванного повышенными по величине и времени приложения нагрузками, хотя и не превышающими даже предела упругости объекта, но значительно превышающих предел его выносливости. Физически суть процесса накопления усталостных повреждений заключается в зарождении и развитии усталостных микротре-

щин из несплошностей материала элементов конструкций под действием многократных переменных (циклических) нагрузок. Под несплошностью материала будем рассматривать технологические дефекты, которые присутствуют в элементах конструкций еще до эксплуатации. Например, технологические повреждения в виде включений, волосовин, пор, рисок от механической обработки, литейных раковин и другие дефекты деталей лесных и сельскохозяйственных машин, которые можно рассматривать как локальные концентраторы напряжений и элементы начала разрушения.

Интенсивно развивающиеся в последнее время методы механики разрушения позволяют учесть эти факторы. Очевидно, что различные дефекты и микротрешины влекут за собой существенное изменение напряженно-деформированного состояния, которое может быть оценено методом конечных элементов (МКЭ), а их вероятностная природа требует привлечения статистических методов расчета.

2.7. КОРРОЗИОННОЕ РАЗРУШЕНИЕ

Под действием химического поля (кислотной или щелочной среды) детали лесных машин претерпевают коррозионное разрушение.

Коррозия (от лат. *corrosio* — разъедание) — это разрушение металлов в результате химического или электрохимического взаимодействия с окружающей средой.

Скорость коррозии зависит:

- от скорости диффузии;
- от скорости реакции.

Отвод продуктов коррозии способствует повышению скорости диффузии и реакции. Отсюда следует практическая рекомендация — не снимать продукты коррозии без последующей незамедлительной работы по антакоррозийной обработке ржавеющей поверхности.

Кинетика коррозии. Причина коррозии — термодинамическая неустойчивость металлов, вследствие чего в природе они почти всегда находятся в окисленном состоянии.

Металлургия, затрачивая энергию, восстанавливает металлы.

Коррозия — процесс, противоположный металлургическому, не нуждающийся в каких-либо энергетических затратах. Определить возможность протекания коррозии можно по изменению энергии Гиббса (изобарно-изотермического потенциала). Если обозначить G_1 — энергию исходных веществ; G_2 — энергию продуктов реакции, то $\Delta G = G_2 - G_1$.

Самопроизвольно протекают лишь те процессы, в результате которых происходит уменьшение энергии Гиббса, т. е. $G_1 > G_2$, $\Delta G < 0$.

При окислении 1 моля магния, меди и золота ΔG в кДж составит соответственно величины -598 ; -120 ; $+66$.

Коррозия — гетерогенный процесс, протекающий на границе раздела металл–газ или металл–жидкость.

Скорость коррозии определяется факторами:

- состоянием поверхности металла (защищенной, незащищенной);
- температурой металла и окружающей среды;
- составом и скоростью движения коррозионной среды;
- напряженным состоянием металла и др.

2.7.1. КЛАССИФИКАЦИЯ КОРРОЗИИ

1. По геометрическому характеру коррозионных разрушений:

- а) сплошная (общая);
- б) местная;
- в) подповерхностная;
- г) межкристаллическая;
- д) избирательная.

2. По характеру взаимодействия металла со средой:

- а) химическая (протекает в средах, не проводящих ток);
- б) электрохимическая (в водных растворах электролитов: солевая, щелочная, кислотная).

3. По типу среды:

- а) атмосферная;
- б) газовая;
- в) морская;

г) подземная.

4. По характеру дополнительных воздействий:

а) коррозия под напряжением;

б) коррозия при трении;

в) контактная коррозия;

г) фреттинг-коррозия;

д) электрокоррозия внешним током;

е) радиохимическая (под действием излучения);

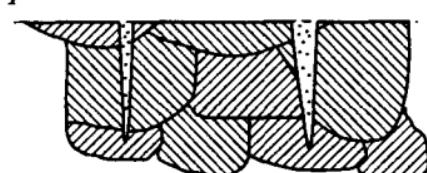
ж) биокоррозия (под действием продуктов, выделяемых микроорганизмами).

Наиболее опасные виды коррозии:

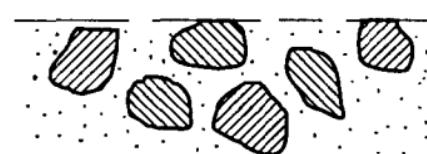
1. *Коррозионное растрескивание*.

Головки цилиндров ДВС, выпускные коллекторы, стенки котлов. Поражение металла, вызванное одновременным действием коррозионной среды и номинально статическим растягивающим напряжением.

1



2



3



2. *Межкристаллитная коррозия*. Выпускные трубы, жаровые трубы.

3. *Коррозия пятнами*. Кузова автомобилей, гильзы цилиндров в полосе движения верхнего компрессионного кольца.

4. *Коррозионная усталость*. Возникает при одновременном действии коррозионной среды и циклических нагрузок. Такому виду коррозии подвержены элементы конструкций газовых турбин, гидротурбин, насосов.

2.7.2.

ПОКАЗАТЕЛИ КОРРОЗИОННЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ

1. Изменение массы, отнесенное к единице поверхности.
2. Изменение массы со временем — скорость коррозии.
3. Глубина коррозии.
4. Доля поверхности, занятая продуктами коррозии.

5. Число коррозионных точек на единице поверхности.
6. Время до появления первого очага коррозии.
7. Время до появления коррозионной трещины или до полного разрушения.

8. Значение тока коррозии.

Меры борьбы с коррозией могут осуществляться в форме:

1. Воздействия на металл.
2. Воздействия на среду.
3. Воздействия на конструкцию.

Воздействие на металл подразумевает антикоррозийное легирование, антикоррозийные покрытия, электрохимическую защиту (катодный метод защиты — защищаемая поверхность из стали, меди, алюминия, латуни присоединяется к отрицательному полюсу внешнего источника тока).

Воздействие на среду предусматривает ввод ингибиторов для уменьшения электрохимической коррозии, обескислороживание, использование инертных и защитных газов при нагреве металла, осушение воздуха в помещениях хранения техники и использование при этом летучих ингибиторов и инертных газов.

Воздействие на конструкцию предусматривает ликвидацию контактной коррозии путем подбора материалов и прокладок, устранение скопления влаги (предпочтение сварного соединения вместо болтового), нанесение покрытий.

Все перечисленные мероприятия снижают скорость (V_d) диффузии, т. е. количество вещества, перенесенное в единицу времени, которое (по закону Фика) зависит от следующих параметров:

$$v_d = K_d \cdot S \cdot \frac{dc}{dx}, \quad (2.19)$$

где K_d — коэффициент диффузии (возрастающий с увеличением температуры); S — площадь сечения, через которое протекает диффузия; dc/dx — градиент концентрации.

В итоге мероприятий замедляется скорость реакции коррозии (v_p — количество вещества, реагирующего в единицу времени), определяемая по выражению

$$v_p = K_p \cdot C \cdot \exp[-W/RT], \quad (2.20)$$

где K_p — постоянный коэффициент скорости реакции; C — концентрация частиц; W — энергия активации (энергия, при которой частица станет реакционно-активной); T — абсолютная температура; $\exp[-W/RT]$ — величина, характеризующая долю частиц, обладающих необходимой энергией активации, т. е. долю активных частиц; R — универсальная газовая постоянная.

2.7.3. ПОКАЗАТЕЛИ КОРРОЗИИ И КОРРОЗИОННОЙ СТОЙКОСТИ

Показатели (табл. 2.1) согласно ГОСТ 9.908-85 определяются в заданных условиях, учитывая их зависимость от химического состава и структуры металла, состава среды, температуры, гидро- и аэродинамических условий, вида и величины механических напряжений.

Показатели могут быть количественными, полуколичественными и качественными. Желателен количествен-

Таблица 2.1

Показатели коррозии и коррозионной стойкости

Вид коррозии	Основные показатели коррозии и коррозионной стойкости		
	Интегральный показатель коррозии	Скоростной показатель коррозии	Показатель коррозионной стойкости
Сплошная коррозия (равномерная)	Глубина проникновения коррозии.	Линейная скорость коррозии.	Время проникновения коррозии на допустимую глубину.
	Потеря массы на единицу площади	Скорость убыли массы	Время до уменьшения массы на допустимую величину
Коррозия пятнами	Степень поражения поверхности	—	Время достижения допустимой степени поражения
Межкристаллитная коррозия	Глубина проникновения коррозии. Снижение механических свойств (δ , Ψ , KCU , σ_B)	Скорость проникновения коррозии	Время проникновения на допустимую глубину. Время снижения механических свойств до допустимого уровня

Вид коррозии	Основные показатели коррозии и коррозионной стойкости		
	Интегральный показатель коррозии	Скоростной показатель коррозии	Показатель коррозионной стойкости
Коррозионное растрескивание	Глубина (длина) трещин. Снижение механических свойств (δ , Ψ)	Скорость роста трещин	Время до появления первой трещины. Время до разрушения образца. Уровень безопасных напряжений. Пороговый КИН* при коррозионном растрескивании
Коррозионная усталость	Глубина (длина) трещин	Скорость роста трещин	Количество циклов до разрушения. Условный предел коррозионной усталости. Пороговый КИН при коррозионной усталости

* КИН — коэффициент интенсивности напряжений.

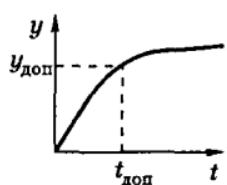


Рис. 2.5
Схема зависимости показателя коррозии y от времени t

ный показатель. Основой большинства показателей является время достижения заданной (допустимой) степени коррозионного поражения металла в определенных условиях.

На рис. 2.5 представлена схема зависимости показателей коррозии от времени.

2.8. ДРУГИЕ ВИДЫ РАЗРУШЕНИЯ

Тепловое разрушение происходит под действием теплового поля. При тепловых деформациях имеют место структурные превращения в металлах и сплавах, так как вследствие нагрева разрушается созданная ранее структура металла, появляется новая и возникают механические напряжения. Это влечет за собой изменение формы элементов конструкций. Термовые деформации могут привести к нарушению режима эксплуатации и возникновению заклинивания. Характерны для головок цилиндров, поршней, выпускных коллекторов двигателей внутреннего сгорания. Поэтому при проектировании машин и оборудования конструктору необходимо решать вопросы обес-

печения оптимального теплового режима работы деталей и агрегатов, который должны, в свою очередь, обеспечивать и специалисты, использующие объекты, путем соблюдения правил эксплуатации.

Старение. При длительной эксплуатации или хранении состояние деталей и материалов изменяется под действием внешней среды. Так, резинотехнические изделия теряют прочность и эластичность в результате окисления, термического воздействия (разогрев или охлаждение), химического воздействия масла, топлива и жидкостей, а также влажности. В процессе эксплуатации свойства смазочных материалов и эксплуатационных жидкостей ухудшаются в результате накопления в них продуктов износа, изменения вязкости и потери свойств присадок.

При хранении снижаются прочность и эластичность резинотехнических изделий. У топлива, смазочных материалов и жидкостей наблюдаются процессы, сопровождаемые выпадением осадков.

Таким образом, старение можно определить как изменение начальных свойств материалов, которые происходят в процессе эксплуатации и(или) хранения.

Закономерности, описывающие необратимые процессы и позволяющие оценить изменения начальных свойств материалов, которые происходят в процессе эксплуатации объектов, называют законами старения.

В общем, к таким законам можно отнести законы, которым подчиняются объекты в результате усталостного разрушения, изнашивания, коррозии, прогара и т. д.

Но существуют и собственно процессы старения, возникающие при воздействии полей: электромагнитного, светового, силового, радиационного, химического и др.

Законы старения всегда связаны с фактором времени (или с другими факторами, зависящими от времени, например изменение энергии):

- охрупчивание металлов вследствие нейтронного облучения (АЭС);
- потеря эластичности резинотехническими изделиями: манжеты, уплотнения и др.;
- растрескивание пластмасс — электроизоляция;

- изменение свойств лаков, красок — изоляционный лак в электрических машинах и др.

Оплавление — совместное воздействие электромагнитного и теплового поля. Ему подвержены электроды искровых свечей зажигания, контакты прерывателя-распределителя, контакты электрических реле в системах энергоснабжения.

Оплавление и разрушение поверхностей деталей под действием электромагнитного поля происходят у отдельных элементов электрооборудования машин (электроды искровых свечей, контакты прерывателя-распределителя и т. д.).

Роторы магнето, генераторов переменного тока и другие намагниченные детали теряют магнитные свойства. Потеря приобретенных служебных свойств в виде потери упругости и формы может происходить у листов рессор, пружин, торсионных валов.

Свойства деталей могут быть восстановлены путем повторного намагничивания роторов и термообработки упругих деталей.

Прогар возникает при работе в условиях высоких температур и соприкосновения с горячей струей газа. Вообще говоря, это эрозионно-коррозионный процесс, где главное влияние оказывает тепловое воздействие. При этом происходит интенсивное окисление металла (но не электрохимическая коррозия, а химическая). Прогару подвержены жаровые трубы, камеры сгорания, топки, колосниковые решетки и т. д. Основной показатель — скорость прогорания.

Под действием теплового и силового поля может возникнуть явление ползучести. **Ползучесть** — это пластические деформации объектов, изменяющиеся во времени. Она может привести к нарушению правильной работы изделия. Например, вследствие ползучести диска и лопаток газовой турбины перекрываются зазоры, предусмотренные между лопatkой и корпусом, что приводит к поломке лопаток.

Длительная прочность материалов, работающих при повышенных температурах, оценивается напряжением,

при котором образец при постоянной температуре не разрушается в течение заданного времени ($t_p = 100, 1000, 10\,000$ ч). При этом для жаропрочных сталей наблюдается степенная зависимость между временем до разрушения t_p и постоянно приложенным напряжением σ

$$t_p = a\sigma^n, \quad (2.21)$$

где a и n — постоянные, зависящие от температуры.

Деформацию некоторых материалов (например, пластмасс) иногда описывают зависимостью

$$D(t, \sigma) = \frac{\sigma}{E} + a \cdot \sigma^m \cdot t^n, \quad (2.22)$$

где E — модуль упругости, a , m и n — экспериментально определяемые константы.

2.9. КРИТЕРИИ ПРЕДЕЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ ДЕТАЛЕЙ, СОПРЯЖЕНИЙ, СБОРОЧНЫХ ЕДИНИЦ

Объективное обоснование и оптимальный расчет предельного состояния позволяют полнее использовать ресурс каждой детали, сопряжения, узла и агрегата машины при минимальных эксплуатационных затратах на ее содержание.

При заниженных критериях предельного состояния ресурс машин и оборудования используется не полностью, а при завышенных могут возникнуть аварийные отказы, увеличиваются простой техники и затраты на ее эксплуатацию и ремонт.

Предельное состояние металлоконструкции типа рамы, элементов манипулятора характеризуется их поломкой или величиной трещин по сварным швам или цльному металлу.

Изменение состояния сопряжений характеризуется главным образом износом деталей, а поэтому предельное состояние сопряжений устанавливается по критериям (признакам) предельного износа.

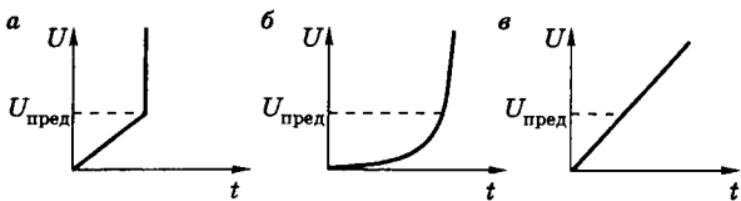


Рис. 2.6

Схемы наступления предельного состояния объекта, соответствующие трем критериям предельного состояния:

U — величина износа; t — время; $U_{\text{пред}}$ — величина предельного износа.

При определении предельного состояния объекта рекомендуется рассматривать три критерия предельного состояния:

1. Технический (характеризует работу без поломок).

2. Технологический (характеризует качество работы, например точность изготовления изделий на металлорежущем станке).

3. Экономический (характеризует экономическую целесообразность использования объекта по назначению).

Критерии предельного износа рекомендуется устанавливать в зависимости от того, какое влияние оказывает износ детали на работу объекта. При этом рекомендуется рассматривать три случая (*a*, *b*, *c*), изображенных на рис. 2.6.

В первом случае (*a*) в результате износа, накопления усталостных повреждений и последующего разрушения объект становится неработоспособным (например, произошло разрушение объекта: скол зубьев шестерен коробки передач). По этому признаку (критерию) достигают предельное состояние не только объекты, подверженные износу, но и объекты, деформируемые и разрушающиеся под воздействием разовых перегрузок, накопления усталостных повреждений, т. е. объекты, теряющие работоспособность из-за трещин и поломок, потери служебных свойств, разрыва РВД или РТИ, дискретного мгновенного изменения состояния объекта, приводящего его в неработоспособное состояние: это и поломка коленчатого вала, задир поверхностей вкладышей, поломка поршневого кольца, излом пальца или звена гусеницы, трещина значительных размеров или поломка рукояти манипулятора и т. д.

Во втором случае (*б*) износ или преодоление определенного его порога приводит к такому состоянию объекта, при котором он не может выполнять свою работу с соблюдением всех норм и требований, предъявляемых к результатам его функциональной деятельности. Ярким примером объекта, попадающим под критерий предельного состояния, может служить металлообрабатывающий станок, не обеспечивающий получения продукции заданного качества, в частности износ подшипника шпинделья, направляющих станины, суппорта и других элементов, не позволяющих металлообрабатывающему станку, например круглошлифовальному, производить необходимой точности шлифовку шеек коленчатых валов при общей работоспособности (согласно критерию *а*) всех деталей станка.

В третьем случае (*в*) в результате износа (в том числе и аварийного, соответствующего схеме *б*) качественные характеристики целесообразности использования объекта (уже не с технологической, а с экономической точки зрения) уменьшаются ниже всякого допустимого порога. Этот критерий характерен для объектов, чья целесообразность работы связана (в первую очередь с их производительностью) с мощностью, грузоподъемностью, скоростью передвижения.

Классическим примером достижения предельного состояния по данному критерию может служить потеря мощности двигателя внутреннего сгорания при полном его соответствии работоспособному состоянию по двум первым, уже рассмотренным критериям.

Шестеренный насос привода гидросистемы машины, будучи функционально работоспособным после преодоления определенного порога величины износа шестерен и корпуса, достигает предельного состояния из-за падения своей производительности, например, более чем на 15% от номинальной.

Двигатель внутреннего сгорания может сохранять свою работоспособность, но при этом его цилиндропоршневая группа достигла предельного состояния по величине падения мощности, например, более чем на 15% от номинальной.

Предельные износы основных деталей часто устанавливают на основании практических данных эксплуатации и ремонта машин или на основе их прочностных расчетов.

Для определения ресурса T детали необходимо иметь зависимость величины износа деталей от величины наработки и значение предельного износа $U_{\text{пред}}$, так как

$$T = \frac{U_{\text{пред}}}{\gamma}, \quad (2.23)$$

где γ — случайная функция, характеризующая скорость изнашивания сопряжения.

$$\gamma = \frac{dU}{dt} = f(P, V, K_T, K_\vartheta), \quad (2.24)$$

где $f(P, V, K_T, K_\vartheta)$ — функция, зависящая от нагрузки, скорости скольжения, технологических и эксплуатационных факторов.

Допустимые износы $U_{\text{доп}}$ (рис. 2.7) меньше предельных $U_{\text{пред}}$, с тем, чтобы деталь не могла выйти из строя в течение последующей межремонтной наработки T .

За период межремонтной наработки износ детали увеличится на величину, равную $\gamma \cdot T_{\text{МР}}$.

Учитывая, что $\tan \alpha = \gamma = U_{\text{доп}}/T_p$, получаем

$$U_{\text{доп}} \cdot \left(1 + \frac{T_1}{T_p}\right) = U_{\text{пред}}. \quad (2.25)$$

Следовательно

$$U_{\text{доп}} = \frac{U_{\text{пред}}}{1 + \frac{T_1}{T_p}}, \quad (2.26)$$

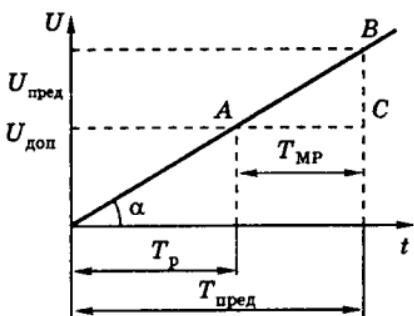


Рис. 2.7

Схема, отражающая связь между допустимым и предельным износом детали

где T_p — наработка детали до выполняемого в данный момент ремонта; $AC = T_{\text{МР}}$ — межремонтная наработка детали (наработка до следующего ремонта или списания детали); $BC = U_{\text{доп}} - \gamma \times T_{\text{МР}}$ — допустимый износ детали; $T_{\text{пред}}$ — предельная наработка детали.

Если от последнего ремонта данный периодический ремонт, при котором проводится дефектовка деталей, будет k -м, то

$$T_p = k \cdot T_{MP}. \quad (2.27)$$

Тогда

$$U_{\text{доп}} = \frac{U_{\text{пред}}}{1 + \frac{T_{MP}}{k \cdot T_{MP}}}, \quad (2.28)$$

откуда

$$U_{\text{доп}} = \frac{k}{k+1} \cdot U_{\text{пред}}. \quad (2.29)$$

По значениям $U_{\text{пред}}$ можно определить наработку T_p деталей, заменяемых при периодическом ремонте.

Подставляя в формулу (7.7) значение $U_{\text{доп}} = \gamma \cdot T_p$, получаем

$$\gamma \cdot T_p = \frac{k}{k+1} \cdot U_{\text{пред}}. \quad (2.30)$$

Далее следует

$$T_p = \frac{k}{k+1} \cdot \frac{U_{\text{пред}}}{\gamma} \quad (2.31)$$

или

$$T_p = \frac{k}{k+1} \cdot T_{\text{пред}}. \quad (2.32)$$

Итак, мы определились с критериями предельного состояния и предельным состоянием восстанавливаемых деталей, входящих в различные сборки, узлы, агрегаты, системы машины.

Но оценка ресурса осуществляется и применительно к агрегатам, системам и машине в целом. Возникает необходимость в разработке критериев предельного состояния ремонтируемых агрегатов, систем, входящих в конструкцию той или иной машины, а также в разработке критериев предельного состояния самой ремонтируемой машины в целом.

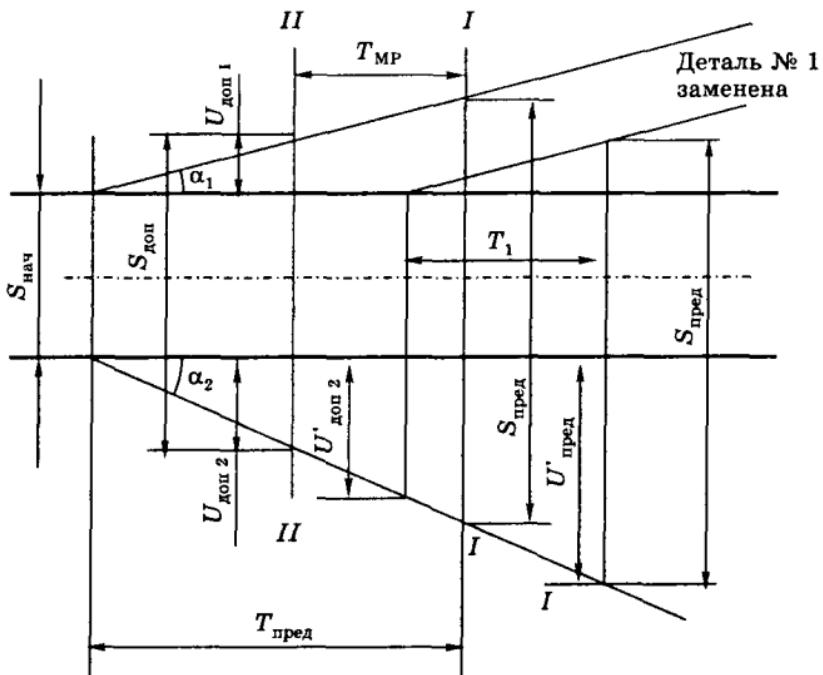
Рассмотрим эти вопросы на примере тракторов ОАО «ОТЗ». В частности, между представителями завода и заказчика тракторов от лесной промышленности были согласованы следующие положения: предельным состоянием металлоконструкции стрелы манипулятора трактора

ТБ-1М считать наличие трещин свыше 1/3 высоты ее сечения; предельным состоянием коробки передач трактора — достижение предельного состояния картера (базовой детали) или замена 70% шестерен в разное время эксплуатации, причем наработку, характеризующую предельное состояние (ресурс), определять при замене последней шестерни, которая переходила 70%-ный рубеж замененных шестерен; предельным состоянием трансмиссии считать состояние, когда одновременно или порознь достигнут предельного состояния два из числа основных агрегатов при любом их сочетании (например, предельное состояние коробки передач и заднего моста); предельным состоянием трактора считать достижение предельного состояния несущей системы (рамы) или предельное состояние одновременно или в разное время трансмиссии и двигателя (технологического оборудования и трансмиссии или двигателя), т. е. двух любых из основных систем трактора.

При дефектации ремонтируемых объектов важное значение имеет состояние сопряжения деталей типа втулка-вал, когда предельный зазор в сопряжении увеличить нельзя, но по условиям работы сопряжения одна из деталей имеет больший ресурс и больший предельный износ, когда работоспособность сопряжения можно восстановить заменой одной из сопрягаемых деталей, на практике менее дорогой, менее металлоемкой, обычно без особых трудностей удаляемой из машины (шатунные вкладыши коленчатого вала двигателя внутреннего сгорания). На рис. 2.8 представлена схема такого сопряжения и возможность продления срока его службы за счет замены только одной из сопрягаемых деталей.

На рис. 2.8 построены линии износа деталей 1 и 2, работающих в сопряжении друг с другом. Начальный зазор в сопряжении равен $S_{\text{нач}}$. Средняя интенсивность (скорость) изнашивания детали 1 характеризуется углом α_1 наклона линии износа, а детали 2 — углом α_2 . Предельная наработка сопряжения (предельный зазор) определяется аналитически или графически. Здесь линией I—I отмечена предельная наработка сопряжения $T_{\text{пред}}$ и предельный зазор — $S_{\text{пред}}$. Если известно, через какую наработку

Деталь № 1



Деталь № 2

Рис. 2.8

Схема допустимых и предельных износов для двух сопрягаемых деталей разной долговечности

данное сопряжение вторично поступит на ремонтное предприятие, то по приведенной схеме можно установить допустимый износ обоих деталей, а таким образом и допустимый зазор. Для этого необходимо влево от вертикали I—I отложить значение T_{MP} , соответствующее межремонтной наработке, и провести вертикаль II-II. Размер $S_{\text{доп}}$, показанный на этой вертикали, будет соответствовать значению допустимого зазора в сопряжении, при котором детали с износом можно без восстановления оставить на машине, так как они отработают ресурс до следующего ремонта. Пересечение вертикали II-II с линией износа детали 1 позволяют определить также допустимый ее износ, обозначенный на рис. 2.8 через $U_{\text{доп}1}$, а с линией износа детали 2 — допустимый износ — $U_{\text{доп}2}$.

При ремонте машины можно восстановить работоспособность сопряжения заменой одной из деталей (например,

детали 1). В данном случае деталь 2 будет иметь повышенный предельный и допустимый износы — соответственно $U'_{\text{пред}2}$ и $U'_{\text{доп}2}$.

Допустимые и предельные износы таких деталей, как шестерни, втулка, пальцы и так далее и зазоры в основных сопряжениях получены (определенны или назначены) с использованием этого метода.

Следует отметить, что предельное состояние, определенное по правилам теории надежности, не является строгим основанием для выбраковки или выбора способа восстановления, используемых в ремонтном деле. Однако необходимо отметить, что существующие технические условия (требования) на выбраковку деталей, используемые специализированными ремонтными предприятиями, в основном отражают требования, предъявляемые к деталям при капитальном ремонте машин. Учитывая, что требование или условие капитального ремонта при $T_{\text{МР}} = 0,8 \cdot T_{\text{РН}}$, т. е. межремонтная наработка (наработка от первого до следующего капитального ремонта или списания — $T_{\text{МР}}$) должна быть не менее 80% от ресурса новой детали (машины), обозначенной через $T_{\text{РН}}$, следует, что для условий текущего ремонта требования получаются значительно завышенными и не могут быть напрямую и в полном объеме применимы. Например, если 80%-ный ресурс нового трактора ОАО «ОТЗ» равен 6000 моточасов, то такой же ресурс капитально отремонтированного трактора ОТЗ должен составить 4800 моточасов.

Статистическими наблюдениями установлено, что через 2500 моточасов коробку передач тракторов ОТЗ снимают и ремонтируют с полной или частичной ее разборкой в условиях ремонтно-механических мастерских (РММ) лесозаготовительного предприятия в ходе текущего ремонта. Значит, технические условия при выбраковке деталей при текущем ремонте могут исходить из $T_{\text{пред}} = 2500$ моточасам.

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ

3.1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Для определения показателей надежности машин и оборудования используются вероятностные и статистические методы, т. е. методы и способы теории вероятностей и математической статистики.

Отказы техники являются случайными величинами, так как являются следствием воздействия многих объективных и субъективных факторов.

Объективные факторы — отражают воздействие окружающей среды.

Субъективные факторы — зависят от человека, принимающего решение о выборе комплектующих изделий и материалов, технологии изготовления, а также об обеспечении нормальной эксплуатации, своевременном и качественном проведении технического обслуживания и ремонта.

Рассмотрим основные специфические понятия, характерные для теории вероятностей и математической статистики, и прежде всего такие, как испытание (опыт), событие, случайная величина, вероятность, частота, частость, а также многие другие.

Испытание (опыт) — это создание определенных условий, влияющих на некоторые физические явления. Испытания сопровождаются регистрацией результата.

Событие — явление, происходящее в результате испытаний.

Достоверное событие должно обязательно произойти. Случайное — может произойти, а может не произойти. Невозможное событие заведомо произойти не может.

Результаты, полученные при проведении испытаний, обрабатываются с целью получения характеристик, определяющих их точность и достоверность и подтверждающих таким образом их корректность.

Единичным — называется явление, которое возникло однократно и при многократном воспроизведении повториться не может.

Массовым — называется явление, повторяющееся при многократном воспроизведении опыта.

Несовместимые события — события, которые одновременно происходить не могут. Например отказ и одновременно работоспособное состояние одной и той же детали невозможно.

Совместимые события — события, когда одно не исключает другое. Например, одновременная поломка разных деталей объекта может характеризовать совместимые события.

Случайная величина — величина, которая может принимать различные значения в определенных пределах. Случайные величины делятся на непрерывные (время безотказной работы) и дискретные (число отказов).

Число бракованных деталей — дискретная величина, а величина их износа — непрерывная.

Частота — число одинаковых событий (значение случайной величины), соединенных в одну группу (интервал) или разряд.

Частость, или относительная частота (W) — это частота, выраженная волях единицы или процентах от общего числа испытаний (N), т. е.

$$W = \frac{m}{N} \text{ или } W = \frac{m}{N} \cdot 100\%, \quad (3.1)$$

где m — частота или число случаев наступления события.

При неограниченном увеличении N статистическое значение W сходится к некоторому числу P , называемому вероятностью данного события, т. е.

$$P = \lim_{N \rightarrow \infty} W = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{m}{N} \text{ или } P(A) \approx \frac{m}{N}, \quad (3.2)$$

где $P(A)$ — вероятность события A .

Вероятность — это объективная математическая оценка реализации случайного события или случайной величины.

При $P(A) = 1$ событие обязательно произойдет, при $P(A) = 0$ событие произойти не может, таким образом $0 \leq P(A) \leq 1$.

Событие, противоположное событию A , обозначается \bar{A} . Полной группой событий называется несколько несовместимых событий, из которых обязательно наступит хотя бы одно.

Для полной группы событий достаточно иметь два несовместимых события A и \bar{A} , для которых $P(A) + P(\bar{A}) = 1$. Случайное событие имеет устойчивую частоту при массовых испытаниях и колеблется вблизи некоторого положительного числа. Это число и принимают за вероятность события.

Вычисленная вероятность называется статистической, так как она получена в результате испытаний (опытов).

Согласно формуле (теореме) сложения вероятностей имеем

$$\begin{aligned} P + q &= 1 \\ \text{или } q &= 1 - P, \end{aligned} \quad (3.3)$$

где P и q — вероятность соответственно безотказной работы и отказа одного и того же объекта в одно и то же время.

Согласно теореме умножения вероятностей при двух независимых событиях A и B (появление одного из них не изменит вероятность появления другого) имеем

$$P(AB) = P(A) \cdot P(B). \quad (3.4)$$

Если тормозная система имеет четыре последовательно соединенных тормозных цилиндра с вероятностью безотказной работы каждого цилиндра, равной 0,9, то веро-

ятность безотказной работы всей системы из четырех тормозных цилиндров равна $0,9^4 = 0,66$.

Система очистки масла испытываемого объекта состоит из двух параллельно соединенных фильтров с вероятностью безотказной работы (P_f) каждого, равной 0,85. Вероятность отказа (q_f) каждого фильтра равна $1 - 0,85 = 0,15$. Вероятность отказа двух фильтров как двух независимых событий равна $0,15 \times 0,15 = 0,0225$. Вероятность безотказной работы двух параллельно соединенных фильтров равна $1 - 0,0225 = 0,9775$.

Таким образом, используя положения теории вероятностей, можно определить показатели надежности различных объектов, состоящих из множества последовательно и параллельно соединенных между собой элементов, имеющих каждый свою величину показателя безотказной работы.

Распределение случайных величин — это совокупность значений случайных величин, расположенных в возрастающем порядке с указанием их вероятностей для теоретических распределений или частот (частостей) для эмпирических распределений.

Закон распределения случайной величины устанавливает связь между возможными значениями случайных величин и соответствующими этим значениям вероятностями.

Дискретные (прерывные) случайные величины X могут принимать только ряд отдельных значений, каждому из которых соответствует некоторое значение вероятности P_1, P_2, \dots, P_n . Сумма вероятностей всех возможных значений прерывной случайной величины равна единице:

$$P_1 + P_2 + \dots + P_n = \sum_{i=1}^n P_i = 1.$$

Если X непрерывная случайная величина, а x — некоторое действительное число, то вероятность того, что $X < x$, может быть описана функцией распределения $F(x)$:

$$F(x) = P(X < x). \quad (3.5)$$

Функцию распределения можно представить в виде графика, если по оси абсцисс откладывать значение x , а по оси ординат значение $F(x)$.

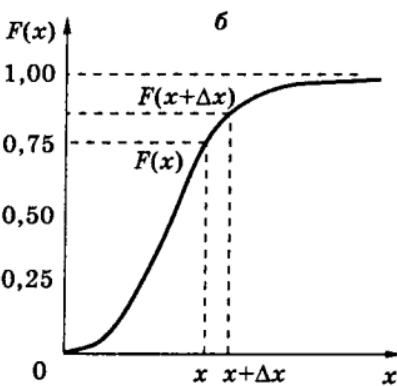
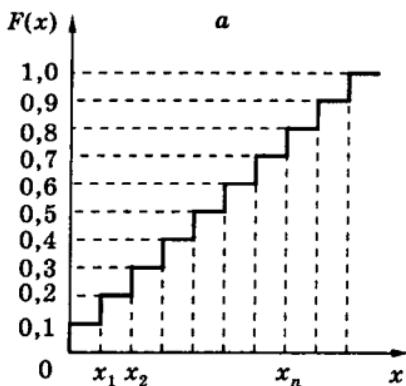


Рис. 3.1
Графики функций распределения:

а — для дискретной величины; б — для непрерывной величины.

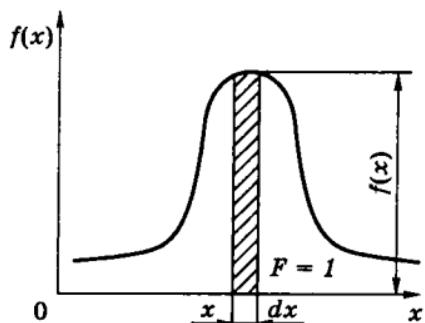


Рис. 3.2
График плотности распределения непрерывной случайной величины

Для дискретной случайной величины график функции распределения будет иметь вид ступенчатой кривой, а для непрерывной — плавной кривой (рис. 3.1).

Таким образом, функция распределения вероятностей может характеризовать как дискретные, так и непрерывные случайные величины.

О характере распределения непрерывной случайной величины в окрестностях различных точек можно судить на основании особой функции, которая называется плотностью распределения вероятности или плотностью распределения.

Плотность распределения непрерывной случайной величины — это производная от функции распределения непрерывной случайной величины, т. е.

$$f(x) = \frac{dF(x)}{dx}. \quad (3.6)$$

Графически плотность распределения, т. е. дифференциальная функция \$f(x)\$, соответствующая интегральной \$F(x)\$, рис. 3.1б, представлена на рис. 3.2.

Площадь элементарного прямоугольника, равную произведению $f(x)dx$, называют элементом вероятности.

Площадь, ограниченная кривой $f(x)$ и осью абсцисс (интеграл от плотности распределения в бесконечных пределах), равна единице, т. е.

$$\int_{-\infty}^{\infty} f(x)dx = 1 \quad \text{т. е. } F(\infty) = 1. \quad (3.7)$$

Функция $f(x)$ — неотрицательная функция от x , вследствие того, что $F(x)$ — неубывающая функция.

Для определения вероятности $P(X < x)$ необходимо вычислить площадь, заключенную между кривой и осью в интервале от $-\infty$ до x , т. е.

$$F(x) = \int_{-\infty}^x f(x)dx. \quad (3.8)$$

В частности, можно отметить, что функция $f(x)$ отражает скорость изменения вероятности отказа, т. е. отражает вероятность возникновения отказа в данный i -й момент времени (по сравнению с $i+1$ -м и $i-1$ -м промежутками времени); функция $F(x)$ отражает вероятность возникновения отказа к i -му моменту времени.

Обычно в теории надежности применяются обозначения:

1. F (*failure*) — отказ (вероятность отказа).
2. P (*probability*) — вероятность (вероятность безотказной работы).

3.2.

ХАРАКТЕРИСТИКИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СЛУЧАЙНЫХ ВЕЛИЧИН

Числовые характеристики случайной величины X , подсчитанные по полученным значениям в процессе испытания, называются статистическими характеристиками.

Числовые характеристики, определяющие закон распределения случайной величины, называются параметрами распределения.

Таким образом, статистическая обработка результатов испытаний может быть осуществлена на уровне определения статистических характеристик или на более высоком

уровне, т. е. на уровне определения параметров распределения исследуемой случайной величины.

Основными статистическими характеристиками случайных величин, изучаемых в теории надежности, служат среднее арифметическое и среднее квадратическое отклонения.

Среднее арифметическое (\bar{X}) — это частное от деления суммы измеренных значений (x_i) на число слагаемых этой суммы, т. е. на число (N) испытаний (опытов):

$$\bar{X} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{N} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{N}. \quad (3.9)$$

Средняя взвешенная величина определяется по формуле

$$\bar{X} = \frac{m_1 \cdot x_1 + m_2 \cdot x_2 + \dots + m_n \cdot x_n}{m_1 + m_2 + \dots + m_n} = \frac{\sum_{i=1}^n m_i \cdot x_i}{\sum_{i=1}^n m_i} = \frac{\sum_{i=1}^n m_i \cdot x_i}{N}, \quad (3.10)$$

где m_i — частота.

Для упрощения среднюю взвешенную часто подсчитывают по следующей формуле

$$\bar{X} = A + \frac{\sum_{i=1}^n m_i \cdot (x_i - A)}{N}, \quad (3.11)$$

где A — произвольное число, которое подбирают так, чтобы разности $(x_i - A)$ были возможно простыми и малыми числами.

Математическое ожидание (MX) дискретной случайной величины, подсчитанное по заданному закону распределения, называется суммой парных произведений возможных значений случайной величины x_i на соответствующие им вероятности P_i , т. е.

$$MX = P_1 \cdot x_1 + P_2 \cdot x_2 + \dots + P_n \cdot x_n = \sum_{i=1}^n P_i \cdot x_i. \quad (3.12)$$

Для непрерывной случайной величины

$$MX = \int_{-\infty}^{+\infty} x \cdot dF(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} x \cdot f(x) dx. \quad (3.13)$$

Среднее значение характеризует центр группирования значений случайной величины. При $N \rightarrow \infty$ величина \bar{X} стремится по значению к математическому ожиданию, т. е. $\bar{X} \approx MX$. Таким образом, среднее арифметическое является оценкой математического ожидания.

Мода (M_0) эмпирического или вариационного ряда распределения случайной величины (в дальнейшем эмпирической совокупности) — это значение случайной величины, имеющее наибольшую вероятность, а мода (M_{00}) теоретического распределения — такое значение x_i , которое соответствует максимальному значению плотности распределения $f(x)$.

Медиана (M_e) — срединное значение эмпирической совокупности, при теоретическом распределении медиана (M_{eo}) — это такое значение x_i , при котором вероятности появления величин, больших и меньших M_{eo} , одинаковы и равны 0,5.

Разброс случайной величины относительно центра распределения характеризуется *мерами рассеивания*.

К ним относятся: *размах, дисперсия (рассеивание), среднее квадратическое отклонение (стандарт), коэффициент вариации*.

Размах распределения (R) или диапазон рассеивания в эмпирической совокупности — это разность между максимальным и минимальным из значений случайной величины x_i , полученных в результате испытаний.

Эмпирическая дисперсия (S^2) — величина рассеивания зафиксированных значений вокруг их среднего значения, т. е.

$$S^2 = \frac{1}{N-1} \cdot \sum_{i=1}^n m_i \cdot (x_i - \bar{X})^2 \quad \text{при } N < 25; \quad (3.14)$$

$$S^2 = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^n m_i \cdot (x_i - \bar{X})^2 \quad \text{при } N \geq 25, \quad (3.15)$$

где m_i — частота x_i .

Дисперсия для дискретной случайной величины (DX) теоретического распределения есть

$$DX = \sum_{i=1}^n P(x_i) \cdot (x_i - MX)^2. \quad (3.16)$$

Для непрерывной случайной величины, заданной плотностью вероятности $f(x)$, дисперсия будет

$$DX = \int_{-\infty}^{+\infty} f(x) \cdot (x - MX)^2 dx. \quad (3.17)$$

Эмпирическое среднее квадратическое отклонение (S) и среднее квадратическое отклонение (σ) будут соответственно равны корням квадратным из оценки дисперсии S^2 и из дисперсии DX , взятых с положительным знаком, т. е.

$$S = \sqrt{\frac{1}{N-1} \cdot \sum_{i=1}^n m_i (x_i - \bar{X})^2} \quad \text{при } N < 25;$$

$$S = \sqrt{\frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^n m_i (x_i - \bar{X})^2} \quad \text{при } N \geq 25. \quad (3.18)$$

$$\sigma = \sqrt{DX}. \quad (3.19)$$

Совокупность не содержит грубых погрешностей согласно критерию Райта в том случае, если $|\Delta x_i| \leq 3\sigma$, где $|\Delta x_i|$ — максимальное по абсолютной величине отклонение, равное $|x_{\max} - \bar{X}|$.

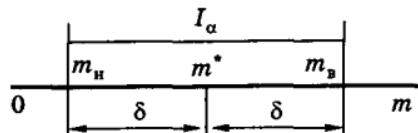
В качестве меры рассеивания, не зависящей от единиц измерения сравниваемых величин, принимается коэффициент вариации или изменчивости — v_x или его оценка V :

$$V = \frac{S}{\bar{X}} \quad \text{или} \quad v_x = \frac{\sigma}{MX}. \quad (3.20)$$

Учитывая то, что объем выборки, как правило, не велик, необходимо пользоваться интервальными оценками точности результатов испытаний. Эта оценка определяется двумя числами — концами интервала.

Доверительный интервал и доверительные границы схематично представлены на рис. 3.3.

Рис. 3.3
Доверительный интервал (I_a)
и доверительные границы
(m_a , m_b) параметра m



Статистическая характеристика m^* тем точнее определяет параметр m , чем меньше абсолютная величина разности $|m - m^*|$, т. е. $\delta > 0$ и $|m - m^*| < \delta$. Чем меньше δ , тем точнее оценка.

Однако статистические методы не позволяют категорически утверждать, что оценка m^* удовлетворяет неравенству $|m - m^*| < \delta$; можно лишь говорить о вероятности α , при которой это неравенство справедливо.

Доверительной вероятностью (надежностью) оценки m по m^* называют вероятность α , при которой выполняется неравенство $|m - m^*| < \delta$, т. е.:

$$P[|m - m^*| < \delta] = P[m^* - \delta < m < m^* + \delta] = \alpha. \quad (3.21)$$

Доверительным интервалом (I_α) называется интервал $(m^* - \delta, m^* + \delta)$, который покрывает неизвестный параметр с заданной вероятностью α .

Интервал $(m^* - \delta, m^* + \delta)$ имеет случайные границы, которые называются доверительными границами; $m_n = m^* - \delta = m_1$ — нижняя доверительная граница; $m_b = m^* + \delta = m_2$ — верхняя доверительная граница. Доверительный интервал $I_\alpha = m_2 - m_1$ представляет разницу случайных величин — доверительных границ интервала, зависящих от величины выборки и доверительной вероятности.

Если известна величина m^* (оценка математического ожидания параметра m) при известном σ , то верхнюю и нижнюю границы при нормальном распределении определяют по следующим уравнениям:

$$m_n = m^* - t \cdot \frac{\sigma}{\sqrt{n}}; \quad (3.22)$$

$$m_b = m^* + t \cdot \frac{\sigma}{\sqrt{n}}, \quad (3.23)$$

где t — число, которое определяется из равенства $2\Phi(t) = \alpha$ или $\Phi(t) = \alpha/2$.

$$\Phi(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^t e^{-t^2/2} dt. \quad (3.24)$$

Когда значение σ неизвестно в формулах (3.22; 3.23)

вместо величины $t \cdot \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$ определяют величину $t_\gamma \cdot \frac{S}{\sqrt{n}}$, где

t_γ — табличный коэффициент распределения Стьюдента, определяемый согласно работам [11; 25].

Обработка результатов наблюдений за работой лесных машин и оборудования имеет важное практическое значение. Например, по результатам обработки статистических данных наблюдений можно прогнозировать вероятность отказа лесных машин и оборудования при определенной наработке. Следовательно, можно прогнозировать и планировать число воздействий (программу профилактических и ремонтных работ), потребности в рабочей силе, площадях, материалах и запасных частях.

3.3. ОСНОВНЫЕ ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ СБОРА И ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ О НАДЕЖНОСТИ ОБЪЕКТОВ

Как уже отмечалось, под объектом испытаний может подразумеваться как полнокомплектная машина в сборе, ее система или агрегат, так и отдельно взятая деталь, из множества которых состоит та или иная машина или промышленное оборудование.

Поэтому сбор и последующая обработка информации о надежности могут осуществляться в зависимости от целей и задач по любым объектам машиностроительной продукции, при этом методика сбора и обработки данных принципиально не зависит от сложности и назначения объекта.

Общие требования, предъявляемые к информации о надежности, могут быть представлены следующими конкретными требованиями или свойствами, которыми должны обладать представляемые для анализа данные, это — полнота, достоверность, однородность (данные по одинаковым, т. е. сопоставимым объектам), дискретность (данные по отдельным свойствам), своевременность, конкретность и т. п.

Статистическая оценка основных показателей надежности дается по совокупности объектов или явлений, объединенных единными свойствами. Например, одновременно дается оценка надежности машинам и оборудованию одной модификации, выпущенным одним и тем же заводом без добавления данных по другим (с какими-то отличительными свойствами) объектам. При сравнительной оценке надежности машин одной модификации и одного завода-изготовителя берутся данные испытаний за одинаковую наработку по объектам, работающим в одинаковых, т. е. сопоставимых, условиях.

Статистическая совокупность — совокупность из однородных объектов, обладающих качественной общностью (например, перечень отказов 10 лесовозов марки Краз-6133М6 за наработку 30 тыс. километров пробега в условиях Пяозерского леспромхоза объединения «Кареллеспром»).

Генеральная или общая совокупность — это совокупность объектов, содержащая все исследуемые объекты, из которой делается выборка для наблюдения (испытания).

Выборка или выборочная совокупность — это определенное число объектов, отобранных из исследуемой совокупности для получения сведений о генеральной совокупности.

Объем выборки — число объектов наблюдений, составляющих выборку.

Примером генеральной совокупности может служить годовой выпуск трелевочных тракторов с гидроманипулятором ТБ-1М-15 производства ОАО «ОТЗ», а выборку (объем выборки) могут представлять десять тракторов ТБ-1М-15 одного года выпуска (одной модификации), поставленных на длительные периодические эксплуатационные испытания (наблюдения) в условиях одного из леспромхозов Республики Карелия.

Сбор информации о надежности машин может осуществляться при подконтрольной эксплуатации (наблюдениях) за объектами в рядовых условиях, при регламентированных испытаниях, а также путем экспертных (разовых) оценок технического состояния и перечня отказов объектов в условиях рядовой эксплуатации.

Цели системы сбора и обработки информации о надежности объектов следующие:

1. Конструктивное усовершенствование объектов для повышения их надежности.

2. Усовершенствование технологии изготовления и сборки, повышение контроля соблюдения технологии изготовления и сборки.

3. Разработка и внедрение мероприятий, направленных на соблюдение правил эксплуатации, повышение эффективности технического обслуживания и текущего ремонта, повышение качества ремонта и снижение затрат на его проведение.

Задачи сбора и обработки информации о надежности машин и оборудования можно сформулировать в следующей последовательности:

1. Определение и оценка показателей надежности.

2. Обнаружение конструктивных, технологических и производственных недостатков, снижающих надежность.

3. Выявление деталей и сборочных единиц, ограничивающих надежность машин и оборудования.

4. Определение закономерностей возникновения отказов.

5. Установление влияния условий и режимов эксплуатации на надежность объектов.

6. Корректировка величин показателей надежности, за-носимых в ТУ (технические условия) и КУ (карту уровня).

7. Оптимизация номенклатуры и расхода запасных частей.

8. Выявление недостатков эксплуатации, совершенствование системы технического обслуживания и текущего ремонта машин и оборудования.

9. Определение эффективности мероприятий, направленных на повышение надежности изделий.

Обработка результатов экспериментальных наблюдений ведется в следующей последовательности:

1. По опытным данным строят эмпирическую кривую.

2. Вычисляют характеристики эмпирического распределения.

3. Выдвигают одну или несколько гипотез о функции плотности распределения исследуемой случайной величины, исходя из внешнего вида экспериментальной кривой.

4. Эмпирическая кривая выравнивается по одной или нескольким принятым теоретическим кривым.

5. Эмпирическую и теоретическую кривые сравнивают по одному из критериев согласия.

6. Выбирают функцию (закон) для данного распределения с учетом наилучшего согласования эмпирических и теоретических кривых.

Все это целесообразно выполнять с использованием соответствующих пакетов программ на ПЭВМ.

3.4.

ЗАКОНЫ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СЛУЧАЙНЫХ ВЕЛИЧИН

Рассмотрим законы распределения случайных величин, характеризующих надежность машин и оборудования. При оценке показателей надежности отдельных деталей и технических систем чаще всего встречаются (используются) следующие законы распределения: нормальный и его разновидности: логарифмически нормальный и усеченный нормальный; экспоненциальный (показательный), биноминальный, Вейбулла, Пуассона, гамма-распределение.

Каждый закон распределения проявляет себя в определенных конкретных условиях.

При ресурсных испытаниях, например десятка отдельных невосстанавливаемых, неремонтируемых деталей типа электролампочки, испытания продолжаются до отказа (предельного состояния) последней (десятой) электролампочки. Условия испытаний не позволяют вместо перегоревших лампочек устанавливать другие (запасные), т. е. испытания проводятся по плану *NUN* (испытываются *N* невосстанавливаемых и незаменяемых в случае отказа объектов, испытания продолжаются до предельного состояния всех *N* объектов).

Ресурс испытываемых объектов в этом случае при завершенных испытаниях обычно распределяется по одному из трех основных законов, а именно нормальному, Вей-

булла или экспоненциальному. Завершенные испытания предусматривают достижение предельного состояния всеми испытываемыми объектами.

В случае, когда испытания проводятся с заменой перегоревших электролампочек, т. е. число испытываемых лампочек остается всегда постоянным, равным первоначальному (в нашем случае десяти), с течением времени T процесс возникновения отказов лампочек стабилизируется, поток отказов становится стационарным (простейшим), так называемым пуассоновским, т. е. распределение ресурсных отказов объектов будет подчиняться распределению Пуассона.

Испытания в этом случае проводятся по другому плану, например по плану $[NR(r, T)]$, когда испытывают N объектов, отказавшие объекты не восстанавливают, но в случае отказа заменяют новыми; испытания прекращают, когда суммарное по всем позициям число отказавших объектов достигло r или по истечении времени испытаний или наработки T .

Из названных законов распределения случайных величин рассмотрим подробнее наиболее применяемые, в теории надежности.

Знание и выявление законов необходимо, например, для последующего их использования в случае оценки ресурса объектов при незавершенных испытаниях.

Испытания называются завершенными, если наблюдения ведутся до предельного состояния всех объектов. Исходные данные представляют собой полную выборку. Такая выборка используется для определения вида закона распределения ресурса.

Испытания называются незавершенными в двух следующих случаях:

1. Исходные данные представляют собой усеченную выборку, если наблюдения ведутся до заранее обусловленной наработки t_0 или до предельного состояния m из N машин, об остальных $N - m$ объектах известно, что наработка до предельного состояния не менее t_0 .

2. Под наблюдением находится N машин, в момент прекращения наблюдений (испытаний) имеются рабо-

тосспособные объекты (машины), наработка которых как больше, так и меньше наработка некоторых достигших предельного состояния; объекты, не достигшие предельного состояния, именуются приостановленными, а исходные данные представляют собой многократно усеченную выборку.

Методики определения показателей надежности по завершенным и незавершенным испытаниям имеют отличия друг от друга. Методика определения показателей надежности по незавершенным испытаниям подробно изложена в работе [25].

В ряде случаев законы распределения случайных величин могут быть описаны аналитически, как функции параметров этих законов.

Нормальный закон распределения определяется двумя параметрами: средним квадратическим отклонением σ и математическим ожиданием \bar{X} . Такой закон может иметь место, когда случайная величина подвержена влиянию сравнительно большого числа факторов, ни один из которых не является преобладающим.

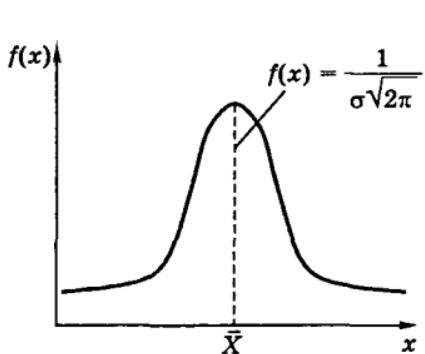


Рис. 3.4

Форма дифференциальной кривой нормального распределения

Закон нормального распределения (Закон Гаусса) характерен следующим выражением плотности распределения $f(x)$ случайной величины x :

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(x-\bar{X})^2}{2\sigma^2}}, \quad (3.25)$$

где σ — среднее квадратическое отклонение величины x ; e — основание натурального логарифма (2,7183); x — текущая случайная величина ($-\infty < x < +\infty$); \bar{X} — математическое ожидание величины x .

Дифференциальная кривая (рис. 3.4) симметрична относительно ординаты, соответствующей \bar{X} .

Случайная величина, подчиненная закону нормального распределения, имеет следующие свойства:

1. Однаковые по абсолютной величине положительные и отрицательные отклонения от математического ожидания \bar{X} равновозможны.

2. Меньшие отклонения более вероятны, чем большие.

3. Весьма большие отклонения от \bar{X} крайне маловероятны.

При нормальном распределении вероятность или частота значений x , заключенных в пределах от $\bar{X} - 3\sigma$ до $\bar{X} + 3\sigma$ составляет 0,9973, т. е. близко к единице (правило «трех сигм»).

Функция нормального распределения (интегральная кривая) имеет следующее аналитическое выражение:

$$F(x) = \int_{-\infty}^x f(x)dx = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot \int_{-\infty}^x e^{-\frac{(x-\bar{X})^2}{2\sigma^2}} dx. \quad (3.26)$$

Если ввести новую переменную $t = \frac{x - \bar{X}}{\sigma}$, т. е. перенести начало координат на ось симметрии кривой плотности распределения и величину среднего квадратического отклонения положить равной 1, то в новых координатах получим центрированную и нормированную функцию, плотность распределения которой будет

$$\phi(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{t^2}{2}},$$

а интегральная функция

$$F_0(t) = \int_{-\infty}^t \phi(t)dt = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot \int_{-\infty}^t e^{-\frac{t^2}{2}} dt. \quad (3.27)$$

Значения функций $\phi(t)$ и $F_0(t)$ табулированы и приводятся во многих справочниках по надежности. Для вычисления $F_0(t)$ при отрицательных значениях используют выражение

$$F_0(-t) = 1 - F_0(t). \quad (3.28)$$

Можно поступить наоборот, т. е. выписать принятые для анализа значения $F_0(t)$, равные $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n$, и определить соответствующее им значение $t = U_\alpha$. Такие значения U_α называются квантилями.

Усеченным нормальным распределением называют распределение, у которого случайная величина x с одной или двух сторон ограничена определенными значениями. Логарифмическим нормальным распределением называют распределение случайной величины y , если логарифм этой величины распределяется по нормальному закону.

$$f(x) = \frac{1}{\sigma_{\ln x} \cdot x \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot e^{\frac{-(\ln x - m_{\ln x})^2}{2 \cdot \sigma_{\ln x}^2}}.$$

Экспоненциальный закон однопараметрический — зависит от величины λ . При экспоненциальном законе распределение вероятности безотказной работы не зависит от того, сколько проработало изделие с начала эксплуатации, а определяется конкретной продолжительностью рассматриваемого периода или наработки Δx . Таким образом, эта зависимость не учитывает постепенного изменения параметров технического состояния, например, в результате изнашивания, старения и других причин и характерна для начального этапа эксплуатации. Экспоненциальный закон используется чаще всего при описании внезапных отказов и продолжительности разнообразных ремонтных воздействий.

Плотность распределения вероятности экспоненциального распределения при $x \geq 0$ имеет вид

$$f(x) = \lambda \exp(-\lambda x) = \lambda e^{-\lambda x}, \quad (3.29)$$

где λ — параметр распределения (постоянная величина).

Экспоненциальному распределению подчиняются единичные отказы.

Коэффициент вариации случайной величины, распределенной по экспоненциальному закону, близок к единице (колеблется от 0,81 до 1,00).

Коэффициент вариации, соответствующий нормальному распределению, в основном имеет значения $V \leq 0,4$, а для экспоненциального распределения $V \geq 0,81$. Промежуточное значение коэффициента вариации имеет место при распределении Вейбулла ($V = 0,4 \dots 0,8$), речь о котором пойдет ниже.

По закону распределения отказов можно судить о природе (причинах) их возникновения. Например, до согласования применимости трактора ТДТ-55А в комплектации самоходной сучкорезной машины ЛП-30(Б) ресурс рамы (несущей системы) последней на всех выпускаемых машинах не превышал 700...900 моточасов. Распределение ресурса из-за конструктивного несовершенства рамы трактора ТДТ-55А в комплектации сучкорезной машины соответствовало нормальному закону распределения, так как разброс ресурса был незначительным.

Единичные отказы распределительного вала дизеля СМД-14Б из-за производственных случайных причин проявлялись единично (не массово) с большим разбросом по наработке (порядка нескольких тысяч моточасов), и распределение наработки до отказа названных объектов подчинялось экспоненциальному закону.

График плотности экспоненциального распределения представлен на рис. 3.5.

Интегральная функция экспоненциального (показательного) распределения определяется по формуле

$$F(x) = \int_0^x f(x) dx = \int_0^x \lambda e^{-\lambda x} dx = 1 - e^{-\lambda x} = 1 - \exp(-\lambda x). \quad (3.30)$$

Математическое ожидание MX — это величина, обратная коэффициенту λ .

Математическое ожидание (MX) и среднее квадратическое отклонение (σ) у показательного распределения одинаковы:

$$MX = \sigma = \frac{1}{\lambda}. \quad (3.31)$$

Закон распределения Вейбулла (Вейбулла–Гнеденко) проявляется в модели слабого звена. Если техническая система состоит из независимых элементов, соединенных последовательно, то отказ любого из них приводит к отказу

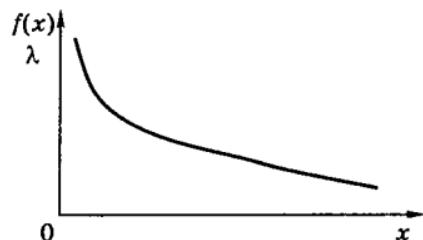


Рис. 3.5
Вариант графика плотности вероятности экспоненциального распределения

всей системы. В этом случае в такой модели рассматривается распределение ресурса системы как распределение соответствующих минимальных значений x_i , отдельных элементов. Примером использования распределения Вейбулла является распределение ресурса подшипника качения. Этот ресурс ограничивается ресурсом одного из элементов (шарика, ролика, конкретного участка сепаратора и т. д.).

Распределение Вейбулла имеет следующую плотность распределения:

$$f(t) = \frac{b}{a} \left(\frac{t}{a} \right)^{b-1} \cdot e^{-\left(\frac{t}{a} \right)^b}, \quad (3.32)$$

где a и b — параметры распределения.

При $b = 1$ распределение Вейбулла совпадает с экспоненциальным распределением, а при $b = 2$ — с распределением Релея [$f(x) = (x/\sigma^2)\exp(-x^2/2\sigma^2)$].

Функция распределения Вейбулла (интегральная функция) имеет следующий вид:

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{a} \right)^b} = 1 - \exp \left[-\left(\frac{t}{a} \right)^b \right]. \quad (3.33)$$

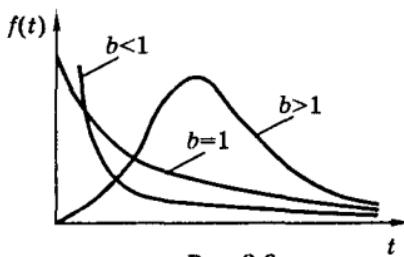


Рис. 3.6

График плотности распределения вероятности по закону Вейбулла

График плотности распределения Вейбулла представлен на рис. 3.6.

Распределение Вейбулла наряду с логарифмически нормальным сравнительно хорошо описывает отказы подшипников качения, а также отказы, связанные с приработочным

износом и усталостными разрушениями.

Распределение Вейбулла является более гибким при подборе теоретического распределения, соответствующего эмпирическому по критериям согласия.

Близким по виду к распределению Вейбулла является гамма-распределение:

$$f(t) = \frac{\lambda^\eta}{\Gamma(\eta)} \cdot t^{\eta-1} \cdot e^{-\lambda t}, \quad (3.34)$$

где η и λ — соответственно параметры формы и масштаба; $\Gamma(\eta)$ — гамма-функция.

$$\Gamma(\eta) = \int_0^{\infty} x^{\eta-1} e^{-x} dx. \quad (3.35)$$

Гамма-распределение обычно используется для описания времени до η -го отказа системы (объекта), если исходное распределение наработки до отказа является экспоненциальным. При этом обычно полагают η целым числом (распределение Эрланга).

Для распределения Эрланга (при целом η), представляющего для практики наибольший интерес, плотность распределения — $f(t)$, вероятность безотказной работы — $P(t)$ и интенсивность отказов — $\lambda(t)$ равны:

$$f(t) = \lambda \cdot \frac{(\lambda t)^{\eta-1}}{(\eta-t)!} \cdot e^{-\lambda t}, \quad P(t) = e^{-\lambda t} \sum_{i=1}^{\eta-1} \frac{(\lambda t)^i}{i!},$$

$$\lambda(t) = \frac{\lambda(\lambda t)^{\eta-1}}{(\eta-1)! \sum_{i=0}^{\eta-1} \frac{(\lambda t)^i}{i!}}. \quad (3.36)$$

Часто имеет место распределение дискретных случайных величин по распределению Пуассона, когда поток отказов технических систем по истечении определенного времени после начала эксплуатации становится стационарным.

Вероятность частот (P_m) событий отказов при этом будет

$$P_m = \frac{(n \cdot P)^m e^{-nP}}{m!} = \frac{a^m}{m!} e^a, \quad (3.37)$$

где m — частота данного события; n — число испытаний (наблюдений); P — вероятность события при одном испытании; $a = nP$ — математическое ожидание случайной величины.

Для распределения Пуассона дисперсия равна математическому ожиданию. Вероятности частот событий (P_m), редко встречающиеся при некотором числе испытаний, обычно приводятся в специальных таблицах.

Если принять $m = 0$, $a = \lambda \cdot t$, то получим уравнение экспоненциального распределения, который представляет собой частный случай распределения Пуассона.

Большое практическое значение для дискретных величин имеет закон биноминального распределения, который применим для случая, когда производится серия последовательных независимых испытаний, каждое из которых заканчивается одним из двух несовместимых между собой результатов — либо событие A наступает, либо нет.

Обозначим вероятность появления события через P , а вероятность непоявления через $q = 1 - P$. Так как испытания независимы, то появление события A не зависит от результатов предыдущих испытаний.

Суть биноминального закона распределения можно сформулировать следующим образом: если вероятность события A постоянна в серии последовательных независимых испытаний и равна P , то вероятность появления события A m раз в n испытаниях будет

$$P_{m,n} = C_n^m \cdot P^m \cdot q^{n-m} = \frac{n!}{m!(n-m)!} \cdot P^m q^{n-m}. \quad (3.38)$$

Математическое ожидание $M(m)$ и дисперсия $\sigma^2(m)$ биноминального распределения представлены как

$$M(m) = n \cdot P; \sigma^2(m) = n \cdot P \cdot q. \quad (3.39)$$

Если вместо случайной величины m рассматривать случайную частоту $x = m/n$, то из уравнений (5.14) получим

$$M(x) = \frac{1}{n} M(m) = P; \quad (3.40)$$

$$\sigma(x) = \frac{1}{n} \sigma(m) = \sqrt{\frac{P \cdot q}{n}}. \quad (3.41)$$

Значение аналитических зависимостей (теоретических законов распределения) заключается в том, что если известен вид закона (на основе обработки результатов наблюдений) и его параметры, то можно, используя аналитические зависимости, расчетными методами прогнозировать ожидаемые вероятности отказов технических систем. Например, для нормального закона необходимо знать два параметра ($M(x)$, $\sigma(x)$), а для экспоненциального — один (λ), чтобы рассчитать вероятность отказов и безотказной работы при любой наработке.

3.5. КРИТЕРИЙ СОГЛАСИЯ

Для проверки гипотезы о соответствии полученного в результате испытаний (наблюдений) эмпирического распределения предлагаемому теоретическому закону исследуемой случайной величины используют критерии согласия.

Наиболее простым является критерий λ , предложенный академиком А. Н. Колмогоровым. При использовании этого критерия делают предположение, что распределение статистических данных подчиняется какому-либо теоретическому закону распределения.

По эмпирическим и теоретическим частотам распределения подсчитывают значения критерия согласия λ по формуле [11]

$$\lambda = \frac{\max \left| \sum_{1}^i m_i - \sum_{1}^i m_{i,\text{теор}} \right|}{N} \cdot \sqrt{N} = D_{\max} \sqrt{N}, \quad (3.42)$$

где $\sum_{1}^i m_i$ — накопленная эмпирическая частота; $\sum_{1}^i m_{i,\text{теор}}$ — накопленная теоретическая частота; D_{\max} — наибольшая абсолютная разность между накопленными эмпирическими и теоретическими частотами; N — общее число всех наблюдаемых значений (объем выборки).

Теоретические частоты могут быть определены по формуле

$$m_{i,\text{теор}} = N \cdot [F(x_{i+1}) - F(x_i)], \quad (3.43)$$

где $F(x_{i+1})$ — значение теоретической функции распределения на правой границе i -го интервала; $F(x_i)$ — значение теоретической функции распределения на левой границе i -го интервала.

Критерий λ подчиняется определенному закону распределения, по которому можно вычислять вероятность $P(\lambda)$. В справочных таблицах приводятся величины $P(\lambda)$ для различных значений λ .

В случае $P(\lambda) < 0,05$ распределение по уровню значимости не соответствует предполагаемому теоретическому

распределению. В случае $P(\lambda) > 0,05$ предполагаемое теоретическое распределение может быть принято в качестве характеристики исследуемой случайной величины.

Широко применяют критерий согласия Пирсона, так называемый χ^2 — «хи-квадрат»:

$$\chi_{\text{набл}}^2 = \sum_{i=1}^n \frac{(m_i - m_{i,\text{теор}})^2}{m_{i,\text{теор}}}. \quad (3.44)$$

Найдя $\chi_{\text{набл}}^2$, следует определить k — число степеней свободы по формуле

$$k = n - r - 1, \quad (3.45)$$

где n — число сравниваемых частот интервалов выборки; r — число параметров предполагаемого распределения, которые оценены по данным выборки.

В табл. 1 Приложения по заданному уровню значимости P и числу степеней свободы k находят критическую точку $\chi_{\text{кр}}^2(P, k)$.

Если $\chi_{\text{набл}}^2 < \chi_{\text{кр}}^2$ (при уровне значимости P не менее 0,1), то данные наблюдений согласуются с гипотезой.

Расчет отдельных показателей безотказности и ремонтопригодности на примере лесозаготовительных машин производится в следующей последовательности:

1. Весь период наработки машин разбивается на интервалы, интервал наработки принимается равным 300 моточасам. Это связано с тем, что отдельные машины во время испытаний могут находиться в простое, ремонте, обслуживании, быть списанными.

2. В каждом интервале определяется условное число машин, проходящих испытания (N_y):

$$N_{j,y} = \frac{\sum_{i=1}^N N_i \cdot t_i}{300 \cdot K_j}, \quad (3.46)$$

где N_i — i -я машина, отработавшая t_i моточасов в j -м интервале; 300 — величина интервала; K_j — номер j -го интервала, в котором определяется условное число машин; N — общее число испытываемых машин.

3. В каждом интервале по группам сложности, по системам и в целом по машине определяются:

- средняя наработка на отказ

$$t_j = \frac{N_{j,y} \cdot 300}{n_j}, \quad (3.47)$$

где n_j — число отказов в j -м интервале на всех машинах;

- удельная суммарная трудоемкость текущих ремонтов

$$t_{j,tt} = \frac{\sum_{i=1}^N t_{tri}}{N_{j,y} \cdot 300}, \quad (3.48)$$

где $\sum_{i=1}^N t_{tri}$ — суммарная трудоемкость текущих ремонтов всех машин в j -м интервале.

Результаты исследования надежности машин должны быть востребованы их заводами-изготовителями, самими пунктами технического сервиса как для совершенствования конструкции машин, так и для повышения эффективности и качества их обслуживания и ремонта. При первичной обработке данных все отказы разносят по интервалам наработки (например, в 300 моточасов), по группам сложности отказов, по системам, к которым принадлежат отказавшие детали.

3.6. ПРИМЕРЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ ОБЪЕКТОВ

Пример 1. Вычисление среднеарифметического (M) и коэффициента вариации по способу произведений.

Исходные данные по наработке до отказа технического объекта для примера 1 приведены в табл. 3.1.

По табл. 3.2 принимаем при $n = 100$ число классов (интервалов) $r = 8$.

Величина размаха равна: $R = t_{\max} - t_{\min} = 450 - 380 = 70$. Величина классового промежутка равна $K = R/r = 70/8 = 8,75$. Принимаем $K = 10$.

Середина классов W — полусумма начала данного класса и начала следующего класса. Начало классов $W_h = W - (1/2)K$, конец классов $W_k = W + (1/2)K - h$, где h —

Таблица 3.1

Исходные данные (выборка $n = 100$)

413	450	419	412	427	435	404	430	421	319
432	420	416	407	427	428	417	398	424	420
414	410	409	416	430	403	426	407	400	423
423	434	402	431	410	405	436	405	424	405
433	395	433	420	439	398	437	422	394	416
414	386	428	441	397	417	418	414	429	417
401	424	411	426	380	419	406	419	429	406
425	391	432	409	418	418	388	421	415	417
413	413	444	392	411	428	394	431	411	422
424	434	408	443	407	421	422	410	423	409

Таблица 3.2

Справочные данные по выбору числа интервалов (классов) вариационного ряда

Число наблюдений (n)	1516–3050	756–1515	378–755	188–377	94–187	47–93	23–46	12–22
Число классов (r)	12	11	10	9	8	7	6	5

Таблица 3.3

Исходный вариационный ряд в виде классов ($n = 100$)

Классы	Границы $W_n - W_k$	445–454	435–444	425–434	415–424	405–414	395–404	385–394	375–384
	Середины W	450	440	430	420	410	400	390	380
Частоты f	1	7	20	30	25	10	6	1	

Таблица 3.4

Результаты вычислений

W	f	a	$f \cdot a$	$f \cdot a^2$	Результаты вычислений	
					6	
450	1	+3	+3	9	$\Sigma f \cdot a = 37 - 67 = -30$	
440	7	+2	+14	28		
430	20	+1	+20	20		
420	30	0	0	0		
410	25	-1	-25	25		
400	10	-2	-20	40		
390	6	-3	-18	54		
380	1	-4	-4	16		
					$M = 420 + 10 \cdot (-30 / 100) = 417,0$	$S = 192 - 30^2 / 100 = 183$
					$\sigma = 10 \cdot \left(\frac{183}{99} \right)^{\frac{1}{2}} = 13,6$	$V = 13,6 / 417 = 0,033$

принятая точность измерения случайной величины. В нашем случае $h = 1$.

При проведении расчетов целесообразно использование средств вычислительной техники с соответствующим программным обеспечением по статистическому анализу.

Основные расчетные формулы

$$M = A + K \cdot \frac{\sum f \cdot a}{n}; \quad S = \sum f \cdot a^2 - \frac{(\sum f \cdot a)^2}{n};$$

$$\sigma = K \cdot \left(\frac{S}{n-1} \right)^{\frac{1}{2}}; \quad V = \frac{\sigma}{M}; \quad a = \frac{W_i - A}{K},$$

где a — условные отклонения классов, выраженные в классовых промежутках; A — условная средняя (середина модального или близкого к нему класса), принимаем $A = 420$; K — величина классового промежутка ($K = 10$); n — объем выборки, $n = 100$.

Пример 2. Построение нормального закона распределения случайной величины по данным выборки.

За исходные данные принимаем данные выборки, представленные в примере 1.

Таблица 3.5

Выравнивание эмпирического ряда ($M = 417$; $\sigma = 13,6$; $V = 0,033$) по нормальному распределению

Середи- ны классов, W	Эмпи- риче- ские частоты, f	Величи- на разно- сти, $W - M$	Нормиро- ванное отклоне- ние, $x = \frac{W - M}{\sigma}$	Вели- чина функ- ции, $f(x)$	Теоретиче- ские частоты	
					$\frac{n \cdot K}{\sigma} \cdot f(x)$	f
1	2	3	4	5	6	7
450	1	+33	2,43	0,021	1,5	1
440	7	+23	1,69	0,096	7,1	7
430	20	+13	0,96	0,252	18,5	18
420	30	+3	0,22	0,389	28,6	29
410	25	-7	0,51	0,350	25,7	26
400	10	-17	1,25	0,183	13,5	14
390	6	-27	1,99	0,055	4,0	4
380	1	-37	2,72	0,010	0,7	1

Выравниваем частоты по нормальному закону распределения, т. е. теоретические частоты определяем по следующему выражению:

$$f' = \frac{n \cdot K}{\sigma} \cdot \phi(t),$$

где f' — теоретическая частота; n — объем выборки (ряда); K — классовый промежуток; σ — среднеквадратическое отклонение; $\phi(t)$ — нормированная центрированная функция (см. параграф 3.4, нормальный закон распределения).

Пример 3. Проверка соответствия эмпирического и теоретического распределений.

Оценку произведем по критерию χ^2 , величину которого рассчитаем по выражению

$$\chi^2 = \sum \frac{(f - f')^2}{f'} < \chi_{kp}^2,$$

где χ_{kp}^2 — критическое значение критерия.

Определим первичные и вторичные числа степеней свободы соответственно K_1 и K_2 по выражениям

$$K_1 = r_1 - s - 1;$$
$$K_2 = r_2 - s - 1,$$

где r_1, r_2 — число классов до и после редукции (объединения) классов с малыми теоретическими частотами; s — число оцененных параметров распределения.

Крайние классы с частотой $f < f'_{min}$ объединяются с соседними классами. Здесь f'_{min} — минимально допустимая теоретическая частота крайних классов в зависимости от начального числа степеней свободы.

В приближенном виде для инженерной оценки различий зависимости величины K_1 от f'_{min} приведены в табл. 3.6.

Различия эмпирического и теоретического распределений могут считаться не значимыми, если эмпирический критерий не достигает теоретического (критического).

Следует ориентироваться на три уровня значимости ($0,05; 0,01; 0,001$), каждому из которых соответствует свое значение χ^2 (табл. 3.7).

Исходные данные для оценки различия распределений для нормального закона представлены в табл. 3.8.

Таблица 3.6

Зависимость значений K_1 , от величины f_{\min}

K_1	1	2	3–6	св. 6
f_{\min}	4	2	1	0,5

Таблица 3.7

Стандартные значения критерия χ^2

$K_{1,2}$	χ_1^2	χ_2^2	χ_3^2	$K_{1,2}$	χ_1^2	χ_2^2	χ_3^2
3	7,8	11,3	16,3	12	21,0	26,2	32,9
4	9,5	13,3	18,5	13	22,4	27,7	34,5
5	11,1	15,1	20,5	14	23,7	29,1	36,1
6	12,6	16,8	22,5	15	25,0	30,6	37,7
7	14,1	18,5	24,3	16	26,3	32,0	39,3
8	15,5	20,1	26,1	17	27,7	33,4	40,8
9	16,9	21,7	27,9	18	28,9	34,8	42,3
10	18,3	23,2	29,6	19	30,1	36,2	43,8
11	19,7	24,7	31,3	20	31,4	37,6	45,3

Таблица 3.8

Исходные данные примера

Середина классов, W	Эмпирические частоты, f	Теоретические частоты, f'	Разность, $f - f'$	Квадрат разности, $(f - f')^2$	Значение критерия, $(f - f')^2/f$
450	1	1,5	0,5	0,25	0,167
440	7	7,1	0,1	0,01	0,001
430	20	18,5	1,5	2,25	0,122
420	30	28,6	1,4	1,96	0,069
410	25	25,7	0,7	0,49	0,019
400	10	13,5	3,5	12,25	0,907
390	6	4,0	2,3	5,29	1,126
-380	1	0,7	—	—	—
—	$\Sigma = 100$	$\Sigma = 94,6$	—	—	$\Sigma = 2,411$

Число классов до и после редукции и соответствующее первичное и вторичное число степеней свободы будет

$$K_1 = 8 - 3 = 5;$$

$$K_2 = 7 - 3 = 4.$$

Минимально допустимая теоретическая частота крайних классов $f'_{\min} = 1$.

Согласно табл. 3.7 критерий согласия, соответствующий трем уровням значимости, равен:

$$\chi^2_{kp} = \{9,5; 13; 3; 18; 5\}$$

Первое, второе и третье значения χ^2 соответствуют большой, обычной и малой ответственности исследований.

В нашем случае различия между эмпирическим и теоретическим распределениями незначимы (случайны), так как $\chi^2 = 2,41 < 9,5$.

Эмпирический ряд наработок до отказа (см. табл. 3.1) с большой вероятностью можно считать соответствующим нормальному распределению.

Пример 4. Определение гамма-процентного ресурса бензомоторной пилы.

Определить гамма-процентный ресурс бензомоторной пилы МП-5 («Урал»), если испытано девять пил и зафиксированы следующие ресурсы (в часах): 148, 190, 201, 260, 438, 458, 478, 541, 598.

При нормальном законе распределения ресурса гамма-процентный ресурс ($T_{p\gamma}$) определяется по выражению

$$T_{p\gamma} = T_p - U_\gamma \cdot \sigma,$$

где U_γ — гамма-процентный квантиль нормального распределения (согласно табл. 3.9).

При экспоненциальном законе распределения ресурса гамма-процентный ресурс определяется по выражению

$$T_{p\gamma} = Z_\gamma \cdot T_p,$$

где Z_γ — квантиль экспоненциального распределения.

В результате обработки исходных данных ресурсных испытаний бензомоторной пилы «Урал» имеем: величина среднего ресурса — 362 ч, среднеквадратическое отклонение — 173,86 ч, коэффициент вариации ресурса 0,48.

При нормальном распределении ресурса и $U_\gamma = 0,842$ имеем

$$T_{p80} = 362 - 0,842 \cdot 173,86 = 215,61 \text{ ч.}$$

Квантили нормального и экспоненциального распределений

Регламентированная вероятность	U_γ	Z_γ	Регламентированная вероятность	U_γ	Z_γ
0,80	0,842	0,223	0,90	1,282	0,105
0,81	0,878	0,221	0,91	1,341	0,094
0,82	0,915	0,198	0,92	1,405	0,083
0,83	0,954	0,186	0,93	1,476	0,073
0,84	0,994	0,174	0,94	1,555	0,062
0,85	1,036	0,163	0,95	1,645	0,051
0,86	1,080	0,151	0,96	1,751	0,041
0,87	1,126	0,139	0,97	1,881	0,031
0,88	1,126	0,128	0,98	2,054	0,020
0,89	1,227	0,117	0,99	2,326	0,010

При экспоненциальном распределении ресурса и $Z_g = 0,223$ (табл. 3.9) находим

$$T_{p80} = 362 \cdot 0,223 = 80,73 \text{ ч.}$$

Пример 5. Определение величины показателя безотказности объекта с оценкой точности результата.

Исходные данные: испытания объекта ведутся до получения заданного числа отказов. Конкретные исходные данные приведены в табл. 3.10.

Объем выборки $n = 77$; $A = 126$ (условная средняя величина срединного или близкого к нему класса); $K = 36$ (величина классового промежутка).

Средняя наработка (T) на отказ будет

$$T = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n t_i = 66 \text{ моточасов.}$$

Дисперсия равна

$$\sigma^2 = \frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (t_i - T)^2 = 4915 \text{ моточасов.}$$

Исходные данные (результаты испытаний)

Выборка наработки на отказ испытываемых объектов	Классы		Частота (f)	Отклонение $\alpha = \frac{W_i - A}{K}$	Произведение ($f \cdot \alpha$)	Произведение ($f \cdot \alpha^2$)
	Границы	Середина ((W_i))				
179, 33, 54, 206, 251, 40, 178, 19, 81, 94, 119, 114, 74, 13, 58, 51, 59, 111, 66, 11, 30, 36, 11, 160, 138, 322, 31, 35, 60, 19, 59, 109, 214, 37, 11, 17, 11, 133, 75, 62, 18, 90, 83, 12, 67, 32, 17, 89, 39, 48, 79, 58, 15, 57, 43, 84, 23, 10, 41, 46, 108, 22, 6, 36, 23, 42, 55, 96, 11, 83, 49, 5, 10, 124, 48, 13, 15.	216–252	234	2	3	6	18
	180–215	198	4	2	8	16
	144–179	162	3	1	3	3
	108–143	126	9	0	0	0
	72–107	90	8	-1	-8	8
	36–71	54	23	-2	-46	92
	0–35	18	28	-3	-84	252

Среднеквадратическое отклонение:

$$\sigma = \sqrt{\sigma^2} = 70 \text{ моточасов.}$$

Коэффициент вариации:

$$V = \frac{\sigma}{T} = \frac{70}{66} = 1,06.$$

Предполагая, что наработка на отказ распределяется по экспоненциальному закону, согласно [25] находим $T_b = T \cdot r_1 = 66 \cdot 1,17 = 77,22$ моточасов (верхняя доверительная граница).

$T_h = T \cdot r_3 = 66 \cdot 1,087 = 57,42$ моточасов (нижняя доверительная граница).

Здесь r_1 и r_3 — коэффициенты, величина которых определяется по табл. 6 Приложения.

Величина абсолютной погрешности:

$$|T_b - T| = 11,22 \text{ моточасов}$$

$$\text{и } |T_h - T| = 8,58 \text{ моточасов.}$$

Принимаем $\delta = 11,81$ моточасов. Относительная ошибка:

$$\varepsilon = \frac{\delta}{T} = \frac{11,22}{66} = 0,17 \text{ или } 17\%.$$

3.7.

ПРИМЕНЕНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ ЗНАЧЕНИЙ ДЛЯ ОЦЕНКИ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ

Рассмотрим случайную выборку объемом n , взятую из бесконечной генеральной совокупности X , имеющей функцию распределения $F(x)$: x_1, x_2, \dots, x_n .

Введем случайную величину Y_n , отражающую наименьшее значение элемента выборки

$$Y_n = \min(x_1, x_2, \dots, x_n).$$

Наряду с наименьшим можно рассмотреть и наибольшие значения выборки. Распределение наибольших или наименьших значений называется экстремальным.

Поскольку отказы (разрушения) конструкций связаны с существованием наиболее слабого элемента, то распределение экстремальных значений широко применяется. Приведем его вывод [19]:

$$P(Y_n > y) = P[(x_1 > y) \wedge (x_2 > y) \wedge \dots \wedge (x_n > y)].$$

В силу независимости выборки и так как $P(x_i \leq x) = F(x)$, имеем

$$\begin{aligned} P(Y_n > y) &= \prod_{i=1}^n P(x_i > y) = \\ &= \prod_{i=1}^n [1 - P(x_i \leq y)], \quad P(Y_n > y) = [1 - F(y)]^n. \end{aligned}$$

Тогда функция распределения и плотность распределения случайной величины Y_n имеет вид

$$G_n(y) = 1 - [1 - F(y)]^n, \quad -\infty < y < +\infty$$

и

$$g_n(y) = n f(y) [1 - F(y)]^{n-1}, \quad -\infty < y < +\infty. \quad (3.49)$$

Функция $g_n(y)$ в (3.49) называется плотностью распределения первой порядковой статистики в выборке объемом n .

Пример 6. Найдем $G_n(y)$ и $g_n(y)$ в случае экспоненциального распределения $F(x) = 1 - e^{-\lambda x}$; $f(x) = \lambda e^{-\lambda x}$; $x \geq 0$.

Подставляя в (3.49), получаем

$$G_n(y) = 1 - e^{-n\lambda y}, y \geq 0;$$

$$g_n(y) = n\lambda y^{-n\lambda y}, y \geq 0.$$

Плотность распределения $g_n(y)$ можно рассматривать как плотность экспоненциального распределения с параметром $n\lambda$.

Пример 7. Оценка вероятности прогорания жаровой трубы расчетным путем.

Применим для этих целей распределение экстремальных значений.

Даже новая жаровая труба (выхлопная труба автомобиля и др.) имеет на внутренней поверхности микроскопические дефекты. Горючие газы, пламя и другие вещества, вызывающие прогорание, увеличивают размеры этих дефектов и, в конечном счете труба разрушается.

Допустим, что для возникновения отказа достаточно одного отверстия.

Полагаем далее, что время образования отверстия T пропорционально разности между толщиной жаровой трубы и первоначальной глубиной каверны, т. е.

$$T = k(\Delta - D)$$

или $t_i = k(\Delta - d_i), i = 1, \dots, N,$ (3.50)

где Δ — толщина стенки жаровой трубы; D — глубина каверны, являющаяся случайной величиной; d_i — первоначальная глубина i -й каверны; t_i — время прогорания трубы от i -й каверны; N — количество дефектов (каверн); k — коррозионная стойкость для данного материала.

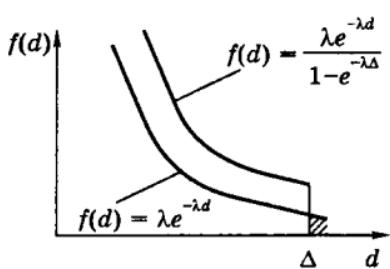


Рис. 3.7

Экспоненциальное и усеченное экспоненциальное распределения глубины каверны D

Пусть D — случайная величина, имеющая усеченное экспоненциальное распределение (рис. 3.7, формула (3.51)). Оно является таковым, так как размер каверны не может быть больше толщины трубы.

$$f(d) = \frac{\lambda e^{-\lambda d}}{1 - e^{-\lambda \Delta}}. \quad (3.51)$$

Определим вероятность превышения размера первона-
чального дефекта некоторого значения d

$$\begin{aligned} \Pr\{D \geq d\} &= \int_d^{\Delta} f(d) dd = \int_d^{\Delta} \frac{\lambda e^{-\lambda d}}{1 - e^{-\lambda \Delta}} dd = \frac{1}{1 - e^{-\lambda \Delta}} \int_d^{\Delta} \lambda e^{-\lambda d} dd = \\ &= \frac{1}{1 - e^{-\lambda \Delta}} \int_d^{\Delta} e^{-\lambda x} dx = \frac{e^{-\lambda d} - e^{-\lambda \Delta}}{1 - e^{-\lambda \Delta}}. \end{aligned} \quad (3.52)$$

Найдем функцию распределения времени до прогора-
ния трубы от произвольной каверны $G(t) = \Pr\{T \leq t\}$ (по
определению функции распределения).

Подставим в эту зависимость выражение (3.50).

Тогда имеем

$$\begin{aligned} G(t) &= \Pr\{T \leq t\} = \Pr\{k(\Delta - D) \leq t\} = \\ &= \Pr\left\{D \geq \Delta - \frac{t}{k}\right\} = \frac{e^{-\lambda(\Delta-t/k)} - e^{-\lambda\Delta}}{1 - e^{-\lambda\Delta}} = \frac{e^{\lambda t/k} - 1}{e^{\lambda\Delta} - 1}. \end{aligned} \quad (3.53)$$

Время безотказной работы трубы τ должно определять-
ся из условия $\tau = \min(t_1, \dots, t_N)$. Это время наискорейшего
прогорания или появления первой каверны, достигшей
критического размера Δ , наиболее слабого элемента.

В дальнейшем целесообразно определить функцию рас-
пределения времени (наработки) до отказа с использо-
ванием экстремальных распределений.

Напомним: Y_n — наименьшее значение исследуемой
случайной величины, т. е. $Y_n = \min(x_1, x_2, \dots, x_n)$ извест-
ной функции $F(x)$. Функция распределения наименьших
значений, т. е. случайной величины Y_n , имеет вид

$$G_n(y) = 1 - [1 - F(y)]^n. \quad (3.54)$$

В соответствии с этим находим вероятность отказа
 $H(\tau)$:

$$H(\tau) = \Pr\{\tau < \tau\} = G_N(\tau) = 1 - [1 - G(\tau)]^N. \quad (3.55)$$

При достаточно большом N имеем

$$H(\tau) \approx 1 - e^{-NG(\tau)}. \quad (3.56)$$

Подставляя в формулу (3.56) выражение (3.53) для $G(\tau)$
получаем

$$H(\tau) \approx 1 - \exp \left[-N \frac{e^{\frac{\lambda \tau}{k}} - 1}{e^{\lambda \Delta} - 1} \right].$$

Вероятность безотказной работы будет

$$R(\tau) = 1 - H(\tau) \approx \exp \left[-N \frac{e^{\frac{\lambda \tau}{k}} - 1}{e^{\lambda \Delta} - 1} \right].$$

Пример 8. Дано: толщина стенки жаровой трубы — $\Delta = 1,6$ мм; коррозионная стойкость $k = 4 \cdot 10^4$ ч/мм; число первоначальных дефектов (каверн) — $N = 10^4$; средняя глубина каверны в начале работы — $\bar{d} = 0,2$ мм.

Необходимо выяснить, при какой наработке обеспечивается вероятность безотказной работы в 90% (т. е. 90%-ная наработка до отказа).

Определим параметр λ .

Учитывая, что для экспоненциального закона распределения параметр λ обратно пропорционален математическому ожиданию (3.31) $\lambda = 1/\bar{d}$, имеем $\lambda = 1/0,2 = 5$ мм⁻¹.

$$R = 0,90 = \exp \left[-N \frac{e^{\lambda t/k} - 1}{e^{\lambda \Delta} - 1} \right] = \exp \left[\frac{10^4 (e^{5 \cdot t / 4 \cdot 10^4} - 1)}{e^{1,6 \cdot 5} - 1} \right],$$

отсюда $t_{90\%} = 242$ ч.

3.8. ОЦЕНКА ВЕРОЯТНОСТИ БЕЗОТКАЗНОЙ РАБОТЫ ПРИ ДЕЙСТВИИ ОДНОКРАТНОЙ НАГРУЗКИ

Обозначим s — действующие напряжения; S — характеристика прочности (например, предел прочности); $f_s(s)$, $f_S(S)$ — плотность их распределения (рис. 3.8).

Тогда вероятность безотказной работы будет иметь вид

$$R = P(S > s) = P(S - s > 0).$$

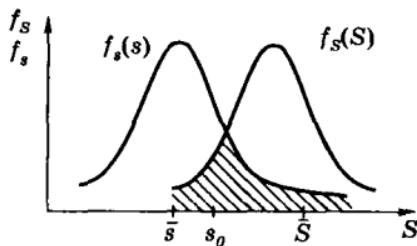


Рис. 3.8

Плотности распределений действующих напряжений и характеристики прочности

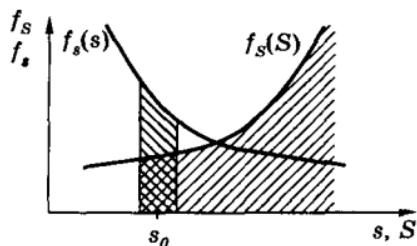


Рис. 3.9

К определению вероятности безотказной работы

Заштрихованный участок определяет зону, где $s > S$, т. е. вероятность отказа.

Вероятность того, что некоторое напряжение находится в определенном интервале, равна

$$P\left(s_0 - \frac{ds}{2} \leq S \leq s_0 + \frac{ds}{2}\right) = f_S(s_0)ds. \quad (3.57)$$

Вероятность того, что прочность S превышает некоторое значение s_0

$$P(S > s_0) = \int_{s_0}^{\infty} f_S(S)dS. \quad (3.58)$$

На рис. 3.9 вышеуказанные вероятности обозначены штриховкой.

Вероятность значения напряжения заключена в малом интервале ds , а прочность S превышает напряжение, задаваемое этим интервалом; при условии, что случайные величины независимы, имеет вид

$$f_s(s_0)ds \int_{s_0}^{\infty} f_S(S)dS. \quad (3.59)$$

Вероятность безотказной работы — это возможность превышения характеристики прочности напряжения для всех его значений

$$R = \int_{-\infty}^{\infty} f_s(S) \left[\int_s^{\infty} f_S(S)dS \right] dS. \quad (3.60)$$

Для случая нормального распределения, например

$$f_s(s) = \frac{1}{\sigma_s \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{s - \bar{s}}{\sigma_s} \right)^2 \right];$$
$$f_S(S) = \frac{1}{\sigma_S \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{S - \bar{S}}{\sigma_S} \right)^2 \right]. \quad (3.61)$$

$$\begin{aligned} R &= P(S - s > 0) = 1 - \Phi(Z) \\ Z &= -\frac{\bar{S} - \bar{s}}{\sqrt{\sigma_S^2 + \sigma_s^2}} \end{aligned} \quad (3.62)$$

где Φ — табулированная функция Лапласа

$$\Phi(Z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^Z e^{-\frac{t^2}{2}} dt. \quad (3.63)$$

ИСПЫТАНИЯ НА НАДЕЖНОСТЬ

4.1.

МЕТОДЫ ИСПЫТАНИЙ И КОНТРОЛЯ НАДЕЖНОСТИ. ПЛАНЫ ИСПЫТАНИЙ

Испытание машин предусматривается с момента разработки и постановки их на производство до момента снятия с серийного производства.

В процессе разработки технической документации на изделие выбор и проверка новых технических решений должны осуществляться с использованием результатов лабораторных, стеновых и других исследовательских испытаний макетных, экспериментальных и опытных образцов создаваемой машины и ее составных частей. Они должны имитировать реальные условия эксплуатации машины, если проводятся не в реальных производственных условиях.

Объем и содержание испытаний, необходимых для предотвращения постановки на производство недостаточно надежной продукции, определяет разработчик совместно с заказчиком или приемочная комиссия.

Для подтверждения готовности производства к серийному выпуску машин изготовитель проводит квалификационные испытания образцов установочной серии (первой промышленной партии). Они проводятся также при постановке на производство продукции, ранее освоенной на другом предприятии. Объем квалификационных испытаний, например для тракторов, составляет

порядка 500–600 моточасов в эксплуатационных условиях, в то время как при приемочных испытаниях требуется подтверждение ресурса трактора или машины. Результаты квалификационных испытаний, как и приемочных, оформляются актом.

Цель испытаний на надежность — определение показателей, характеризующих ее свойства. Различают определительные (исследовательские) и контрольные испытания.

Определительные испытания позволяют оценить абсолютную величину показателя надежности, например истинную величину ресурса конкретного изделия, которая может быть больше нормативной или заданной заводом-изготовителем.

Контрольные испытания позволяют оценить уровень надежности раньше, чем все испытываемые объекты достигнут предельного состояния.

Полученные по результатам испытаний показатели надежности сравниваются с величинами, предусмотренными нормами или заложенными в технических условиях (ТУ) или в карте уровня (КУ) испытываемой машины.

Контроль нормируемых показателей надежности должен включать:

- получение и математическую обработку исходных данных;
- принятие решения о соответствии или несоответствии изделий установленным требованиям;
- анализ причин и последствий отказов с целью разработки мероприятий по повышению надежности изделий.

В зависимости от способа получения исходных данных методы контроля показателей надежности подразделяют на расчетные, экспериментальные и расчетно-экспериментальные. Экспериментальные методы основаны на использовании статистических данных, получаемых при испытаниях изделий на надежность, или данных опытной подконтрольной эксплуатации. Экспериментальные методы являются основными для контроля показателей надежности.

Расчетные методы основаны на вычислении показателей надежности по следующим данным: о надежности его составных частей с учетом функциональной структуры

изделия и видов разрушения; о надежности изделий-аналогов, по результатам экспертной оценки; о свойствах материалов, элементов изделий и нагрузках на них; о механизме отказа, а также другой информации, имеющейся к моменту расчета надежности.

Расчетно-экспериментальные методы основаны на вычислении показателей надежности по исходным данным, определяемым экспериментальными методами.

При контроле конкретных показателей надежности все зафиксированные отказы объектов подразделяют на учитываемые и не учитываемые.

Не учитываемыми отказами являются — зависимые отказы; вызванные нарушениями инструкции по эксплуатации; возникшие после отработки нормативного ресурса. Все остальные отказы — учитываемые, которые принимаются во внимание при оценке показателей надежности.

Программы и методики испытаний на надежность не должны содержать положения, разрешающие выполнение в процессе испытаний наладочных, настроечных, регулировочных и других работ, не предусмотренных эксплуатационной документацией.

Таблица 4.1

**Источники экспериментальной информации
о надежности на различных стадиях жизненного цикла
машин и оборудования**

Стадия жизненного цикла изделия	Источник основной информации	Источник дополнительной информации
Исследование и обоснование разработки, разработка изделия	Предварительные испытания	Испытания и эксплуатация изделия-прототипа, изделий-аналогов
	Приемочные испытания	Исследовательские испытания изделия-прототипа, изделий-аналогов; доводочные испытания
Производство	Квалификационные, периодические, типовые и самостоятельные	Предыдущие приемо-сдаточные и приемочные испытания. Типовые испытания изделия или его модернизированных частей. Эксплуатация изделия. Испытания и эксплуатация изделия-прототипа
Эксплуатация	Эксплуатационные испытания	Испытания и эксплуатация изделия-прототипа, изделий-аналогов



Рис. 4.1

Основные методы и виды испытаний по контролю надежности машин и оборудования

Техническое обслуживание и текущий ремонт должны проводиться в соответствии с требованиями эксплуатационной и ремонтной документации. Результаты испытаний оформляются актом (отчетом). В табл. 4.1 представлены источники информации о надежности машин на различных стадиях их жизненного цикла.

Основные методы и виды испытаний по контролю надежности машин и оборудования представлены на рис. 4.1.

Испытания изделий на надежность на этапе серийного производства проводятся в составе как периодических испытаний по контролю нормативных (заданных) показателей, так и типовых заводских испытаний по определению абсолютных показателей надежности изделий.

В методику испытаний включают: метод и планы испытаний; число испытываемых изделий; правила их отбора для испытаний; порядок учета и статистического анализа отказов; порядок выявления причин отказов; поряд-

док проведения технического обслуживания и текущего ремонта.

Периодичность контрольных эксплуатационных испытаний устанавливают с учетом возможности завершения предыдущего цикла испытаний к началу следующего. Число изделий, поставляемых на испытания, определяется по специальной методике.

В отчете (протоколе, акте) о результатах контроля показателей надежности изделия приводят:

- выводы о соответствии или несоответствии изделия требованиям к надежности и значения достигнутых показателей;
- перечень и характеристику отказов составных частей, наблюдавшихся в процессе испытаний;
- анализ причин отказов и предложения по их устранению;
- рекомендации по повышению надежности изделия, предложения по уточнению номенклатуры и расхода запасных частей.

В зависимости от целей и задач конкретизируются планы испытаний, характеристики некоторых из них, а также их термины представлены в табл. 4.2.

Кроме указанных в табл. 4.2, существуют планы испытаний: $[NUN]$, $[NRT]$, $[NU(r, T)]$, $[NR(r, T)]$, $[NMT]$,

Таблица 4.2

Термины и определения планов испытаний на надежность

Термин	Определение
План . $[NUT]$	План испытаний, согласно которому одновременно испытывают N объектов; отказавшие во время испытаний объекты не восстанавливают и не заменяют; испытание прекращают по истечении времени испытаний или наработки T для каждого не отказавшего объекта
План $[NMT]$	План испытаний, согласно которому одновременно испытывают N объектов; после каждого отказа объект восстанавливают; каждый объект испытывают до истечения наработки T
План $[NUr]$	План испытаний, согласно которому одновременно испытывают N объектов, отказавшие во время испытаний объекты не восстанавливают и не заменяют, испытания прекращают, когда число отказов или отказавших объектов достигло r

Термин	Определение
План [NM(r, T_{Σ})]	План испытаний, согласно которому одновременно испытывают N объектов; после каждого отказа объект восстанавливают; испытания прекращают, когда суммарное по всем объектам число отказов достигло r , или по истечении суммарного по всем объектам времени испытаний, или наработки T_{Σ} в зависимости от того, какое из этих условий выполнено ранее
План [NMr]	План испытаний, согласно которому одновременно испытывают N объектов; после каждого отказа объект восстанавливают; испытания прекращают, когда суммарное по всем объектам число отказов достигнет r
План [NRr]	План испытаний, согласно которому одновременно начинают испытания N объектов; отказавшие во время испытания объекты заменяют новыми, испытания прекращают, когда число отказавших объектов, суммарное по всем позициям, достигло r
План [NR(r, T)]	План испытаний, согласно которому одновременно начинают испытание N объектов; отказавшие объекты заменяют новыми, испытания прекращают, когда суммарное по всем позициям число отказавших объектов достигло r или по истечении времени испытаний или наработки T в каждой позиции в зависимости от того, какое из этих условий выполнено ранее

[NMT_{Σ}], [NUz], [NUS], [NRS], где буквы подразумевают следующие понятия: N — число объектов выборки; T — время испытаний или наработка; r — число отказов или отказавших элементов; T_{Σ} — суммарное время испытаний или суммарная наработка; S — принятие решения при последовательных испытаниях; U — невосстанавливаемые и незаменяемые объекты в случае отказа; R — не восстанавливаемые, но заменяемые в случае отказа объекты; M — восстанавливаемые при испытаниях в случае отказа объекты.

4.2. КОНТРОЛЬНЫЕ ИСПЫТАНИЯ ОБЪЕКТОВ НА НАДЕЖНОСТЬ

Контроль качества и надежности техники при изготовлении и ремонте — один из основных методов обеспечения ее работоспособности в эксплуатации.

В процессе производства действуют две группы факторов, которые приводят к снижению надежности.



Рис. 4.2
Структурная схема контроля надежности

Первая группа — это грубые нарушения норм технологического процесса изготовления или ремонта изделия. Вторая группа — непредусмотренные частичные изменения первоначальных свойств элементов, материалов.

При контроле надежности применяют выборочный (статистический) контроль. Проверяют из партии часть изделий и по ней принимают заключение о надежности всей партии.

Различают два вида статистического выборочного контроля надежности: контроль по альтернативному признаку и контроль по количественному признаку. На рис. 4.2 представлена структурная схема контроля надежности.

При контроле по альтернативному признаку все изделия в выборке разбиваются на две группы, годные и дефектные. При контроле по количественному признаку у каждого изделия при испытаниях определяют один или несколько параметров и оценку партии проводят по статистическим характеристикам распределения этих параметров.

При испытаниях на долговечность все изделия выборки доводят до предельного состояния, затем анализируют статистические характеристики наработки.

Итак, при контроле по альтернативному признаку основной характеристикой является доля дефектных изделий (q) в партии, т. е.

$$q = \frac{M}{N}, \quad (4.1)$$

где M — число дефектных изделий; N — общее число изделий в партии.

Рассмотрим случай одноступенчатого выборочного контроля. План контроля характеризуется объемом выборки n и приемочным числом c . В партии должно быть m дефектных изделий, причем $m < c$, иначе партию бракуют.

Вероятность приемки партии зависит от доли q дефектных объектов в партии. Оперативная характеристика контроля $P(q) = P(m < c)$, где $P(m < c)$ — вероятность того, что в выборке n число дефектных изделий m меньше c .

Зададим границы вероятности приемки партии: верхний уровень — $(1 - \alpha)$ и нижний — β , которым соответствуют доли дефектных изделий: $P(q_0) = 1 - \alpha$, $P(q_m) = \beta$, где q_0 , q_m — соответственно приемочный и браковочный уровни качества, α — вероятность забраковать партию с приемочным уровнем качества q_0 , β — вероятность принять партию с браковочным уровнем качества q_m .

Вероятности α и β называются соответственно риском изготовителя и риском потребителя и обычно принимаются равными $\alpha \approx \beta \approx (0,1-0,2)$. Графически величины вероятностей различных уровней дефектных объектов в исследуемой партии представлены на рис. 4.3. Величины q_0 и q_m должны удовлетворять условиям: $q_0 \geq q_{\text{ср}}$, $q_m \leq q_r$, где $q_{\text{ср}}$ — средняя доля дефектных изделий в нормально изготовленной партии, q_r — предельное значение числа дефектных изделий.

Для малых выборок ($n < 0,1N$) и малых долей дефектных изделий в партии ($q \leq 0,1$) вероятности равны

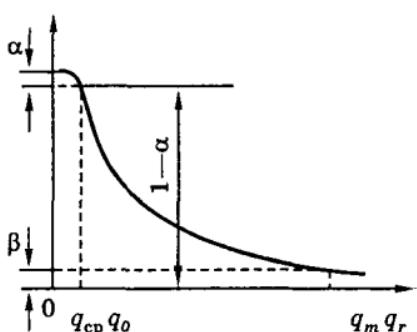


Рис. 4.3
Условия приемки
и выбраковки партии объектов

$$P(q) = e^{-nq}, \quad P(q_0) = e^{-nq_0},$$

$$P(q_m) = e^{-nq_m} = \beta.$$

Задавая α и β , можно рассчитать при заданном q_m необходимое число n объектов, которое следует испытать (в заданное время), и не получить ни одного отказа, а также определить приемочный уровень q_0 .

Пример 1. Дано: $\alpha = \beta = 0,1$, тогда $nq_0 = 0,105$; $nq_m = 2,3$.

Ориентируясь на браковочный уровень $q_m = 0,2$, получим: $n_m = 2,3/0,2 = 11,5$; при этом обеспечивается $q_0 = -0,105/11,5 = 0,01$. Итак, при контроле надежности следует испытать в течение гарантированного ресурса 11–12 изделий и не иметь при этом ни одного отказа. Такие испытания гарантируют 80%-ный ресурс партии изделий в эксплуатации в количестве не менее $N = n/0,1 = 110–120$ изделий. Верхний предел партии определяется стабильностью производства.

Рассмотрим контроль по *количественному* признаку, а именно случай, когда у каждого контролируемого изделия выборки n определяют один параметр, например наработку до отказа T_i . В качестве контролируемого параметра служит средняя наработка до отказа \bar{T} .

Закон распределения наработки полагаем нормальным с параметрами:

$$\bar{T} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n T_i; \quad (4.2)$$

$$\bar{\sigma} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (T_i - \bar{T})^2}. \quad (4.3)$$

Среднеквадратическое отклонение средней выборочной наработки до отказа равно

$$\sigma_{\bar{T}} = \frac{\bar{\sigma}}{\sqrt{n}}. \quad (4.4)$$

Обозначим: T_0 — величина средней наработки до отказа, при которой партия должна приниматься с вероятностью $1 - \alpha$; T_m — величина средней наработки до отказа, при которой партия должна приниматься с вероятностью β . При этом $T_0 > T_m$. Для контроля необходимо определить объем выборки n и приемочный норматив T^* . Если $\bar{T} \geq T^*$, то партия принимается. Вероятность приемки партии: $P(T) = P(\bar{T} \geq T^*)$. Риски изготовителя и потребителя соответственно будут

$$1 - \alpha = P(T_0); \quad (4.5)$$

$$\beta = P(T_m). \quad (4.6)$$

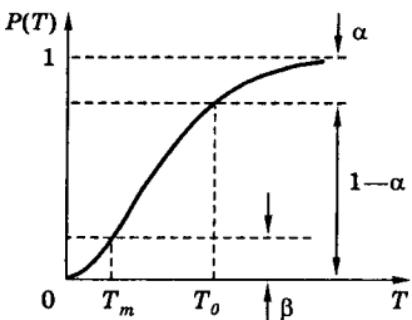


Рис. 4.4
Условия приемки и выбраковки партии объектов

Для нормального закона:

$$P(\bar{T} > T^*) = F_0\left(\frac{\bar{T} - T^*}{\sigma/\sqrt{n}}\right), \quad (4.7)$$

где F_0 — табулированная функция Лапласа.

На рис. 4.4 графически изображены условия приемки или выбраковки партии объектов.

Из рис. 4.4 имеем

$$1 - \alpha = F_0\left(\frac{T_0 - T^*}{\sigma/\sqrt{n}}\right); \quad (4.8)$$

$$\beta = F_0\left(\frac{T_m - T^*}{\sigma/\sqrt{n}}\right). \quad (4.9)$$

Введя квантили нормального распределения $U_{1-\alpha}$ и $U_{1-\beta}$, получим объем выборки (n) согласно следующему выражению:

$$n = \frac{\bar{\sigma}^2}{(T_0 - T_m)^2} [U_{1-\alpha} + U_{1-\beta}]^2. \quad (4.10)$$

Приемочный норматив можно записать как

$$\bar{T} \geq T^* = T_m + U_{1-\beta} \frac{\bar{\sigma}}{\sqrt{n}}. \quad (4.11)$$

Приведенные формулы справедливы для $n \geq 15 - 20$.

Пример 2. Дано: $T_m = 0,8T_0$; $\bar{\sigma} = 0,3T_0$; $\alpha = \beta = 0,1$. Требуется определить n и T^* .

Согласно вышеприведенным формулам имеем

$$U_{1-\alpha} = U_{1-\beta} = U_{0,9} = 1,28;$$

$$n = \frac{0,09 \cdot T_0^2}{T_0^2 (1 - 0,8)^2} [U_{1-\alpha} + U_{1-\beta}]^2 = 2,56 = 15;$$

$$T^* = 0,8 \cdot T_0 + 1,28 \frac{0,3T_0}{\sqrt{15}} = 0,9T_0.$$

Если найденное по 15 наблюдениям среднее время до отказа $\bar{T} > T^*$, то партию принимают с вероятностью $\beta = 0,1$.

Пусть $T_0 = 5000$ ч, тогда $T_m = 0,8 T_0 = 4000$ ч; $T^* = 0,9 T_0 = 4500$ ч. При этом длительность испытаний должна быть $(1,5 - 2,0)T_0$, если они проводятся до отказа всех 15 изделий.

Метод последовательного контроля не устанавливает заранее число изделий, которое следует поставить на испытания, их берется столько, сколько требуется для принятия решения: удовлетворяет партия объектов техническим условиям или нет. Метод основан на применении формулы Байеса для двух состояний. Пусть состояние D_1 удовлетворяет техническим условиям (ТУ), а D_2 — не удовлетворяет. Тогда при условии $(P(K/D_2))/(P(K/D_1)) > (1 - \beta)/\alpha$ объект относится к состоянию D_2 , т. е. не удовлетворяет требованиям, а при $(P(K/D_2))/(P(K/D_1)) < \beta/(1 - \alpha)$ объект относится к состоянию D_1 , т. е. удовлетворяет требованиям, при этом K — вектор признаков [11], [12].

В случае когда

$$\frac{\beta}{1 - \alpha} < \frac{P(K/D_2)}{P(K/D_1)} < \frac{1 - \beta}{\alpha}, \quad (4.12)$$

то решение принять нельзя, опытов проведено недостаточно, испытания надо продолжить.

Метод последовательного контроля существенно сокращает число объектов испытаний, так как в процессе контроля позволяет принимать решение о прекращении испытаний. Запишем расчетные формулы метода последовательного анализа для контроля объекта по среднему времени работы до отказа каждого объекта при нормальному законе распределения.

Введем параметры законов $\bar{T}_1, \sigma_1, \bar{T}_2, \sigma_2$, отвечающие двум граничным условиям удовлетворения ТУ (индекс 1) и неудовлетворения (индекс 2).

Осуществление контроля надежности по наработке на отказ осуществляется при последовательном испытании двух партий объектов одна за другой, так что в результате получаем значения наработок T_1 и T_2 .

Условие продолжения испытаний:

$$\ln \frac{\beta}{1 - \alpha} < n \ln \left(\frac{\sigma_1}{\sigma_2} \right) + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \left[\left(\frac{T_i - \bar{T}_1}{\sigma_1} \right)^2 - \left(\frac{T_i - \bar{T}_2}{\sigma_2} \right)^2 \right] < \ln \frac{1 - \beta}{\alpha}. \quad (4.13)$$

Условие неудовлетворения ТУ имеет вид

$$n \cdot \ln\left(\frac{\sigma_1}{\sigma_2}\right) + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \left[\left(\frac{T_i - \bar{T}_1}{\sigma_1} \right)^2 - \left(\frac{T_i - \bar{T}_2}{\sigma_2} \right)^2 \right] > \ln \frac{1-\beta}{\alpha}. \quad (4.14)$$

Условием удовлетворения ТУ является

$$n \cdot \ln\left(\frac{\sigma_1}{\sigma_2}\right) + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \left[\left(\frac{T_i - \bar{T}_1}{\sigma_1} \right)^2 - \left(\frac{T_i - \bar{T}_2}{\sigma_2} \right)^2 \right] < \ln \frac{\beta}{1-\alpha}. \quad (4.15)$$

С помощью полученных формул можно проводить контроль не только по средней наработке, но и по другим параметрам, например по средней скорости износа.

Пример 3. Заданы параметры нормального распределения скоростей изнашивания детали при ускоренных испытаниях для удовлетворения и неудовлетворения ТУ: $\alpha = \beta = 0,1$, $V_1 = 1,04 \cdot 10^{-3}$ мм/ч; $V_2 = 5,4 \cdot 10^{-3}$ мм/ч; $\sigma_1 = 0,18 \cdot 10^{-3}$ мм/ч; $\sigma_2 = 0,6 \cdot 10^{-3}$ мм/ч.

Вычислим границы $\ln \frac{1-\beta}{\alpha} = 2,2$; $\ln \frac{\beta}{1-\alpha} = -2,2$;

Проведено две серии опытов (для двух партий).

В первой серии (для первой партии) имеем $V_1^{(1)} = 2,1 \times 10^{-3}$ мм/ч.

Подсчитаем отношение правдоподобия:

$$\ln \frac{0,18}{0,6} + \frac{1}{2} \left[\left(\frac{2,1 - 1,04}{0,18} \right)^2 - \left(\frac{2,1 - 5,4}{0,6} \right)^2 \right] = 1,01.$$

Так как $-2,2 < 1,01 < 2,2$, то испытания следует продолжить.

Результат следующего испытания: $V_2^{(1)} = 2,2 \cdot 10^{-3}$ мм/ч.

Подсчитаем отношение правдоподобия:

$$2 \ln \frac{0,18}{0,6} + \frac{1}{2} \left[\left(\frac{2,1 - 1,04}{0,18} \right)^2 - \left(\frac{2,1 - 5,4}{0,6} \right)^2 \right] + \\ + \frac{1}{2} \left[\left(\frac{2,2 - 1,04}{0,18} \right)^2 - \left(\frac{2,2 - 5,4}{0,6} \right)^2 \right] = 6,35 > 2.$$

В этом случае партия бракуется.

Для второй партии результаты первого опыта были $V_1^{(2)} = 2,1 \cdot 10^{-3}$ мм/ч, т. е. также требовалось продолжить испытания. Второй опыт дал результат $V_2^{(2)} = 1,9 \cdot 10^{-3}$ мм/ч.

Отношение правдоподобия для двух опытов равно $(-5,69) < (-2,2)$, т. е. партия удовлетворяет ТУ.

Последовательный контроль безотказности машин по альтернативному признаку представляет собой расчетно-экспериментальный метод, основанный на вычислении показателей надежности по исходным данным, полученным в процессе контрольных эксплуатационных испытаний на надежность опытных или серийных образцов техники.

Метод ориентирован на план испытаний типа $[NM(rT_{\Sigma})]$, в котором участвуют N объектов, восстанавливаемых (M) в процессе испытаний. Работу заканчивают при достижении заданных чисел отказов (r) или наработки (T_{Σ}). Показатели надежности контролируют по альтернативному признаку, учитывающему риски потребителя и изготовителя ($\alpha = \beta = 0,2$). При расчете используют план последовательного контроля на основании предпосылок экспоненциального распределения наработки на отказ. Нормируемым показателем является средняя наработка на отказ. При последовательном контроле устанавливают число отказов, которое может быть зарегистрировано за определенную суммарную наработку объектов, находящихся на контрольных испытаниях.

Исходными данными для контроля наработка на отказ являются: приемочный уровень наработка на отказ — T_{α} ; браковочный уровень наработка на отказ — T_{β} ; риск изготовителя — α ; риск потребителя — β ; нормативные значения наработка на отказ — $T_{\text{норм}}$. В качестве браковочного уровня принимаем — $T_{\beta} = T_{\text{норм}}$. Примем соотношения между приемочным и браковочным уровнем равным $T_{\alpha} = 1,64 T_{\beta}$. На рис. 4.5 приведена для одного из видов машин зависимость продолжительности t_n испытаний от нормируемого значения безотказности T_{β} для различного количества образцов, а на рис. 4.6 представлен график последовательного контроля.

Рис. 4.5

Зависимость продолжительности испытаний t_n от значения T_β для:
 $1 - n = 1; 2 - n = 2; 3 - n = 3; 4 - n = 4$

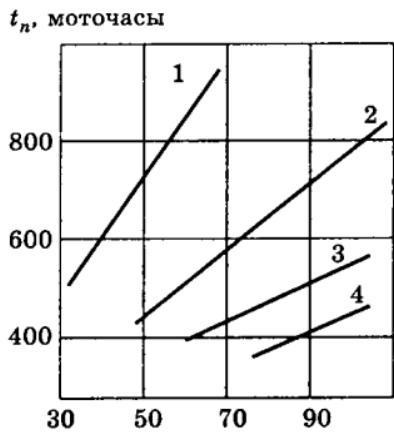


Рис. 4.6

График последовательного контроля

Графиком последовательных испытаний является ступенчатая линия, которая показывает изменение количества отказов испытываемых изделий в зависимости от их суммарной наработки.

В момент возникновения отказа график (рис. 4.6) имеет скачок по вертикали на одну единицу, далее линия идет параллельно оси абсцисс до момента возникновения следующего отказа. Результаты испытаний считают положительными, если ступенчатый график пересекает линию соответствия.

Использование расчетно-экспериментального метода можно проиллюстрировать на следующем примере. Для контроля средней наработки на отказ были испытаны два образца условной машины, для которых $T_{\text{норм}} = 70$ моточасов.

В процессе испытаний возникли отказы машин при следующих наработках: для машины 1 — 52, 103, 119, 165, 237, 274, 325, 378, 396 моточасов; для машины 2 — 62, 152, 169, 228, 233, 305, 356, 376 моточасов.

По плану последовательного контроля необходимо определить объем испытаний и принять решение о соответствии фактических показателей безотказности требованиям, установленным в нормативно-технической документации.

Согласно рис. 4.5 при $T_\beta = T_{\text{норм}} = 70$ моточасов для $n = 2$ максимальная наработка каждого образца должна

составлять около 565 моточасов. Ранее принято $\alpha = \beta = 0,2$; $T_\alpha = 1,64 \cdot T_\beta = 115$ моточасов.

Параметры плана испытаний определены согласно ГОСТ 27.410-87. «Методы контроля показателей надежности и планы контрольных испытаний на надежность» (табл. 5). По ним в прямоугольной системе координат (рис. 4.6) строим наклонные линии:

$$\text{некорректность (1)} r = dt_\Sigma/T_\alpha + r_0;$$

$$\text{корректность (2)} r = d(t_\Sigma/T_\alpha - t_0/T_\alpha),$$

где d — тангенс угла наклона линий соответствия или некорректности на графике последовательного контроля; t_Σ — суммарная наработка; r_0 — точка пересечения линии некорректности с осью ординат; t_0/T_α — относительное значение точки пересечения линии соответствия с осью абсцисс.

При $T_\alpha/T_\beta = 1,64$ и $\alpha = \beta = 0,2$ получим $d = 1,29$; $r_0 = 2,815$; $t_0/T_\alpha = 2,180$; предельное число отрицательных исходов при усеченном последовательном контроле $r_{yc} = 12$.

На графике последовательного контроля (рис. 4.6) в моменты возникновения отказа какой-либо одной или обеих машин по оси абсцисс откладывается отношение t_Σ/T_α .

Определим точки скачкообразного изменения графика последовательного контроля согласно данным, приведенным в табл. 4.3.

Таблица 4.3

Координаты (точки) скачкообразного изменения графика

t_1	t_2	t_Σ	t_Σ/T_α	t_1	t_2	t_Σ	t_Σ/T_α
52	39*	91	0,80	237	233	470	4,10
76*	61	137	1,19	274	270*	544	4,73
103	90*	193	1,68	315*	305	620	5,39
119	110*	229	1,90	325	317*	642	5,58
160*	152	312	2,70	371*	356	727	6,32
165	159*	324	2,81	378	366*	744	6,47
176*	169	345	3,00	386*	376	758	6,59
230*	228	458	3,98	396	380	776	6,75

* Наработка одной машины на момент отказа другой, т. е. наработка исправной машины.

Испытания могут быть прекращены после возникновения седьмого отказа, т. е. при наработке первой машины — 176 и второй — 169 моточасов. Таким образом, в данном примере фактическое значение средней наработки на отказ меньше установленного в технических условиях.

4.3. УСКОРЕННЫЕ ИСПЫТАНИЯ ОБЪЕКТОВ НА НАДЕЖНОСТЬ

Ускоренные испытания позволяют получить результаты испытаний в десятки раз быстрее, чем при эксплуатационных испытаниях. Ускоренные испытания проводятся на полигонах, стендах, в режиме «машина—стенд».

Ускоренным испытаниям подвергаются как машина в сборе, так и отдельные ее элементы, агрегаты.

Программа-методика ускоренных испытаний характеризуется режимом нагружения, видом испытательного сооружения. Режим ускоренных испытаний характеризуется видами входящих в него нагружений и их количественным соотношением между собой.

Соотношение между различными видами нагружения определяется из условия, что коэффициенты перехода от стендовых режимов нагружения к эксплуатационным для различных элементов изделия более единицы и максимально близки друг к другу.

В качестве программы нагружения может быть принято:

1. Воспроизведение полного спектра нагрузок (напряжений), зафиксированного в реальных условиях эксплуатации.

2. Воспроизведение только активной части спектра, вызывающей усталостные повреждения.

В качестве простейшего может быть использован режим с постоянной амплитудой напряжения ($\sigma_a = 0,8\sigma_{max}$). Частота приложения нагрузок может быть доведена до 100 Гц. Количество ступеней амплитуд нагрузки в блоке программы должно быть не менее 6–8. Количество блоков — не менее 12–20. Нижняя граница амплитуд напря-

жений в блоке программы должна составлять не менее $0,5\sigma_{-1}$ (половины предела выносливости симметричного цикла нагружения).

Процесс формирования трещин усталости в деталях при нестационарных циклических нагрузках описывается некоторыми гипотезами, в том числе теорией линейного суммирования повреждений:

$$\sum_{i=1}^r \frac{\bar{n}_i}{\bar{N}_i} = a, \quad (4.16)$$

где \bar{n}_i — среднее значение суммарного числа циклов, которое объект отработал при напряжении σ_i ; \bar{N}_i — среднее число циклов по кривой усталости объекта при амплитудах напряжений σ_i ; r — число ступеней в программе блока; a — предельная сумма повреждений.

Суммарное число циклов нагружений ($N_{\text{сум}}$) за срок службы равно

$$N_{\text{сум}} = T_{\text{сп}} \cdot Q \cdot \bar{f} \cdot 3600, \quad (4.17)$$

где $T_{\text{сп}}$ — планируемый срок службы объекта в годах; Q — среднее количество часов работы объекта в год; \bar{f} — средняя частота случайного процесса изменения нагрузки объекта, Гц; 3600 — коэффициент перевода часов в секунды.

Время действия повреждающих циклов ($T_{\text{повр}}$) напряжений в объекте при эксплуатации будет

$$T_{\text{повр}} = \frac{N_{\text{сум}}}{\bar{f}}. \quad (4.18)$$

Условие неразрушения объекта: $T_{\text{повр}} < T_{\text{пред}}$, т. е.

$$T_{\text{повр}} = T_{\text{пред}} \cdot k, \quad (4.19)$$

где $T_{\text{пред}}$ — средний ресурс или срок службы объекта; k — коэффициент запаса по долговечности,

$$k = n^m, \quad (4.20)$$

где n — коэффициент запаса прочности; $m = \operatorname{tg} \alpha$ — коэффициент, характеризующий угол наклона кривой усталости объекта.

Для определения долговечности металлоконструкции объекта необходимо знать предел ее выносливости (σ_{-1}):

$$\sigma_{-1} = \sigma_{\text{вр}} \cdot k \cdot k_1, \quad (4.21)$$

где $\sigma_{\text{вр}}$ — предел прочности материала, из которого сделан объект, МПа; k_1 — коэффициент, учитывающий влияние различных факторов на сопротивление усталости сварных конструкций.

Накопленная усталость в единицу времени является параметром усталости (D_i) и приближенно для сравнительной оценки может быть определена по выражению

$$D_i = \frac{N_i}{N_0 \cdot \sigma_{-1}^m} \int_{\sigma_{im}}^{\sigma_{\max}} \sigma^m \Phi'(\sigma) d(\sigma), \quad (4.22)$$

где D_i — параметр усталости от действия i -го цикла изменения напряжения; N_i — суммарное число i -го цикла изменения напряжения в металлоконструкции за один час или моточас работы объекта; $\Phi'(\sigma)$ — функция плотности вероятностей амплитуд напряжений.

Величина накопленного повреждения (D_0) металлоконструкции, находящейся под действием циклов нагружения нескольких видов за час или моточас работы, может быть найдена по зависимости:

$$D_0 = \sum_{i=1}^k t_i \cdot D_i, \quad (4.23)$$

где k — количество видов циклов напряжений в эксплуатации или на стенде; t_i — относительная продолжительность циклов нагружения i -го вида;

Эксплуатационные циклы воздействия нагрузок можно разделить на три группы:

- первую, имеющую высокое D , но небольшое t ;
- вторую, имеющую невысокое D , но большое t ;
- третью, практически не оказывающую повреждающее воздействия.

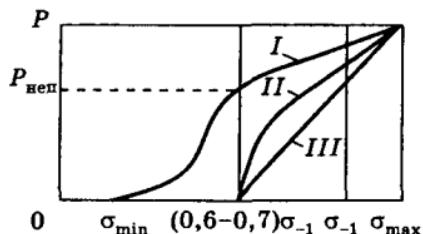
Варианты имитации эксплуатационных циклов нагружения представлены на рис. 4.7.

Металлоконструкция не получает повреждающее нагружение при амплитудах напряжений менее (0,6...0,7) предела ее выносливости — σ_{-1} .

Рис. 4.7

Варианты имитации эксплуатационных циклов нагружения при ускоренных испытаниях:

I — имитация полного эксплуатационного спектра напряжений; II — оптимальный вариант нагружения; III — форсированный (ужесточенный) режим испытаний; $P_{\text{неп}}$ — вероятность возникновения неповреждающих циклов нагружений.



Оптимальный вариант ускоренных испытаний — это воспроизведение на стенде только повреждающей части спектра амплитуд напряжения, когда вероятность неповреждающих циклов напряжения менее $0,7 \sigma_{-1}$ равна нулю ($P_{0,7\sigma_{-1}} = 0$).

Спектр такого варианта ускоренных испытаний должен быть подобен повреждающей части эксплуатационного спектра, т. е. отношение вероятностей возникновения каждого уровня напряжений в эксплуатации и при ускоренных испытаниях должно быть постоянно:

$$\frac{P_{y(\sigma_i)} - P_{\text{неп}}}{P_{y(\sigma_l)}} = \text{const} \quad \text{при } \sigma > (0,6 \dots 0,7)\sigma_{-1}, \quad (4.24)$$

где $P_{y(\sigma_i)}$, $P_{y(\sigma_l)}$ — вероятность возникновения напряжений с амплитудой от $(0,6 \dots 0,7)\sigma_{-1}$ до σ_{\max} соответственно в эксплуатации и при ускоренных испытаниях.

Единственное ограничение по напряжениям, которое можно осуществить при испытаниях по третьему варианту — это то, что наибольшие напряжения и их амплитуды при испытаниях не превышают наибольших эксплуатационных значений или превышают их не более чем на 10%.

Для спектров нагрузок, полученных при ускоренных испытаниях и в эксплуатации и соответствующих одному и тому же количеству технологических циклов, с использованием кривой выносливости вычисляются значения сумм относительного усталостного повреждения.

Отношение этих значений, соответствующих стендовому (a_{ju}) и эксплуатационному (a_{js}) режимам, является величиной переходного коэффициента (k_{nj}) для i -го элемента машины (агрегата, узла).

$$k_{nj} = \frac{a_{ju}}{a_{j\vartheta}}. \quad (4.25)$$

Коэффициент ускорения (K_y) испытаний есть отношение времени набора одинакового числа усталостных повреждений до разрушения элемента металлоконструкции при ускоренных испытаниях (T_u) и в эксплуатации (T_ϑ), т. е.

$$K_y = \frac{T_u}{T_\vartheta}. \quad (4.26)$$

В результате ускоренных испытаний в основном получают сравнительные показатели долговечности испытуемой конструкции. Для оценки показателей безотказности и ремонтопригодности предпочтительнее эксплуатационные испытания.

Для разработки методики ускоренных испытаний необходимы тензометрические исследования нагруженности и напряженности элементов машин в условиях рядовой эксплуатации, необходима разработка и изготовление испытательных стендов, полигонов.

На полиграонах, как правило, испытываются машины в сборе, для чего разрабатывается комплексная методика ускоренных испытаний с целью обеспечения нагруженности всех элементов машины подобно эксплуатационной. Тем не менее коэффициенты перехода и ускорения в этом случае могут значительно отличаться друг от друга. Испытание механических передач осуществляется на стенах, схожих по принципиальной конструкции со стенами, используемыми для обкатки агрегатов типа коробки передач.

Для испытаний металлоконструкций типа манипулятора требуется создание специальных стендов, основанных на применении механических или гидравлических нагрузжателей.

В определенных пределах ускорения испытаний можно достичь и при эксплуатационных испытаниях за счет сокращения всевозможных простоев и организации работы техники в три смены, однако наиболее эффективные ускоренные испытания, с коэффициентом ускорения до 30 раз, можно проводить только на специальных испытательных стенах.

4.4.

ВЫБОР РЕЖИМОВ УСКОРЕННЫХ ИСПЫТАНИЙ ЛЕСОЗАГОТОВИТЕЛЬНЫХ МАШИН

Выбор режимов нагружения для проведения стендовых или полигонных ускоренных ресурсных испытаний лесозаготовительных машин или их элементов, а также расчетная оценка их долговечности возможны только при наличии информации о нагруженности металлоконструкций машины при ее работе в реальных условиях эксплуатации.

Достоверная информация о нагруженности или напряженности элементов машин может быть получена только при наличии методики, определяющей:

- объем испытаний, который обеспечивает получение наиболее полной и представительной информации о процессах нагружения исследуемых деталей;
- условия эксплуатации, в которых проводятся испытания с целью получения нагрузочных режимов;
- способы регистрации нагрузок или напряжений и регистрирующую аппаратуру, позволяющую производить запись процессов нагружения достаточной продолжительности;
- способы обработки данных эксперимента и обрабатывающую анализирующую аппаратуру.

4.4.1.

ПОДГОТОВКА И УСЛОВИЯ ПРОВЕДЕНИЯ ИСПЫТАНИЙ

Объектом испытаний является опытный или серийный образец лесозаготовительной машины, соответствующим образом подготовленный к испытаниям. Подготовка машины заключается в выборе сечений элементов технологического оборудования, нагрузки и напряжения; в установке в этих сечениях тензорезисторов, их влагоизоляции и температурной компенсации; в изготовлении и установке специальных приспособлений (тензоболты, тензопальцы и т. д.), а также в размещении на объекте испытаний регистрирующей аппаратуры и источников питания.

Нагрузочные режимы агрегатов, узлов и деталей определяются при работе машины в типичных условиях, предусмотренных техническим описанием и инструкцией по эксплуатации испытываемого объекта.

Однако условия эксплуатации лесозаготовительных машин (даже машин одного типа) отличаются известным многообразием. На степень нагруженности и напряженности их металлоконструкций влияет множество факторов, а именно:

- тип насаждений;
- средний объем хлыста;
- запас древесины на единице площади;
- бонитет;
- квалификация оператора;
- почвенные, климатические и погодные условия различных районов страны.

Естественно, что по этой причине степень нагруженности и напряженности одноименных элементов машин, эксплуатируемых в разных условиях, окажется различной.

В настоящее время имеется весьма ограниченное количество данных о нагрузочных режимах металлоконструкций даже основных типов лесозаготовительных машин при их работе в условиях реальной эксплуатации. Получение таких данных применительно к различным условиям эксплуатации является достаточно сложной и трудоемкой задачей, требующей большого количества сил, средств и времени. Поэтому в настоящее время оценку долговечности металлоконструкций существующих лесозаготовительных машин следует проводить на основе нагрузочных режимов, полученных в «средних» условиях эксплуатации, типичных для данного типа машины.

Регистрация процессов нагружения производится при выполнении машиной реальных технологических циклов. При этом темп работы оператору заранее не задается, а определяется его квалификацией, возможностями машины и условиями лесосеки.

При необходимости в процессе испытаний постоянно фиксируются порода и диаметр обрабатываемых деревьев.

ев. Регистрирующую аппаратуру следует располагать непосредственно на объекте испытаний, обеспечив ее соответствующей защитой, что позволит исключить какое бы то ни было ограничение оператора в маневре.

4.4.2. ОБЪЕМ ИСПЫТАНИЙ

Процессы нагружения деталей машин в условиях их реальной эксплуатации в большинстве своем являются случайными и могут быть охарактеризованы определенным комплексом статистических характеристик. Поэтому обработка процессов нагружения и их дальнейшее использование для оценки долговечности конструкции должны проводиться на вероятностной основе.

Оценка долговечности конструкции с приемлемой для практики точностью может быть произведена лишь при использовании нагрузочных режимов, полностью характеризующих нагруженность конструкции в течение всего срока ее службы. Другими словами, длительность испытаний должна обеспечивать совпадение величин основных статистических характеристик (процесса нагружения), зарегистрированных в ограниченный отрезок времени, с величинами аналогичных характеристик процесса нагружения данной металлоконструкции в течение всего срока ее службы.

Работа большинства лесозаготовительных машин характеризуется определенной цикличностью, обусловленной последовательным выполнением однотипных технологических циклов. Вместе с тем нагрузочные режимы деталей могут значительно изменяться от цикла к циклу даже при работе машины в одинаковых условиях эксплуатации.

Очевидно, следует установить то минимально необходимое количество технологических циклов, выполнение которых обеспечивало бы получение достоверных и представительных нагрузочных режимов, характеризующих определенные условия эксплуатации данной машины.

Такое количество можно установить следующим образом. Производится регистрация процесса нагружения

одной из ответственных деталей при выполнении машиной ряда реальных технологических циклов в каких-то определенных эксплуатационных условиях (желательно в условиях, обеспечивающих наибольший разброс параметров нагружения). Вычисляются основные статистические характеристики полученных распределений нагрузки (или напряжений) таким образом, что первый результат относится к нагрузочному режиму, соответствующему первой группе технологических циклов, второй результат — первой и второй, третий — первой, второй и третьей и т. д. Путем последовательного сравнения результатов определяется момент, когда значения статистических характеристик обнаруживают стремление к статистической стационарности, т. е. дальнейшее увеличение количества информации не вызывает сколько-нибудь заметного изменения величин определяемых характеристик.

Вычисленное таким способом количество технологических циклов можно считать достаточным для случаев работы машины в любых других условиях эксплуатации, характеризующихся такой же или меньшей степенью разброса параметров нагружения детали от цикла к циклу.

4.4.3. РЕГИСТРАЦИЯ ПРОЦЕССОВ НАГРУЖЕНИЯ И ПРИМЕНЯЕМАЯ АППАРАТУРА

Экспериментальное определение статистических распределений нагрузок (или напряжений) и их характеристик предполагает ту или иную форму регистрации исследуемого процесса нагружения детали при работе машины в реальных условиях эксплуатации и последующую статистическую обработку результатов эксперимента.

Регистрация нагрузок или напряжений может производиться различными методами с применением самой разнообразной аппаратуры. И способы регистрации, и применяемая при этом аппаратура определяются целями и задачами проводимого исследования. Применяемая для этих целей аппаратура должна отвечать следующим требованиям:

1. Обладать необходимой надежностью, точностью и стабильностью при работе в интервале температур $-10\dots+40^{\circ}\text{C}$.

2. Иметь высокую чувствительность.
3. Иметь достаточную ширину диапазона измеряемых напряжений или нагрузок.
4. Обеспечивать непрерывную регистрацию информации в течение длительного времени.
5. Допускать автоматизацию процесса обработки получаемой информации.
6. Иметь стабильный нулевой уровень и постоянный коэффициент усиления в диапазоне амплитуд и частот исследуемых процессов.
7. Нелинейность амплитудной характеристики — не более 1%.
8. Иметь автономное питание и быть экономичной по энергопитанию.
9. Обладать высокими вибростойкими качествами.
10. Иметь малые габариты и вес.
11. Обеспечивать быстрый и удобный съем и установку на испытуемой машине.

Для оценки долговечности деталей необходимо обеспечить регистрацию процессов нагружения, соответствующих определенным условиям эксплуатации, за достаточно длительный промежуток времени. Для этой цели могут применяться различные приборы, оборудованные счетчиками для регистрации количества случаев нагружения на заданных уровнях нагрузки. Применяются также классификаторы и анализаторы различных типов. Преимущество этих приборов в том, что с их помощью информация о процессах нагружения подвергается первичной обработке в процессе испытаний. Недостатком же является то, что первичная обработка проводится каким-либо одним (иногда двумя) методами.

4.4.4. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА И ПРИМЕНЯЕМАЯ АППАРАТУРА

Нестационарные режимы нагружения деталей машин весьма многообразны, но для оценки долговечности детали их достаточно разделить по распределению общего числа циклов изменения нагрузки, по величинам амплитуд

и чередованию циклов с амплитудами различной величины в течение срока службы детали. Другими словами, необходимо представить случайный процесс в компактной цифровой или графической форме, удобной для использования при выборе режима ускоренных ресурсных испытаний и при экспериментальной или расчетной оценке долговечности детали.

Существует множество методов обработки экспериментальных данных, заключающихся в статистическом учете характерных элементов случайных процессов. При обработке их любым из представленных методов происходит потеря части информации о процессе. Получение наиболее полной информации обеспечивает метод корреляционного счета с заполнением соответствующих таблиц результатами первичной обработки методом размахов или полных циклов (парных размахов). Он позволяет учитывать не только изменение амплитуды, но и величины статической составляющей процесса.

Метод корреляционного счета заключается в том, что выделенные из процесса размахи или полные циклы различных величин заносятся в определенные клетки корреляционной таблицы в соответствии со значениями их экстремумов. Из нее можно одновременно получить ряды распределения максимумов, минимумов и амплитуд на среднем уровне статической составляющей, а также ряды распределения амплитуд на каждом уровне статической составляющей.

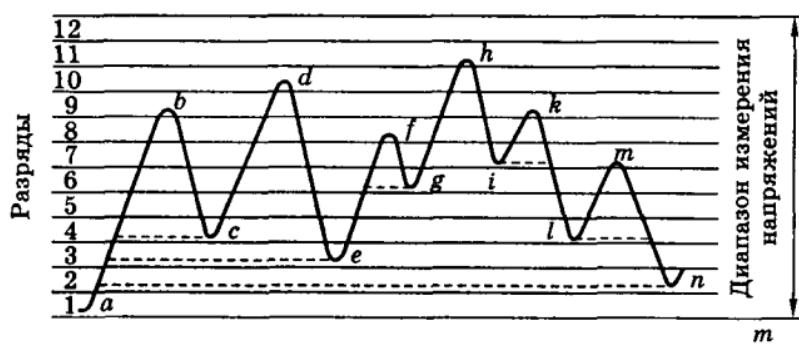


Рис. 4.8
Пример случайного процесса,
обрабатываемого методом полных циклов

Полученные из корреляционных таблиц ряды распределений амплитуд используются для выбора режима ускоренных ресурсных испытаний и оценки долговечности исследуемых конструкций. Сущность обработки случайного процесса методом полных циклов можно показать на следующем примере (рис. 4.8).

Анализируются первые четыре экстремума. Если в этой четверке промежуточный размах меньше обоих крайних, то выделяется полный цикл, соответствующий этому размаху. В данном случае $bc < ab$, $bc < cd$, поэтому может быть выделен полный цикл с размахом bc . Далее рассматривается четверка экстремумов $adef$. Здесь промежуточный размах больше одного из крайних ($de > ef$) и выделение полного цикла невозможно. Далее, рассмотрев четверку $defg$, из которой выделение полного цикла также невозможно, переходим к четверке cgh . Здесь может быть выделен полный цикл с размахом fg . Теперь следует вернуться к экстремумам a и d и рассмотреть четверку $adeh$, из которой можно выделить полный цикл с размахом de . Проходя таким образом по всей кривой нагрузления, будем последовательно исключать полные циклы с размахами ik , lm и, наконец, hn .

Следует отметить, что, помимо методов непосредственной схематизации случайных процессов, рассмотренных выше, большое значение имеют методы, основанные на спектральной теории. Полученные оценки спектральных плотностей позволяют судить о частотном составе случайного процесса. Спектральная теория применяется в основном для обработки стационарных случайных процессов.

4.4.5. ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАГРУЗОЧНЫХ РЕЖИМОВ ЛЕСОЗАГОТОВИТЕЛЬНЫХ МАШИН

Объект и условия испытаний.

В процессе испытаний по определению нагрузочных режимов обследованию подвергались стрела машины (рис. 4.9) и кронштейн рамы аутригеров (рис. 4.10). Размеры элементов оборудования указаны в мм.

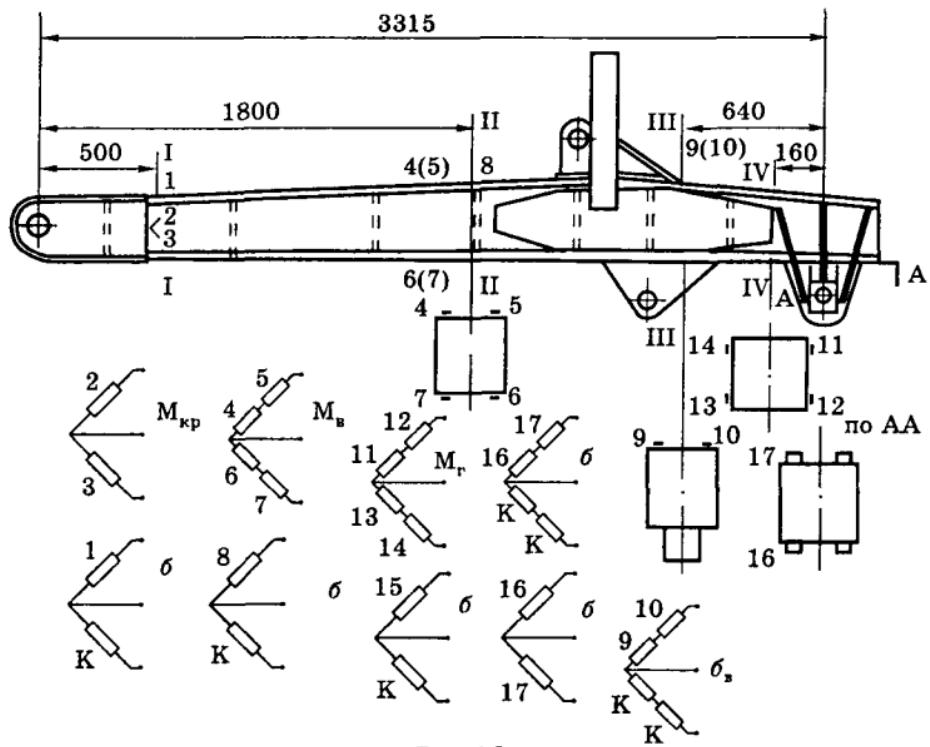


Рис. 4.9

Схема размещения тензорезисторов на стреле лесной машины

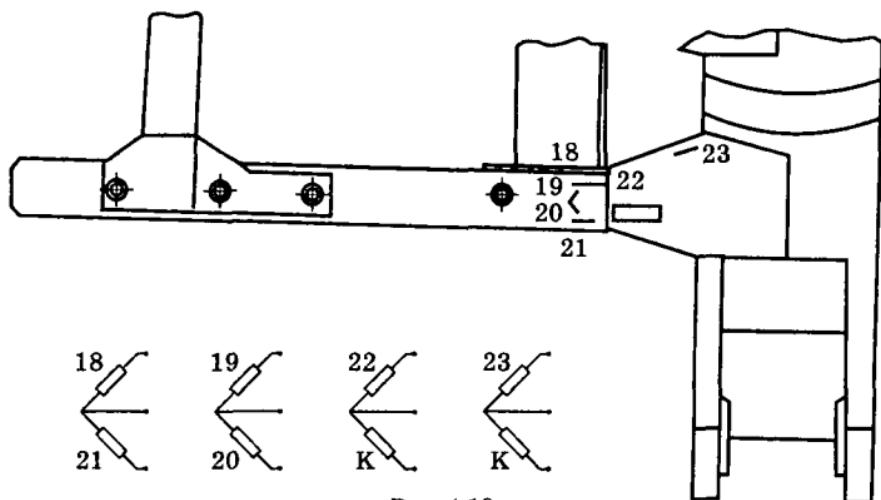


Рис. 4.10

Схема размещения тензорезисторов на кронштейне рамы аутригера

В сечении I верхней стрелы регистрировались крутящий момент M_{kp} (т. 2 и 3) и нормальные напряжения σ от всех видов нагрузки (т. 1). В сечении II — изгибающий момент в вертикальной плоскости (т. 4—7) — M_b и нормаль-

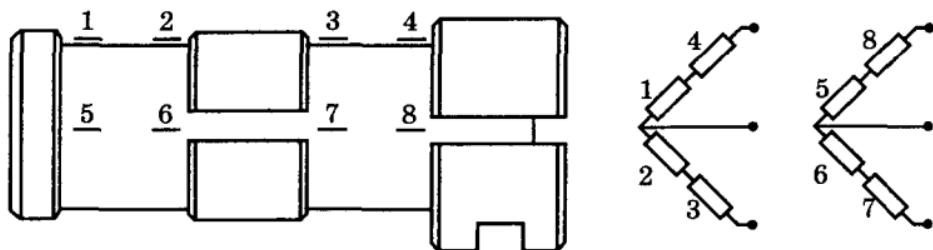


Рис. 4.11
Общий вид тензометрического пальца

ные напряжения от всех видов нагрузки (т. 8). В сечении III — нормальные напряжения от изгибающего момента, действующего в вертикальной плоскости (т. 9 и 10) σ_v . В сечении IV — изгибающий момент в горизонтальной плоскости (т. 11–14) M_r и нормальные напряжения от его действия (т. 15).

На кронштейне рамы аутригеров регистрировались крутящий момент (т. 19, 20 и 18, 21) и нормальные напряжения (т. 22, 23). Для определения изменений вертикальной и горизонтальной составляющих усилия на кронштейне рамы аутригеров был изготовлен тензометрический палец, общий вид которого и схема размещения на нем тензорезисторов приведены на рис. 4.11.

Нагрузочные режимы элементов технологического оборудования опытной лесной машины определялись при ее работе в реальных условиях эксплуатации в одном из лесозаготовительных предприятий.

Лес на разрабатываемом участке относился ко второму разряду высот со средним объемом хлыста — $0,27 \text{ м}^3$. Запас древесины на гектаре — 300 м^3 , состав лесонасаждений.— 7Е3Б.

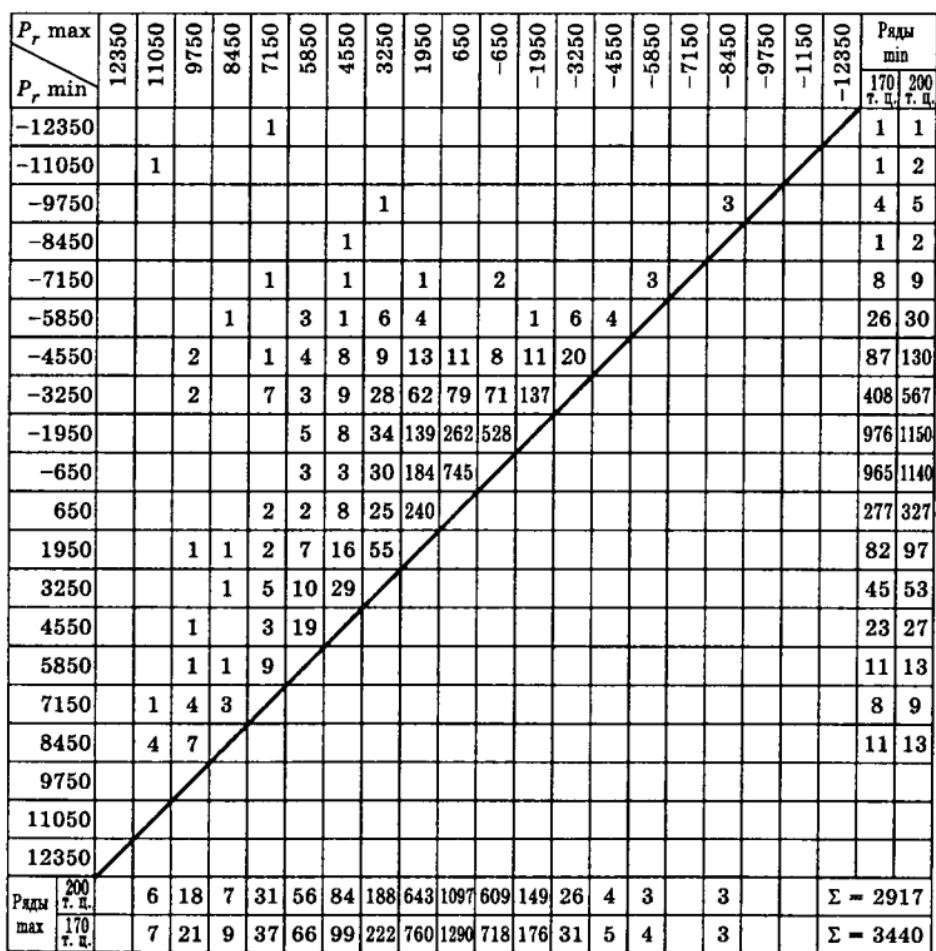
При обработке осциллограмм с записью процессов изменения нагрузки и напряжения в элементах металлоконструкций технологического оборудования лесной машины был использован метод корреляционного счета, позволяющий получить наибольший объем информации о нагруженности и напряженности обследуемых деталей.

При валке и пакетировании деревьев постоянно фиксировалась порода и диаметр деревьев на уровне груди. Используемая при испытаниях регистрирующая аппаратура

Рис. 4.12
Пример корреляционной таблицы

Деталь — стрела; условие испытаний — валка и пакетирование леса; количество технологических циклов — 170; нагрузка — горизонтальная на наружном конце стрелы.

Ряд распределения амплитуд (привед.), 200 технологических циклов				
№ п.п.	Величина амплитуд P_r / H	Частоты	Накоплен- ные частоты	Накоплен- ные частоты
1	1300	1785	3440	1,0000
2	2600	1271	1665	0,4815
3	3900	274	384	0,1113
4	5200	77	110	0,0120
5	6500	22	33	0,0096
6	7800	7	11	0,0032
7	9100	2	4	0,0002
8	10400	0	2	0,0006
9	11700	2	2	0,0006



обеспечивала возможность непрерывной регистрации нагрузок и напряжений в течение трех часов.

Экспериментально было установлено минимально необходимое количество технологических циклов, равное 35, выполнение которых обеспечивало получение достоверной и представительной информации о нагрузочных режимах исследуемых элементов конструкций.

При обработке осцилограмм диапазон изменения нагрузки и напряжений разбивался на 20 разрядов. Цена разряда составляла 20 МПа. Нулевое значение устанавливалось на границе между десятым и одиннадцатым разрядами. За положительное направление изменения напряжений принималось направление, соответствовавшее деформации обследуемого участка конструкции от растяжения. Корреляционные таблицы заполнялись результатами обработки процессов нагружения методом полных циклов.

В результате обработки осцилограмм были получены корреляционные таблицы, каждая из которых содержит информацию об изменении нагрузки или напряжений в каком-либо сечении стрелы или кронштейна рамы аутригеров и соответствует определенному числу технологических циклов. Ее образец показан на рис. 4.12.

Дальнейшая обработка заключалась в получении по каждой таблице статистических рядов распределения максимальных и минимальных значений нагрузки или напряжения и рядов распределения амплитуд, приведенных к симметричному циклу.

4.4.6. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РЕЖИМОМЕТРИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ

На основании полученных данных о нагруженности и напряженности испытываемых металлоконструкций строились дифференциальные кривые повторяемости максимальных значений нагрузки и напряжений (см. рис. 4.13), которые использовались для разработки блок-программы стендовых ресурсных испытаний элементов навесного оборудования.

Также было установлено количественное соотношение между величинами вертикальных и горизонтальных

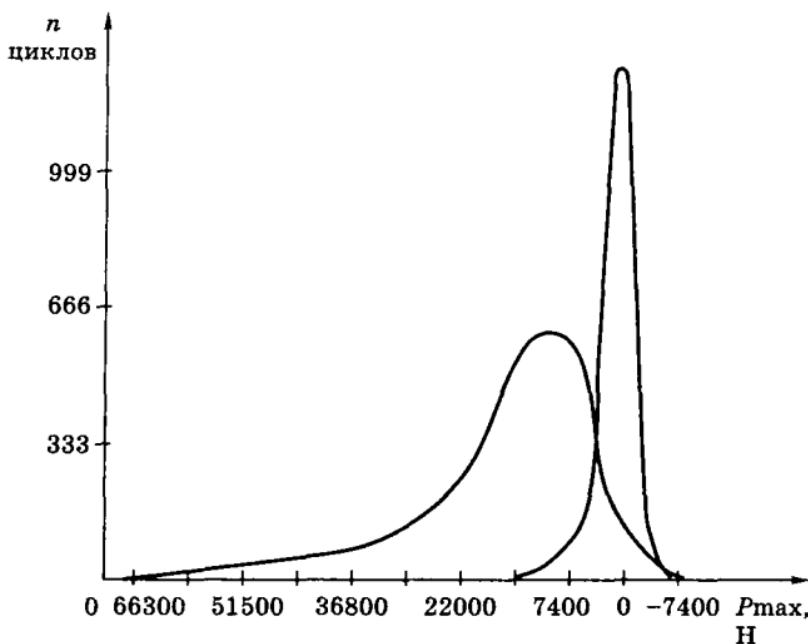


Рис. 4.13
Дифференциальные значения повторяемости максимальных значений на стреле машины

нагрузок, действующих на конец стрелы. Определено соотношение между величинами крутящего и изгибающего моментов, действующих в обследованных сечениях в двух взаимно перпендикулярных плоскостях. Были выявлены максимальные величины изгибающих моментов, действующих в расчетных сечениях стрелы в процессе эксплуатации, и установлено соотношение величин вертикальной и горизонтальной нагрузок, действующих на кронштейн рамы аутригеров.

Все это дало возможность установить виды и значения нагрузок, которые следует использовать при оценке долговечности обследованных элементов. Кроме этого, результаты испытаний позволяют разработать блок-программы стендовых ресурсных испытаний данных металлоконструкций. Основой для разработки блок-программ являются интегральные кривые повторяемости амплитуд нагрузки.

На рис. 4.14 изображена интегральная кривая распределения вертикальной нагрузки, действующей на палец рычага рамы аутригеров, на основе которой разработана программа стендовых нагрузений.

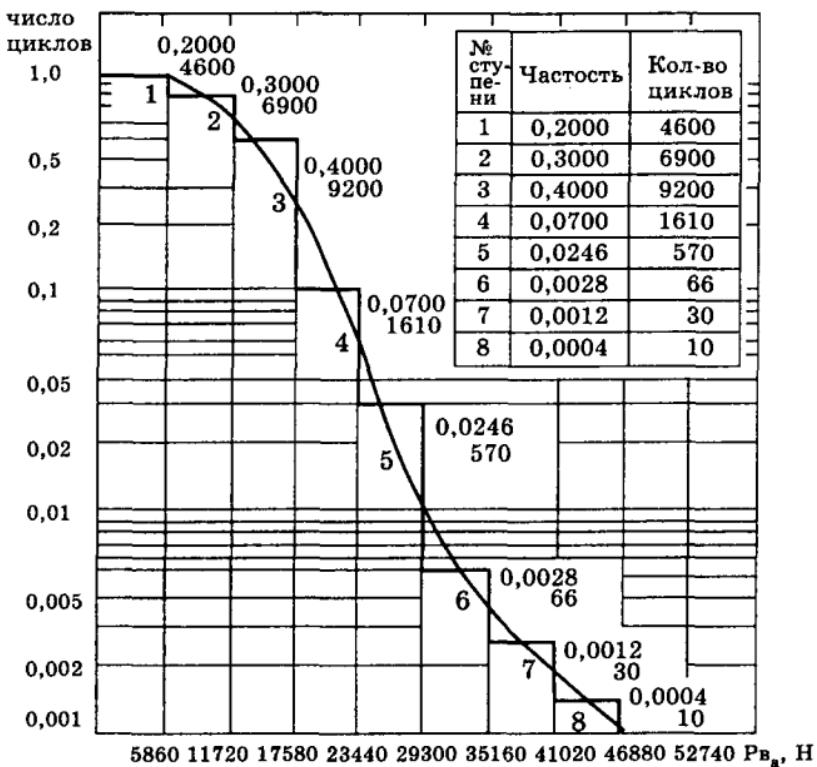


Рис. 4.14

Принцип программирования испытаний на долговечность пальца рычага рамы аутригеров лесной машины

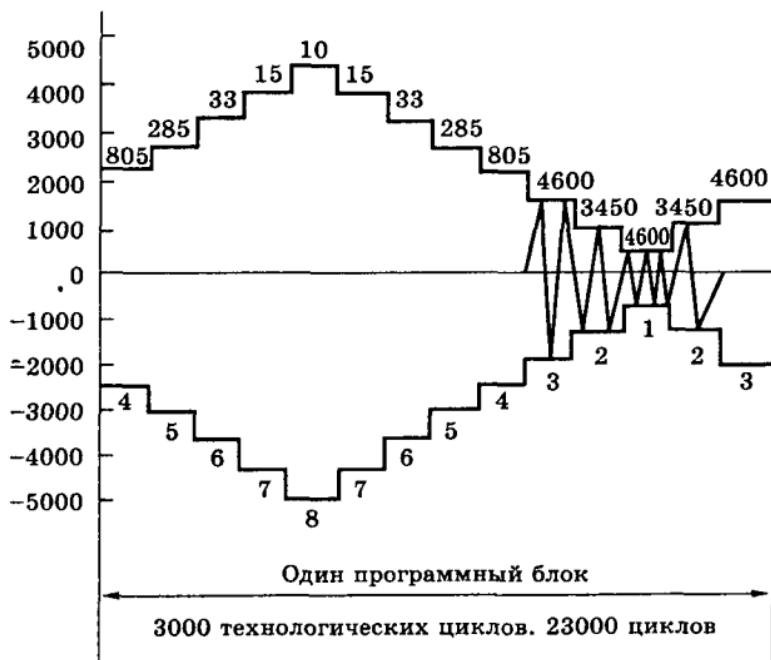


Рис. 4.15

Блок-программа стендовых испытаний на долговечность рычагов аутригеров лесной машины

Один блок программы (см. рис. 4.15) соответствует 3 тыс. технологических циклов. Параметры программ выбраны в соответствии с рекомендациями отечественных и зарубежных авторов. Начальным уровнем нагрузки в обоих случаях является промежуточная ступень 4. Далее следуют ступени с увеличивающейся амплитудой. За ними во второй части блока — нагрузки с уменьшающейся амплитудой. Количество ступеней нагружения было принято равным восьми.

Наименьшая амплитуда цикла изменения нагрузки, учтенная в программе, в первом случае равнялась 10 кН и во втором 5860 Н.

Поскольку зарегистрированные процессы нагружения приводились к симметричному циклу, то величина статической составляющей программного блока равна нулю.

4.5. ИССЛЕДОВАНИЕ БЕЗОТКАЗНОСТИ ДЕТАЛЕЙ ЛЕСОЗАГОТОВИТЕЛЬНЫХ МАШИН ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ

4.5.1. УСЛОВИЯ ЭКСПЛУАТАЦИИ И МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ РЕЗУЛЬТАТОВ

Исследования надежности лесных машин проведены Карельским НИИ лесной промышленности в условиях рядовой эксплуатации на опорных предприятиях Сукко-зерского, Ругозерского и Пяозерского леспромхозов. Леспромхозы расположены в различных районах Карелии и испытания охватывают широкий диапазон условий эксплуатации, характерных для севера европейской зоны России. По результатам испытаний судят о фактическом уровне надежности, осуществляют проверку адекватности расчетных методик, корректируют нормы расхода запасных частей и дают рекомендации по повышению надежности.

Сукко-зерский леспромхоз расположен в западной части Республики Карелия. Общая площадь его лесосырьевой базы составляет 145 тыс. га. Состав лесонасаждений — 6С3Е1Б + ед. Ос. Озерами и болотами занято 30% общей

эксплуатационной площади. Лесоэксплуатационная площадь лесосек представляет собой холмистые участки различных размеров и форм. Почвенные условия — суглинки с преобладанием камней, а в низких местах — торфянистые почвы. Рельеф местности пересеченный, при прокладке воловок встречаются подъемы и спуски до 20°. Средний запас на 1 га эксплуатационной площади — 119,4 м³, средний объем хлыста — 0,22–0,29 м³. Среднее расстояние трелевки — 300 м.

Лесосечные работы велись укрупненными и малыми комплексными бригадами. Основная форма технического обслуживания и ремонта — децентрализованная внутрисменная. Для всех лесозаготовительных машин принята трехномерная система технического обслуживания. В леспромхозе ежедневное обслуживание проводится оператором на месте стоянки машин перед началом рабочей смены. Обнаруженные неисправности устраняются оператором и рабочими ремонтно-профилактической бригады.

Пяозерский леспромхоз расположен на севере, в Лоухском районе Карелии. Особенностью территории является преобладание в ней сырых и переувлажненных мест, вследствие чего эти участки отнесены в зону зимней эксплуатации. Сыревая база ЛПХ находится в лесном фонде Кестеньгского и частично Калевальского лесхозов на общей площади 696,6 тыс. га. Средний состав древостоя лесосыревой базы — 5Е4С1Б. Способ рубок применяется сплошнолесосечный с размерами лесосек 1×1 км и с примыканием через три года. Соотношение зимних и летних зон по площади составляет соответственно 60 и 40%, а по объему — 50 на 50%. Средний объем хлыста — 0,23 м³, средняя длина дерева с вершиной — 16 м, без вершины — 13 м.

Ругозерский леспромхоз расположен в центральной части Карелии. Площадь сырьевой базы составляет 220,9 тыс. га, эксплуатационная площадь — 60,4 тыс. га. Рельеф характеризуется резким чередованием возвышенностей и низин. Почвенно-грунтовые условия определяются как моренные супеси со значительной валунностью. Климат характеризуется продолжительной мягкой зимой

и прохладным летом. Средняя годовая температура равна 1°C. Высота снежного покрова — 35–40 см. Состав лесонасаждений — 7С2Е1Б. Средний объем хлыста составляет 0,29 м³, средняя длина хлыста с вершиной — 16 м. Лесосечные работы выполнялись с использованием тракторов ТДТ-55А и ТБ-1. Погрузка хлыстов и деревьев на подвижной состав производилась лесопогрузчиками.

В Петрозаводском университете совместно с КарНИИЛПом и ЦНИИМЭ разработаны методики определения причин отказа в условиях лесозаготовительных опорных предприятий и в условиях специализированных испытательных или машиностроительных предприятий [15]. Для анализа причин отказов рекомендуется фиксировать конкретные условия эксплуатации:

- вид технологической операции (набор воза, трелевка, сбор пачки); трелевка — за комли, за вершины;
- температура окружающего воздуха;
- вид и размеры переезжаемого препятствия;
- объем (масса) перемещаемого груза;
- наличие всех крепежных элементов, усилие их затяжки;
- динамические нагрузки при наезде на препятствие;
- грунтовые условия: глубина снега, болото и т. д.;
- наличие неисправных смежных элементов, от которых зависимы режимы работы вышедшей из строя детали.

На основании анализа выявленного перечня отказов установлено, что недостаточную надежность имеют такие высоконапряженные детали тракторов ОТЗ, как балансиры, пружины подвески, ведомые шестерни бортовых передач. Полученные данные испытаний на надежность подконтрольных тракторов дают возможность оценить такой важный показатель надежности, как вероятность безотказной работы вышеупомянутых деталей. В качестве основного показателя принимается 80%-ная наработка до отказа.

Число наблюдаемых объектов (деталей) задано и определяется количеством подконтрольных тракторов и применяемостью деталей. Установленные числа отказов r для оценки 80%-ной наработки до отказа с доверительной

Сведения по объему наблюдений

Наименование детали	Марка трактора	Число объектов наблюдений, N	Установленное число отказов в соответствии с ГОСТом 27.502-83, r	Фактическое число отказов, n
Балансир	ТДТ-55А	144	24	43
Пружина	ТБ-1	148	25	54
Шестерня ведомая (бортовой передачи)	ТДТ-55А ТБ-1	72 84	11 12	19 38

вероятностью $\alpha = 90\%$ определялись в соответствии с рекомендациями ГОСТа 27.502-83 [8] и работы [15] и приведены в табл. 4.4. В ней же представлено число объектов наблюдений N и фактическое количество отказов n . Для получения достоверной оценки необходимо выполнить условие $r \leq n$. Для всех исследуемых деталей данное условие выполняется.

Обработка результатов проводилась по методике, изложенной в работе [15] и в руководящих технических материалах [24]. Целью являлось построение эмпирической кривой вероятности безотказной работы $P(t)$. Полагалось, что результаты незавершенных испытаний представляют собой выборку из N изделий, в которой n объектов отказалось, а остальные ($N - n$) объектов работоспособны и имеют различную наработку.

Информация по отказавшим и приостановленным изделиям была взята из журнала наблюдений за эксплуатационными испытаниями в Карельском НИИ лесной промышленности. Обработка велась в следующей последовательности.

По имеющимся данным об отказавших и работоспособных (приостановленных) объектах строится вариационный ряд в порядке возрастания наработки. Определяется величина интервала Δt по формуле

$$\Delta t = \frac{t_{\max} - t_{\min}}{1 + 3,21g N}, \quad (4.27)$$

где t_{\max} , t_{\min} — соответственно максимальная и минимальная наработки в выборке.

Величина интервала округляется.

До момента появления приостановок величина вероятности безотказной работы определялась по формуле

$$P = 1 - \frac{\sum_{j=1}^i n_j}{N}, \quad (4.28)$$

где n_j — число отказавших изделий в j -м интервале.

Для наработки t_j (верхней границы интервала) с приостановленными объектами вероятность безотказной работы для группированного в интервалы вариационного ряда:

$$P_i = P_{i-1} - \Delta_i n_i, \quad (4.29)$$

где Δ_i — вес отказа в i -м интервале:

$$\Delta_i = \frac{P_{i-1}}{N + 1 - \sum_1^{i-1} (n_i + q_i)}, \quad (4.30)$$

где q_i — количество приостановленных объектов в j -м интервале.

Полученные пары значений (t_i, P_i) позволяют построить эмпирическую кривую вероятности безотказной работы.

Обрабатывались результаты наблюдений за балансирями, пружинами подвески, ведомым зубчатым колесом бортовой передачи, картером главной передачи и другими высоконапряженными деталями. В настоящем разделе рассматриваются балансиры, пружины подвески и зубчатое колесо бортовой передачи.

4.5.2. БАЛАНСИРЫ

Наблюдения осуществлялись за балансирями лесозаготовительных машин ТДТ-55А. Объем наблюдений $N = 144$. При этом для оценки 80%-ной вероятности безотказной работы $P(t)$ и доверительной вероятности $\gamma = 90\%$ достаточно фиксировать 24 отказа. В нашем случае наблюдалось 43 отказа, что позволило сделать вывод о достаточной степени точности. Отказы балансиров произошли вследствие хрупкого излома от однократной перегрузки.

Величина интервала — $\Delta t = 500$ моточасов, число интервалов — 9. Вариационный ряд приведен ниже. Звездочкой помечены приостановленные объекты.

65*, 198*, 248*, 410*, 428*, 464, 485*, 486*, 499*, 539*, 568*, 254*, 610*, 627*, 664*, 679*, 802, 813*, 829*, 839*, 845*, 913*, 935*, 970*, 972, 972, 980, 990, 1005*, 1016*, 1025, 1067, 1210, 1400*, 1400*, 1434, 1434*, 1434*, 1434*, 1445*, 1457, 1457*, 1457*, 1463, 1530, 1538, 1550*, 1550*, 1550*, 1633*, 1635*, 1635*, 1635*, 1665, 1666, 1669, 1709*, 1709*, 1709*, 1752*, 1752*, 1752*, 1752*, 1753, 1753*, 1753*, 1753*, 1771, 1771*, 1799, 1835, 1900, 1927, 1938*, 2023, 2061, 2065, 2068, 2093, 2115, 2139, 2139*, 2139*, 2139*, 2167*, 2247*, 2358, 2380, 2387, 2495*, 2517, 2554*, 2554*, 2554*, 2578*, 2632*, 2632*, 2632*, 2711, 2742*, 2742*, 2742*, 2813*, 2813*, 2813, 2878*, 2878*, 2878*, 2897, 2900, 2965*, 2965*, 2987, 3142, 3157, 3193*, 3193*, 3193*, 3193*, 3356*, 3356*, 3360, 3385, 3385*, 3385*, 3558*, 3558*, 3735*, 3735*, 3735*,

Таблица 4.5

Результаты обработки эксплуатационных наблюдений по отказам балансиров лесопромышленного трактора ТДТ-55А

Номер интервала, i	t_i	n_i	q_i	P_i	Номер интервала, i	t_i	n_i	q_i	P_i
1	500	1	9	0,993	6	3000	6	17	0,616
2	1000	5	13	0,956	7	3500	4	8	0,536
3	1500	6	10	0,907	8	4000	0	10	0,536
4	2000	11	20	0,808	9	4500	0	8	0,536
5	2500	10	6	0,693					

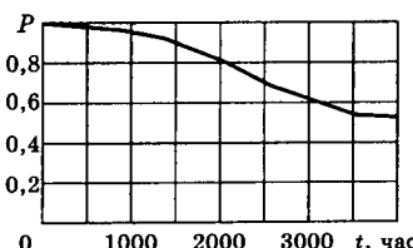


Рис. 4.16
Эмпирическая кривая вероятности безотказной работы балансира лесопромышленного трактора ТДТ-55А

3735*, 3887*, 3887*, 4124*, 4124*, 4124*, 4124*, 4124*, 3887*, 4124*, 4124*, 4124*, 4124*.

Результаты обработки вариационного ряда представлены в табл. 4.5. Эмпирическая кривая вероятности безотказной работы приведена на рис. 4.16.

Анализируя результаты эксплуатационных наблюдений, можно сделать вывод о недостаточной надежности литого балансира трактора ТДТ-55А. Так, 80%-ная наработка до отказа составляет всего около 2 тыс. моточасов при нормативном значении 6 тыс.

4.5.3. ПРУЖИНЫ ПОДВЕСКИ

Наблюдения осуществлялись за пружинами подвески лесозаготовительного трактора с гидроманипулятором ТБ-1. Объем наблюдений — $N = 148$. При этом для оценки 80%-ной вероятности безотказной работы при доверительной вероятности $\gamma = 90\%$ достаточно фиксировать 25 отказов. В нашем случае наблюдалось 54 отказа, что позволило сделать вывод о достаточной степени точности оценки. Отказы пружин произошли вследствие усталостного разрушения по рабочим виткам. Величина интервала определялась согласно методике и составляет $\Delta t = 500$ часов по мотосчетчику. Вариационный ряд сгруппирован в 8 интервалов и приведен ниже.

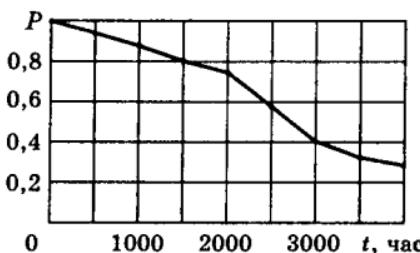
94*, 94*, 243, 243*, 243*, 243*, 545*, 546*, 583*, 541*, 659*, 688, 751*, 762*, 798, 822, 827, 852*, 878, 899, 929, 932, 932, 932, 948*, 950, 952*, 1050, 1050, 1050, 1050, 1073*, 1126*, 1128*, 1128*, 1128*, 1128*, 1134, 1136, 1151*, 1151*, 1156*, 1156*, 1198*, 1207, 1221, 1225, 1234*, 1301, 1321*, 1341*, 1341*, 1341*, 1341*, 1367*, 1367*, 1367*, 1417, 1459, 1508, 1554*, 1459, 1554*, 1579*, 1733, 1818, 1862*, 1862*, 1862*, 1862*, 1865*, 1865*, 1865*, 1865*, 1877, 1903*, 1903*, 1903*, 1903*, 1903*, 1903*, 1920*, 1953*, 1953*, 1963*, 1963*, 1991, 2007*, 2055, 2068, 2199*, 2199*, 2199*, 2199*, 2199*, 2206*, 2206*, 2206*, 2206*, 2209*, 2209*, 2270*, 2270*, 2270*, 2286, 2286, 2286, 2286, 2316*, 2432, 2432, 2432, 2432, 2455, 2473, 2531, 2570, 2580*, 2580*, 2580*,

Результаты обработки эксплуатационных наблюдений по отказам пружин подвески лесопромышленного трактора ТБ-1

Номер интервала, i	t_i	n_i	q_i	P_i	Номер интервала, i	t_i	n_i	q_i	P_i
1	500	1	6	0,993	5	2500	13	16	0,580
2	1000	12	10	0,908	6	3000	8	7	0,408
3	1500	13	20	0,801	7	3500	2	2	0,340
4	20 000	5	25	0,755	8	4000	0	7	0,340

Рис. 4.17

Эмпирическая кривая вероятности безотказной работы пружины подвески лесозаготовительного трактора ТБ-1



2580*, 2590, 2590, 2660, 2683*, 2684*, 2684*, 2811, 2811, 2811, 3016, 3016, 3312*, 3312*, 3582*, 3582*, 3582*, 3831*, 3831*, 3831*, 3831*.

Результаты обработки вариационного ряда представлены в табл. 4.6. Эмпирическая кривая вероятности безотказной работы приведена на рис. 4.17.

По результатам эксплуатационных испытаний можно заключить, что надежность пружины подвески трактора ТБ-1 крайне недостаточна. 80% -ный ресурс составляет всего около 1600 моточасов.

4.5.4. ВЕДОМОЕ ЗУБЧАТОЕ КОЛЕСО БОРТОВОЙ ПЕРЕДАЧИ

Наблюдения осуществлялись за ведомыми зубчатыми колесами бортовых передач лесозаготовительных машин ТДТ-55А и ТБ-1. Объем наблюдений для ТДТ-55А составлял $N = 72$. При этом для оценки 80%-ной вероятности безотказной работы $P(t)$ при доверительной вероятности

$\gamma = 90\%$ достаточно фиксировать 11 отказов. В нашем случае наблюдалось 19 отказов, что вполне удовлетворяет условиям плана $[N, U, r]$. Объем наблюдений для ТБ-1 составлял $N = 84$.

Для оценки вероятности безотказной работы и доверительной вероятности $\gamma = 90\%$ достаточно 12 отказов. В нашем случае наблюдалось 38 отказов. Этого количества отказов, вообще говоря, даже достаточно для оценки медианного ресурса с $\gamma = 95\%$.

Отказы всех зубчатых колес произошли вследствие усталостного разрушения. Величина интервала для обоих случаев составила $\Delta t = 600$ моточасов. Вариационные ряды сгруппированы в 7 интервалов.

Вариационный ряд для ТДТ-55А приведен ниже.

42*, 45, 155*, 282*, 382*, 576*, 598*, 694*, 763, 771*, 871, 882*, 937*, 960*, 1182, 1387, 1400*, 1400*, 1424, 1434*, 1434*, 1444, 1457*, 1550*, 1550*, 1635*, 1635*, 1664*, 1695, 1769*, 1710, 1753*, 1764*, 1782, 1868, 1912*, 1919, 2057, 2139*, 2139*, 2495*, 2580*, 2554, 2554*, 2632*, 2742*, 2787, 2813*, 2813*, 2878, 2878*, 2906*, 2906*, 2965*, 2965*, 3193*, 3193*, 3356*, 3385*, 3468*, 3468*, 3550, 3558*, 3559*, 3558*, 3580, 3735*, 3832*, 3887*, 4124, 4124*, 4124*.

Вариационный ряд для ТБ-1.

52*, 55*, 67*, 88*, 169*, 195*, 384*, 413*, 451*, 486*, 499, 558*, 583*, 685*, 670*, 670*, 700*, 715*, 721*, 765, 886*, 939, 953*, 1010, 1177, 1188*, 1250, 1260*, 1268, 1268*, 12366*, 1367, 1367*, 1429, 1439, 1454*, 1454*, 1463, 1472*, 1514*, 1514*, 1554*, 1570, 1605*, 1617, 1618, 1626, 1635*, 1686*, 1707, 1774, 1794, 1798, 1862*, 1862*, 1865*, 1891*, 1910, 1910, 1960, 2063*, 2068, 2144, 2178*, 2199*, 2206*, 2206*, 2270*, 2432, 2483, 2556, 2571, 2684*, 2684*, 2700, 2707, 2821, 2867, 2888, 2999, 3009, 3096, 3114*, 3876, 3899, 3951*, 4045.

Результаты обработки приведены в табл. 4.7. Эмпирические кривые вероятности безотказной работы приведены на рис. 4.18.

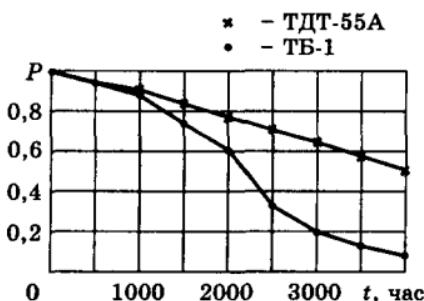
По результатам эксплуатационных испытаний можно заключить, что надежность ведомого колеса бортовых пе-

Результаты обработки эксплуатационных наблюдений по отказам ведомого зубчатого колеса бортовой передачи лесопромышленных тракторов ТДТ-55А и ТБ-1

i	t_i	ТДТ-55А			ТБ-1		
		n_i	q_i	P_i	n_i	q_i	P_i
1	600	1	6	0,986	1	12	0,988
2	1200	3	5	0,941	4	9	0,934
3	1800	6	13	0,844	14	12	0,716
4	2400	3	3	0,779	5	9	0,611
5	3000	3	12	0,708	10	2	0,305
6	3600	2	8	0,629	2	1	0,229
7	4200	1	6	0,551	2	2	0,137

Рис. 4.18

Эмпирические кривые ВБР ведомого зубчатого колеса бортовых передач лесопромышленных тракторов ТДТ-55А и ТБ-1



передач лесопромышленных тракторов ТДТ-55А и ТБ-1 недостаточна. 80%-ный ресурс составляет для ТДТ-55А — 2200, а для ТБ-1 1600 моточасов (с доверительной вероятностью $\gamma = 90\%$).

Медианный ресурс ведомого зубчатого колеса бортовой передачи ТБ-1 с доверительной вероятностью $\gamma = 95\%$ составляет 2600 моточасов.

С использованием методики, изложенной в работе [18], были получены расчетные оценки 80%-ной и средней наработок до отказа при предположении о справедливости гипотезы нормального распределения и распределения Вейбулла. Результаты расчетов приведены в сводной табл. 4.8.

Показатели надежности при этом имеют размерность в моточасах. В целом, можно сделать вывод о недостаточной надежности исследованных деталей.

Таблица 4.8

Результаты эксплуатационных испытаний элементов конструкций лесозаготовительных машин

Объект	Балансир	Пружина подвески	Ведомое зубчатое колесо БП	
	ТДТ-55А	ТБ-1	ТДТ-55А	ТБ-1
Эмпирическая 80%-ная наработка до отказа	2080	1600	2200	1600
Расчетная 80%-ная наработка до отказа по нормальному распределению	2047	1659	2229	1636
Расчетная 80%-ная наработка до отказа по распределению Вейбулла	1973	1598	2191	1590
Расчетная средняя наработка до отказа по нормальному распределению	3127	2556	3679	2446
Расчетная средняя наработка до отказа по распределению Вейбулла	3236	2595	10 780	2439
Коэффициент линейной корреляции по нормальному распределению	0,943	0,944	0,920	0,956
Коэффициент линейной корреляции по распределению Вейбулла	0,961	0,939	0,831	0,965

Результаты исследований надежности в условиях эксплуатации могут быть использованы для оценки адекватности расчетных методов.

Испытания на надежность лесоперерабатывающего оборудования подробно рассмотрены в литературе [2].

ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ МАШИН И ОБОРУДОВАНИЯ

5.1. МЕРОПРИЯТИЯ ПО ПОВЫШЕНИЮ НАДЕЖНОСТИ

Основные мероприятия по повышению надежности машин подразделяются на конструктивные, технологические (производственные) и эксплуатационные. Основные направления повышения надежности техники с точки зрения конструктивных решений представлены ниже.

При разработке конструкций машин должен предусматриваться выбор долговечных материалов деталей и рациональных их сочетаний в парах трения.

Прогрессивные материалы — низколегированные (для гильз и блоков цилиндров) и модифицированные (для коленчатых валов) чугуны; низколегированные цементуемые стали 25ХГТ, 20ХСНТ, 18ХНТФ (для шестерен и шлицевых валов); среднеуглеродистые низколегированные закаливаемые стали 39ХГСА, 45ХМФА, 50ГСШ, 50ХФАШ (для подшипников скольжения), сплавы на основе алюминия (для головок и блоков цилиндров, корпусов, гидронасосов); полимерные материалы (для втулок, подшипников скольжения, сальников, шестерен).

При разработке конструкций машин должны обеспечиваться нормальные условия работы деталей при наименьших потерях на трение. Поверхности подшипников скольжения рассчитывают

на удельные нагрузки, трения — на нагрев. Вместо них необходимо стараться применять подшипники качения, так как первые выдерживают меньшие скорости и нагрузки.

Необходимо обеспечение снижения концентрации напряжений при выборе форм и размеров деталей, так как галтели, надрезы, канавки наиболее чувствительны динамическим и циклическим нагрузкам.

Создание оптимальных температурных режимов работы сопряжений деталей сборочных единиц и агрегатов в современных форсированных машинах повышает их долговечность. Температура регулируется за счет воздуха, воды, картерного масла, создания теплоизолирующих прорезей (в головках блока цилиндров и поршнях), установки в бобышках поршней пластинок из инвара, заполнения пустотелых впускных клапанов металлическим натрием.

Повышение надежности достигается обеспечением хороших условий смазывания трещущихся поверхностей деталей. Например, является прогрессивным перевод элементов ходовой системы с консистентной смазки на жидкую (подшипники опорных катков, втулки цапф рамы).

Создание эффективных устройств для очистки воздуха, топлива, смазки способствует повышению долговечности агрегатов машин. Это достигается применением конструкций комбинированных воздухоочистителей, двойной очисткой топлива. Эффективная очистка масла осуществляется использованием полнопоточных масляных центрифуг, применением фильтров для масла в трансмиссиях, использованием подшипников с одноразовой смазкой.

Долговечность деталей агрегатов значительно зависит от конструкции и материалов уплотнительных устройств и герметизации сборочных единиц и агрегатов. Для обеспечения герметизации используют специальные прокладочные материалы и пасты, резиновые радиальные самоподвижные каркасные уплотнения.

Для обеспечения надежной работы машин и оборудования необходимо обеспечение достаточной жесткости базовых деталей машин и устойчивости их к вибрациям.

Конструкция блоков цилиндров двигателей типа ЯМЗ-236, 238 (V-образное расположение) — пример решения вопроса жесткости конструкции. Недостаточная жесткость характерна для блоков цилиндров двигателей типа СМД-14 БН.

К мероприятиям по повышению надежности конструктивного плана можно отнести применение двойных силовых пружин муфты сцепления, использование распределительных валов с безударным профилем кулачков, применение двухслойных пальцев гусениц (со слоем стали Х12Ф1), применение сменных стаканов под подшипники качения в корпусных деталях трансмиссий, введение балансировки деталей, внедрение дробеструйного наклепа пружин, внедрение прогрессивных методов расчета деталей на прочность, усталостную долговечность и др.

К конструктивным мероприятиям относятся мероприятия по повышению ремонтопригодности и контролепригодности машин и оборудования.

При создании машин и оборудования конструкторы работают в тесном сотрудничестве с технологами.

К технологическим мероприятиям, в первую очередь, относится обеспечение необходимой точности и качества изготовления деталей машин, что зависит в свою очередь от уровня используемого обрабатывающего оборудования, точности размеров поверхностей деталей, квалификации рабочих. С повышением точности изготовления деталей уменьшаются начальные зазоры в подвижных сопряжениях и более жестко регламентируются натяги в неподвижных соединениях, что значительно повышает долговечность машины, доремонтный период. Машиностроительное производство постоянно стремится к улучшению качества рабочих поверхностей, уменьшению их шероховатостей и искажений макрогометрии. Чем меньше шероховатость, тем больше сопротивляемость к коррозийным износам. Шероховатость оказывает влияние на циклическую и динамическую прочность деталей машин.

Достижение высоких геометрических характеристик качества поверхности происходит при срезании неровностей с помощью тонкого шлифования, хонингования,

суперфиниша и полирования с применением синтетических алмазов; смятием поверхности за счет пластического деформирования, обкатывания, раскатывания, дорнирования, алмазного выглаживания и виброобкатывания алмазными и твердосплавными наконечниками; применением электрохимической, электромеханической обработки, обработкой в магнитном поле.

Отклонение геометрической формы (макрогометрия) в значительной степени определяет надежность узла через площадь контактирования, условия смазки. За критерий оценки поверхности принимают величину опорной поверхности, радиусы закруглений вершин и впадин микронеровностей и т. д.

На надежность деталей оказывает влияние выбор наиболее рационального вида обработки для различных групп деталей и их рабочих поверхностей. Особенно перспективно виброобкатывание, повышающее маслоемкость поверхности, значительно снижающее износ деталей. Отделочные операции необходимы не только для улучшения шероховатости, но и для удаления тонкого дефектного поверхностного слоя со сниженными физико-механическими свойствами.

Применение упрочнения деталей и их рабочих поверхностей термической и химико-термической обработками — основной метод для значительного повышения износостойкости, прочности ответственных деталей. Используют в зависимости от вида и назначения деталей, следующие виды термообработки:

1. Улучшение (объемная закалка и высокий отпуск).
2. Объемная закалка и последующий средний отпуск.

3. Поверхностная закалка с нагревом токами высокой частоты и последующий низкий отпуск и другие сочетания.

Для стабилизации свойств и структуры деталей широко применяют нормализацию и высокий отпуск. Улучшению с предварительной нормализацией подвергают стальные коленчатые валы, шатуны. Закалка с нагревом токами высокой частоты оказывает положительное влияние на усталостную прочность, которая например, для

стали 45 повышается в два раза. Из всех видов химико-термической обработки для упрочнения автотракторных деталей получили цементация, нитроцементация, цианирование.

Запас прочности деталей, работающих при переменных нагрузках, повышается в 1,5–2 раза путем поверхностного пластического деформирования. Пружины, рессоры, шестерни, шатуны и другие детали подвергаются дробеструйной обработке. Коленчатые валы, поворотные цапфы эффективно упрочняются обкаткой шариками и роликами.

Рабочие поверхности втулок верхних головок шатунов, гильз, цилиндров, отверстий в корпусах коробок передач, заднего моста обрабатывают раскаткой и дорированием. Повышение долговечности деталей осуществляется нанесением на их поверхности износостойких и коррозионно-стойких покрытий. Так, пористое хромирование применяют для упрочнения поршневых колец двигателей, которые хорошо работают в паре с чугунными гильзами.

Для повышения надежности деталей применяются коррозионностойкие электролитические и химические покрытия: цинкование, никелирование, оксидирование, фосфатирование, лужение.

Повышение надежности элементов машин и оборудования осуществляется методом наплавки износостойких слоев. Индукционную наплавку твердыми сплавами используют для повышения износостойкости рабочих органов сельхозмашин; таким образом, в 2–3 раза повышается износостойкость лемехов, культиваторов.

Наплавка плазменной дугой тарелок клапанов двигателей увеличивает срок их службы в 4–10 раз.

Имеют место мероприятия конструктивно-технологического характера, направленные на повышение надежности машин и оборудования, в первую очередь это термомеханическое упрочнение, применение кованых заготовок, изготовление шестерен методом обкатывания, армирования деталей.

К данным мероприятиям можно отнести повышение технологической дисциплины изготовления деталей,

зависящее в том числе и от качества конструкционно-технологической документации.

Для создания практически безызносных деталей необходимо исключить всякую деформацию поверхностного слоя, чего можно достичь обработкой деталей (шеек коленчатых валов) мощным лучом лазера, обеспечивая нагрев детали до жидкого состояния и перевод слоя толщиной 10–15 мкм в аморфное строение за счет резкого охлаждения, вследствие чего атомы не успевают перестроиться в кристаллические решетки. Перспективные виды упрочнения — плазменное напыление порошков, детонационное напыление и др.

На надежность машин и оборудования в условиях эксплуатации влияет качество обкатки новых или отремонтированных машин и их агрегатов. Обкатка производится в соответствии с инструкцией завода-изготовителя, за период производственной обкатки рекомендуется трижды менять смазку, а ограничение мощности двигателя снижать через 120 моточасов работы.

На эксплуатационную надежность техники в огромной степени влияет уровень организации ее технического обслуживания и ремонта и создание для их проведения необходимой базы с наличием моечного, смазочного, регулировочного, диагностического оборудования, средств малой механизации. Своевременное проведение периодических технических осмотров; технического диагностирования состояния машин, их сборочных единиц, агрегатов помогает обеспечивать должную эксплуатационную надежность машин, так же как и создание нормального режима работы техники в различные периоды года, особенно в зимний.

К форсированному изнашиванию приводят: перегрузки (по нагрузке, скорости), неправильная регулировка зазоров в подшипниках, шестернях и других соединениях, нарушение температурного режима, режима смазки.

Нормальные условия эксплуатации машин зимой обеспечивают организация теплых стоянок, использование электрических подогревателей масла. Перегрев двигателя внутреннего сгорания влечет также повышенный из-

нос его деталей, как и езда, особенно на прямой передаче, при непрогретом двигателе.

На эксплуатационную надежность значительное влияние оказывает соблюдение установленных правил хранения машин, контроль и постоянное соблюдение требуемой герметизации агрегатов, сборочных единиц и систем машин. К мероприятиям, повышающим эксплуатационную надежность, относятся: повышение квалификации механизаторов, внедрение эффективного мойки и очистки деталей при ремонте, соблюдение правил и технологии ремонта машин с организацией эффективного контроля и сортировки изношенных и базовых деталей и их взаимного расположения. Ремонтные мероприятия по повышению надежности техники включают наличие входного контроля запасных частей, балансировку восстановленных деталей, соблюдение правил сборки узлов и затяжки резьбовых соединений, обеспечение стендовой обкатки и испытаний отремонтированных узлов и агрегатов, прогрессивных способов восстановления (наплавки) изношенных поверхностей деталей. Особое значение имеет обеспечение сохраняемости ремонтного фонда на соответствующих складах с использованием антикоррозионных смазок. При ремонте запрещается раскомплектовывать блоки цилиндров, крышки подшипников коленчатого вала, шатуны и их крышки, пары шестерен конечных и других передач.

5.2. КОМПЛЕКСНАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ РЕМОНТА

Система управления качеством, являясь составным элементом общей системы управления, на любом уровне должна способствовать выявлению и изучению главных проблем качества, выбору наиболее эффективных путей их решения и повышения эффективности контроля. Факторы, влияющие на качество ремонта, представлены на рис. 5.1.

Система управления качеством ремонта состоит из двенадцати подсистем.

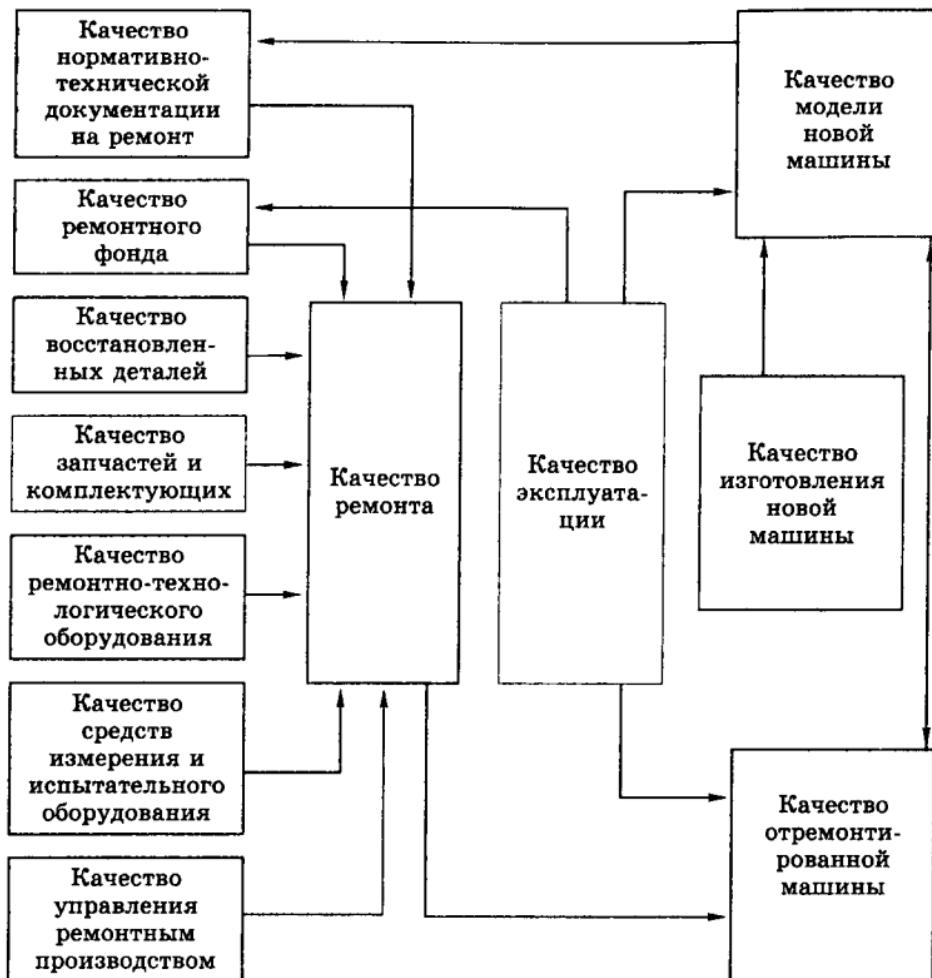


Рис. 5.1
Факторы, влияющие на качество ремонта

Первой следует назвать подсистему планирования повышения качества ремонта. Ее основными задачами являются: составление планов-графиков подготовки производства; контроль качества и исполнения ремонтной технологической документации; организация ускоренных заводских испытаний и подконтрольной эксплуатации отремонтированных машин.

Подсистема метрологического обеспечения качества ремонта предусматривает приемку средств измерения и испытательного оборудования от поставщиков и из ремонта; составление и контроль выполнения планов-графиков проверки и ремонта измерительного и контрольного об-

рудования; обучение производственного персонала правилам эксплуатации контрольных средств; внедрение новых методов и средств измерений.

Подсистема управления качеством запасных частей, материалов, комплектующих изделий предусматривает разработку, учет и обеспечение исполнителей технической (технологической) документацией; определение методов и средств контроля качества; приемку покупных изделий по качеству; составление рекламаций и изоляцию некачественных изделий; обобщение информации и связь с поставщиками; совершенствование методов контроля.

Четвертая подсистема — подсистема обеспечения точности и стабильности технологических процессов имеет следующие основные задачи, а именно составление и контроль графиков планово-предупредительного ремонта технологического (ремонтного) оборудования, проверку оборудования на технологическую точность, организацию принудительной замены оснастки и инструмента, обучение персонала и др.

Подсистема управления качеством ремонтного фонда предусматривает приемку объектов в ремонт в соответствии с требованиями нормативно-технической документации; контроль правильности хранения ремфонда на предприятии; проверку обоснованности направления объекта в ремонт и др.

Подсистема обеспечения технологической дисциплины решает задачи планового и оперативного контроля соблюдения технологической дисциплины; разработки мероприятий по ликвидации случаев как единичного, так и массового брака и причин рекламаций от потребителей; организации технической учебы производственного персонала, аттестации рабочих мест.

Подсистема контроля качества и испытаний отремонтированных объектов предусматривает составление планов контроля качества; операционный контроль качества; приемку продукции от исполнителей; предотвращение направления бракованной продукции потребителю; приемочный контроль и испытания готовой продукции; сбор и анализ информации о дефектах и отказах отремонтированных

объектов при обкатке и испытаниях; инспекционный контроль качества работы контролеров, их техническая учеба и др.

Восьмая подсистема — подсистема управления качеством труда, стимулирования качества продукции предусматривает установление требований и показателей качества труда; разработку положения о премировании; подготовку и повышение квалификации и аттестации работников; установление номенклатуры узлов, деталей, технологических процессов, подлежащих аттестации, и ее проведение.

Подсистема сбора, обработки и использования информации о надежности отремонтированной техники наряду с другими подсистемами решает задачи сбора и обобщения информации о надежности объектов в период гарантийного срока, анализа информации, разработке мероприятий по ликвидации повторяющихся отказов.

Подсистема обеспечения качества эксплуатации отремонтированных объектов включает организацию гарантийного ремонта, оказание технической помощи в организации обслуживания и текущего ремонта техники на использующих ее предприятиях; организацию предремонтного диагностирования технического состояния машин и их узлов, проведения технических консультаций по эксплуатации техники; сбор замечаний и предложений предприятий по вопросам качества отремонтированной техники; проведение совместно с заказчиком конференций по качеству ремонта и эксплуатации техники.

Подсистема организации научно-технической информации по качеству продукции предусматривает систематическое получение, накопление информации по вопросам прогрессивной технологии и организации ремонта техники и повышения качества продукции; абонементное регулярное обеспечение специалистов информацией по профилю работы, изучение передового опыта, обеспечение литературой для организации технической учебы.

Подсистема внедрения и контроля за соблюдением стандартов и нормативно-технической документации должна обеспечивать получение размножения, учета, хране-

ния, обеспечения ГОСТами и другими нормативно-техническими документами по ремонту техники, а также стандартами предприятия; разработку и пересмотр стандартов предприятия, контроль за выполнением стандартов.

Решающее влияние на качество ремонта машин и оборудования оказывает степень конструктивной и технологической доработанности, ремонтопригодности и долговечности новых машин, их агрегатов, сборочных единиц.

Система организации ремонта машин совершенствуется в направлениях развития фирменного сервисного обслуживания, что должно значительно повысить надежность отремонтированной техники, снизить затраты на их ремонт. Маркетинг и менеджмент технических сервисных услуг являются инструментами развития эффективного технического обслуживания и ремонта техники в новых рыночных условиях хозяйствования. Кооперация между ремонтными предприятиями, заводами-изготовителями машин, предприятиями, эксплуатирующими технику, необходима для создания результативного инвестиционного климата, который в свою очередь поможет наладить эффективные дилерские пункты по техническому обслуживанию и ремонту машин и оборудования различных марок. Сбор материалов о надежности техники на этих пунктах в современных условиях приобретает важное значение.

5.3. ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ МАШИН

Технико-экономическую эффективность работ по повышению надежности машин и оборудования рассмотрим на конкретном примере.

Благодаря термодиффузионному хромированию отдельных деталей топливного насоса дизеля ресурс насоса до капитального ремонта повысился с 50 до 60 тыс. моточасов. В данном случае экономия в сфере производства достигается вследствие сокращения числа деталей толкателя (исключена втулка ролика толкателя), стоимость которых больше, чем затраты, связанные с введением

дополнительного технологического процесса по упрочнению деталей. Себестоимость комплекта втулок для одного насоса — 0,20 тыс. руб., сокращение затрат вследствие изменения конструкции толкателя при программе производства 175 тыс. насосов в год равно $0,20 \text{ тыс. руб.} \times 175\ 000 = 35\ 000$ руб. Дополнительные затраты, связанные с введением технологического процесса упрочнения деталей, для одного насоса равны $0,062 \times 175\ 000 = 10\ 850$ тыс. руб. Таким образом экономия в сфере производства составит $35\ 000 \text{ руб.} - 10\ 850 \text{ руб.} = 24\ 150$ руб.

Экономию в сфере эксплуатации определим в следующем порядке. Экономический эффект от сокращения числа ремонтов составит $(0,40 - 0,33) \times 28,80 \text{ тыс. руб.} \times 175\ 000 = 352$ тыс. руб., где 0,40 и 0,33 — соответственно число ремонтов в год до повышения и после повышения ресурса объекта; 28,80 тыс. руб. — затраты на один ремонт объекта. Доля экономического эффекта, приходящаяся на группу упрочненных деталей, равна 246 тыс. руб. (70%). Далее следует учесть, что число регулировок объекта в год до повышения надежности равно единице, а после повышения необходимость в регулировках отпадает. Затраты для выполнения одной регулировки насоса равны 1,387 тыс. руб. Экономический эффект от сокращения работ при техническом обслуживании равен $1,387 \text{ тыс. руб.} \times 175\ 000 = 242\ 725$ руб. Таким образом, экономический эффект в условиях эксплуатации составит $246\ 000 \text{ руб.} + 242\ 725 \text{ руб.} = 488\ 725$ руб.

Общий годовой экономический эффект при производстве и эксплуатации объекта составит: $24\ 150 \text{ руб.} + 488\ 725 = 512\ 875$ руб.

5.4.

ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ

ИССЛЕДОВАНИЯ НАДЕЖНОСТИ МАШИН НА ОБЪЕКТАХ ИХ ТЕХНИЧЕСКОГО СЕРВИСА

В доперестроечный период контроль за уровнем надежности машин и оборудования в директивном порядке осуществляло государство через установку четких нормати-

вов показателей техники, пересматриваемых в сторону ужесточения через каждые пять лет.

В связи с приватизацией машиностроительных предприятий и внедрением во все отрасли промышленности рыночных отношений, роль государственного контроля за техническим уровнем машин и оборудования резко снизилась, на первом месте стимулом повышения качества и надежности стала конкуренция — неотъемлемая часть рыночных отношений. Для того чтобы производимая конкретным предприятием продукция имела спрос, она должна соответствовать государственному и мировому уровню, тем более быть не ниже по своим техническим показателям однотипным изделиям, изготавляемым другими заводами и фабриками. Этот стимул заставляет производителей машин следить за уровнем надежности своей продукции, внедрять мероприятия для ее повышения.

Одними из наиболее эффективных источников информации о надежности машин являются пункты технического сервиса. Это, в первую очередь, организация сбора и обработки информации об отказах, способах устранения, затратах, наработке, условиях эксплуатации, причинах отказов, эффективности ранее внедренных мероприятий по повышению надежности машин и оборудования. Инициаторами и спонсорами организации данных исследований должны быть заводы-изготовители машин и сами технические пункты, которым необходимо вести работы по оценке надежности отремонтированной техники, чтобы она была конкурентоспособной относительно машин и оборудования, ремонтируемых другими организациями.

Таким образом, цель исследования надежности остается прежней — повышение надежности и технического уровня исследуемых объектов. Задачи также соответствуют оценке надежности, устанавливаемой при централизованном, государственном контроле.

Методические подходы исследования и оценки показателей надежности машин и оборудования соответствуют как современным, так и ранее изданным и действующим нормативно-техническим документам, приведенным в списке использованных источников.

5.5. ОРГАНИЗАЦИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ ПРИЧИН ОТКАЗОВ ЭЛЕМЕНТОВ МАШИН

Данный раздел содержит основные требования, предъявляемые к организации исследований причин отказов лесозаготовительных машин. Они являются составной частью работ по исследованиям надежности машин и испытаний их на надежность.

Полученные в ходе работы данные могут использоваться для подготовки информационных, рекомендательных, руководящих и нормативных документов, представленных ниже:

1. Описание процессов появления и накопления повреждений деталей машин.

2. Рекомендации для разработки конструкторских или технологических мероприятий, направленных на исключение или снижение числа отказов машин.

3. Рекомендации для разработки мероприятий по применению тех или иных способов и методов восстановления деталей в условиях эксплуатирующих и ремонтных предприятий.

4. Предложения по корректировке и установлению номенклатуры запасных частей.

5. Обоснование рекомендаций для разработки мероприятий по совершенствованию организации профилактики, хранения, заправки машин, контролю качества применяемых эксплуатационных и ремонтных материалов.

6. Критерии предельного состояния составных частей машин.

7. Номенклатуры подлежащих восстановлению в эксплуатирующих предприятиях деталей машин и деталей, направляемых на восстановление в специализированные ремонтные предприятия.

Исследования причин отказов включают следующие работы (рис. 5.2):

1. Сбор статистических данных об отказах.

2. Сбор, накопление и систематизацию данных об условиях эксплуатации машин.

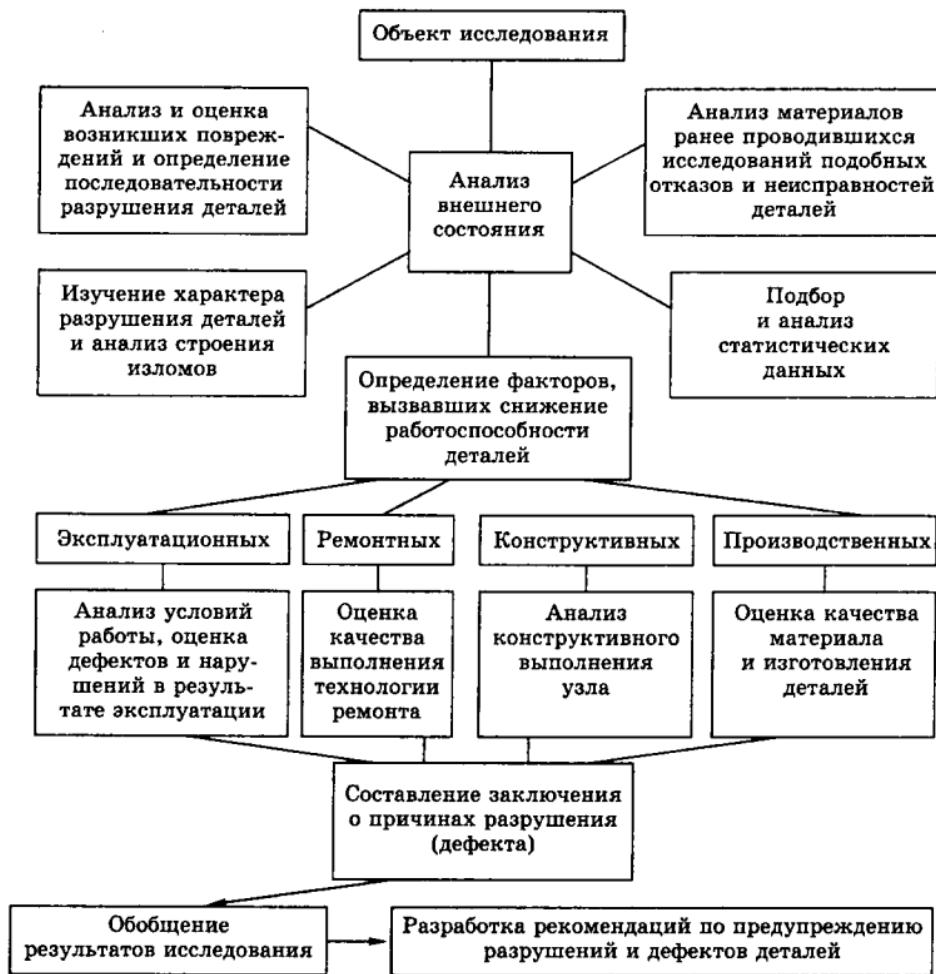


Рис. 5.2
Схема проведения исследований по выявлению причин отказов элементов машин

3. Обследование технического состояния машин.
4. Выявление первичных диагностических признаков, предшествующих или сопутствующих отказу.
5. Технические осмотры и микрометраж деталей отказавших составных частей машин.
6. Лабораторные исследования материалов деталей и проб применяемых эксплуатационных материалов (металлографические исследования, химические анализы и т. п.).
7. Изучение конструкторской, проектной и эксплуатационной документации.
8. Специальные стеновые испытания.

Сбор данных об отказах, условиях эксплуатации, а также обследование технического состояния машин испытательными подразделениями, организациями должны выполняться постоянно, остальные виды работ, указанные выше, выполняются по специальным программам.

5.5.1. ОБСЛЕДОВАНИЕ УСЛОВИЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ МАШИН

Информация об условиях эксплуатации (УЭ) машин применительно к решению задач по выявлению причин отказов используется при анализе факторов, влияющих на их возникновение, в связи с нарушениями правил их использования или недостаточной приспособленности машин к заданным условиям.

Сбор, накопление, хранение, обработка и систематизация информации об условиях эксплуатации являются обязательной составной частью общего комплекса работ по получению и обработке данных о надежности машин.

Организация сбора информации об условиях эксплуатации включает разработку следующих документов:

1. Номенклатуры реквизитов, описывающих условия эксплуатации.

2. Памяток по обследованиям на каждую марку машин.

3. Форм первичных документов регистрации данных обследований.

4. Форм документов результатов обработки данных обследований.

5. Частных инструкций о порядке проведения обследований.

6. При организации обработки данных исследований на ЭВМ — классификаторов реквизитов, описывающих условия эксплуатации, инструкции о порядке представления информации на обработку и алгоритмов обработки.

Разработка номенклатуры реквизитов и памяток по обследованиям осуществляется в результате изучения руководства по эксплуатации, натурного изучения условий эксплуатации, условий самих обследований, проведения

пробных обследований по проекту памятки, корректировке номенклатуры и памяток по результатам пробных обследований.

Памятки по обследованиям условий эксплуатации должны предусматривать получение данных по характеристике почвенно-грунтовых условий (почвенный слой, грунт, снежный покров); об условиях межсменного хранения и запуска двигателя; условиях заправки водой, антифризом, топливом, маслом.

Обследования УЭ каждой машины, проходящей испытания на надежность в испытательных подразделениях, должны производиться не реже одного раза в месяц, а также после каждой перебазировки машины или при каждом изменении вида выполняемой работы.

Периодическим обследованиям УЭ по памяткам должен сопутствовать постоянный сбор данных о метеорологических условиях.

Форма первичного документа регистрации данных обследований должна предусматривать запись кодами, заданными в памятке, и возможность текстового описания в случаях, когда в памятке отсутствует зафиксированный при обследованиях признак.

По данным первичных документов составляются ведомости данных обследований УЭ, форма которых должна удовлетворять следующим требованиям:

1. В ведомость должны включаться данные по каждой машине одной подконтрольной партии (одной марки, одного года выпуска и одного места испытаний или эксплуатации).

2. Кроме даты проведенного обследования, в ведомости должна содержаться дата предыдущего обследования.

3. Перечень реквизитов должен строго соответствовать их перечню в памятке по обследованиям.

4. Описания по каждому реквизиту должны делаться в наиболее краткой форме.

Для хранения и использования и последующего анализа ведомости данных обследований комплектуются в папках по принадлежности к подконтрольным партиям машин в хронологическом порядке.

При проведении обследований должен предусматриваться отбор проб топливных и смазочных материалов (ТСМ) из емкостей для их хранения и заправки. Сведения об отборе проб должны заноситься в первичный документ фиксации данных обследований. В испытательной организации должен быть разработан и осуществляться порядок хранения, учета и представления проб ТСМ на лабораторный анализ, представления его данных для использования. Они должны вноситься в ведомость данных обследований УЭ машины. Для создания базы данных используется ПЭВМ.

5.5.2. ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЙ

Техническую экспертизу при определении причин выхода из строя и качества изготовления проводят для деталей:

1. Стандартизованных — на соответствие требованиям государственных и отраслевых стандартов на изготовление деталей.

2. Нестандартизованных — на соответствие требованиям технической документации (чертежам, техническим условиям).

Технической экспертизе подвергаются следующие объекты:

1. Снимаемые с машины поврежденные детали и узлы, которые при устраниении отказа подлежат замене.

2. Поврежденные детали и узлы, снимаемые с машины на время устраниния отказа.

3. Поврежденные детали и узлы, не снимаемые с машины при устраниении отказа, но доступные для осмотра и измерений.

5.5.3. ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКОЙ ЭКСПЕРТИЗЫ ОТКАЗОВ

Технология проведения исследований для выявления причин отказов разрабатывается в виде разделов, где указываются содержание проверок, используемые приборы, оборудование, инструменты, материалы и документация,

необходимая для осуществления того или иного вида технической экспертизы.

В плане организации процесс поиска причин отказов состоит из нескольких этапов, а именно поиска причин отказов на месте их возникновения и в лабораторных условиях.

Снятые с машины поврежденные детали и узлы, которые после их восстановления немедленно устанавливают на машину, а также поврежденные части неразборных, но доступных для осмотра и измерений элементов машины подвергаются экспертизе непосредственно на месте устранения отказа.

Экспертиза указанных объектов на первом этапе заключается в осмотре, измерении простыми средствами, фотографировании, изучении обстоятельств отказа, а также в рассмотрении внешних признаков, которыми он сопровождался. Цель этого этапа — выделить из комплекса разрушенных или поврежденных узлов агрегатов детали, с которых началось разрушение, и по возможности установить, связано ли разрушение с нарушениями правил эксплуатации.

Осмотр поврежденных деталей и узлов является первичным этапом технической экспертизы, в результате которого делается заключение о причине отказа или, при невозможности сделать указанное заключение, принимается решение о проведении более глубоких исследований. В результате осмотра устанавливаются вид и характер повреждений, анализируются их возможные причины с использованием сведений об обстоятельствах, при которых произошел отказ. Результаты осмотра отмечаются на эскизе детали (узла) путем указания координат и размеров мест повреждений и описания последних. Эскиз детали (узла) может выполняться исполнителем на оборотной стороне карты осмотра или в виде отдельного документа.

Измерение деталей с целью получения информации для оценки износа и контроля размеров производят, руководствуясь методическими указаниями на проведение микрометражных работ.

Фотосъемка объектов технической экспертизы осуществляется по следующим правилам:

1. Фотографирование поврежденного узла, детали или их поврежденного участка производится так, чтобы в поле видоискателя, кроме объекта съемки, вмещалась запись условного номера фотоснимка, нанесенного на специальную бирку.

2. Мелкие детали при их съемке рекомендуется укладывать непосредственно на бирку, используя ее в качестве фона.

При изучении обстоятельств возникновения отказа анализу должны подлежать следующие факторы:

- режим работы машины;
- особенности нагружения отказавшей составной части;
- условия смазки;
- рабочие температуры.

Данные о режимах и условиях работы, при которых произошел отказ, оцениваются с точки зрения их соответствия инструкции по эксплуатации и должны быть изучены с максимальной полнотой, так как в отдельных случаях это позволяет установить причины поломки и закончить на этом исследование.

Первый этап проводится в основном теми работниками отделов (групп) надежности, которые ведут наблюдение непосредственно на производственных участках совместно с сотрудниками эксплуатационных подразделений.

Если же на первом этапе исследования установлены только предположительные причины, то проводится более детальный анализ в лабораторных условиях.

Второй этап проведения технической экспертизы отказов в лабораторных условиях в свою очередь также разделяется. Часть работ проводится в условиях эксплуатирующего предприятия сотрудниками отделов (групп) надежности в специальном помещении, оборудованном для технической экспертизы. При этом исследование включает в себя осмотр деталей, анализ внешнего состояния и условий работы. В лабораторных условиях фирмы (завода-изготовителя) или специальных исследовательских лабораториях производится значительно больший объем

исследований с привлечением различных специальных лабораторных методов.

Оценка материалов деталей с целью выявления причин отказов в условиях эксплуатирующего предприятия может включать:

1. Фрактографические исследования (анализ изломов).
2. Микрометражные работы.
3. Определение физико-механических свойств (измерение твердости, ударной вязкости, прочности и др.).
4. Дефектоскопию (неразрушающие методы контроля материалов деталей и сварных соединений).

Химический анализ для установления соответствия марки материала и металлографический анализ с целью исследования макро- и микроструктуры, замера глубины слоев цементации, закалки и других методов упрочнения проводится в специализированной лаборатории, где для этого имеется соответствующее оборудование.

Образцы для химического и металлографического анализа, отбираемые от крупных деталей, и мелкие детали (массой до 1 кг) персылаются для исследования в лабораторию завода-изготовителя или независимой испытательной или исследовательской организации.

Результаты экспертизы оформляются протоколами. Протокол технической экспертизы может не составляться в том случае, если отказ является массовым и причина его очевидна.

5.5.4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕЛИЧИНЫ ИЗНОСА ИЗМЕРИТЕЛЬНЫМИ СРЕДСТВАМИ

Величина износа деталей в значительной степени зависит от условий их работы. Так, в трелевочных тракторах ведущее колесо, заталкиватель, каток работают в контакте с пальцами, звеньями гусениц при значительных нагрузках и в агрессивной среде (влажный грунт, камни и т. д.). Ось балансира, ось рычага, стопор, втулки и другие испытывают при работе большие местные нагрузки (в местах контакта), смазка периодически не возобновляется, засыхает и увеличивает коэффициент трения.

В приведенных случаях износ деталей достигает значительных размеров, заметен визуально и достаточно надежно может быть измерен штангенциркулем, нутромером или, при отсутствии точных измерительных средств, оценен при помощи линейки. Шестерни коробки передач (КП) бортовой передачи работают в закрытом пространстве, в защитной среде (масло), но режим работы их резко отличается. Так, шестерни бортовой передачи работают при больших нагрузках и постоянном контакте ведущей и ведомой шестерен; шестерни КП при переключении скоростей испытывают значительные колебания величины нагрузки на гранях зубьев шестерен, в результате чего износ шестерен КП по длине зуба велик и надежно может быть измерен при помощи линейки, тогда как износ зубьев по толщине у шестерен бортовой передачи может быть измерен нормалемером, штангензубомером или качественно оценен штангенциркулем.

Из вышесказанного следует, что для изучения износа деталей тракторов следует использовать разнообразные измерительные средства с широким диапазоном измерительной точности, условий проведения измерений.

Ниже перечисляются измерительные средства, применяемые при проводимых исследованиях.

Линейка измерительная металлическая (1–300 мм) — применяется при измерении размера трещин по сварным швам, по металлу, величины пробоин, отверстий противления; при отсутствии штангенциркуля применяется при измерении величины износа обода катка; износа по длине головки зуба у непостоянно замкнутых шестерен (шестерни КП); износа канавки под стопор, вкладыша на оси рычага, балансира и т. д.

Штангенциркули (ШЦ-125-0,10; ШЦ11-160-0,05 и др.) — применяются при измерении величины износа обода катка, рабочей поверхности заталкивателя; длины зуба у непостоянно замкнутых шестерен; отверстий под болты, пальцы и т. д.; при измерении величины износа дисков бортфрикциона, втулок, шлицев, вилок переключения передач, пазов и т. д.; при отсутствии микрометра, нутромера применяется для измерения износа валов, втулок.

Микрометр (МК 0-25, МК 25-50 и др.), микрометр рычажный (МР 0-25, МР 25-50 и др.) — применяются для измерения величины износа оси, валов, втулок, цапф и т. д.

Нутромеры (10-18, 18-50 и др.) — применяются при измерении величины износа отверстий втулок, сальников, отверстий под подшипники, оси, валы и т. д.

Нормалемер НЦ-1 (зубомерный микрометр) — применяется при измерении величины износа зубьев по толщине.

Зубомер тангенциальный — применяется при измерении величины износа шлицев.

Оптиметр (ОВЗ-1) — применяется при измерении величины износа поверхностей.

Индикатор (ИЧ10, кл. 1), призмы (П-2-2), штатив (ШМ-ПВ) — применяются при измерении изогнутости валов, валиков.

При определении величин разрушения и износа в качестве методических указаний используются технические условия на проведение дефектации деталей тракторов и автомобилей, где указаны конкретные инструменты, которые применяются при измерении величины дефектов у исследуемых деталей. Ниже рассмотрены измерения износа наиболее ответственных деталей лесозаготовительных машин.

Износ зубчатых колес КП определяется величиной износа головок зубьев по длине, так как он является определяющим при работе непостоянно замкнутых шестерен. Количественно его определяют штангенциркулем или измерительной линейкой.

Величину износа по массе следует выявлять у деталей небольших размеров, например шестерен КП, имеющих значительный износ по длине зуба. Он не только неравномерен по высоте зуба, но и неодинаков и по длине у различных зубьев одной шестерни (как показывают наблюдения, величина износа зубьев по их длине у одной шестерни может отличаться в 2-3 и более раз). Потеря массы шестерни всецело относится к износу зубьев. Ее масса может быть вычислена для всех шестерен КП.

В качестве прибора для измерения величины износа весовым методом можно использовать весы с пределом до 10 кг и точностью до 1 г.

5.5.5. ПРИМЕНЕНИЕ ФРАКТОГРАФИИ ПРИ АНАЛИЗЕ ПРИЧИН И ХАРАКТЕРА РАЗРУШЕНИЙ

Изломы изучают и выявляют их закономерности с разных точек зрения. Во-первых, для оценки металлургического качества материала. Такой дефект обработки, как перегрев, оценивают в конструкционных материалах по наличию камневидного, а в быстрорежущих сталях — нафталинистого изломов. Рыхлоты, пленки достаточно надежно выявляют в изломах литьевых материалов и т. п. Определение температурных интервалов хладколомкости или отпускной хрупкости тоже можно отнести к области изучения изломов, связанных с качеством и составом материала.

Анализ изломов всегда целесообразен для выяснения причин разброса механических свойств материала детали при испытаниях.

Фрактографию применяют также при изучении механизма и кинетики разрушения. В этом случае излом в первую очередь связывают с условиями нагружения и параметрами процесса разрушения: характером напряженно-деформированного состояния, скоростью распространения трещины, видом и схемой приложения нагрузок и т. д.

Учитывая влияние внешних факторов нагружения на строение изломов, следует также принимать во внимание состояние и свойства материала. Особенно целесообразно исследование изломов для установления связи структуры материала с его способностью тормозить разрушение.

Анализ изломов все чаще используют при определении вязкости разрушения. В ряде случаев он становится одним из решающих критериев корректности оценки вязкости. Изучение строения излома необходимо также при исследовании характера разрушения, вызванного нарушением правил эксплуатации объекта.

Для большинства отраслей техники наиболее частыми разрушениями деталей являются усталостные (до 80% всех случаев разрушений). В последнее время в связи с расширением применения высокопрочных материалов участились случаи замедленных и хрупких разрушений.

Причины возникновения дефектов и разрушений, как известно, разделены на три основные группы: конструкционные, производственные (технологические) и эксплуатационные.

Установление истинных причин дефектов и разрушений деталей представляет сложную задачу, так как их возникновение может быть вызвано рядом факторов и не всегда возможно выделить единственную причину, связанную только с конструкцией, технологией изготовления, монтажом или условиями эксплуатации объекта.

В числе наиболее часто встречаемых причин следует назвать неучтенные при конструировании большие внешние нагрузки, что в сочетании, например, с концентраторами напряжений (технологического, металлургического, конструктивного характера), высокими остаточными напряжениями, наличием коррозионной среды и тому подобного приводит к разрушению. При исследовании важно выявить основную причину и факторы, способствующие разрушению.

Установление причин разрушения конструкций, в особенности сложных, — это комплексное исследование, при котором необходимы анализ эксплуатационных нагрузок, проверка расчетов на прочность, статистическая оценка вероятности разрушения, анализ характера взаимодействия различных узлов и элементов конструкций, технологии изготовления и ремонта детали, установление длительности и других условий хранения, проверка прочностных и пластических характеристик материала.

Непосредственно анализ изломов, как правило, позволяет выявить следующее:

1. Характер разрушения (вязкое или хрупкое при однократном нагружении; усталостное, от длительного действия изменяющейся, в том числе знакопеременной, нагрузки и т. д.).

2. Вид и направление действия нагрузок (растяжение, изгиб, кручение и т. д.).

3. Расположение очага разрушения и его связь с наличием дефектов материала, концентратора напряжений.

4. При усталостном разрушении — примерный уровень переменных напряжений.

5. Состояние материала (пластичное, хрупкое, состояние границ зерен и т. д.).

Макроскопическое исследование строения изломов в большинстве случаев позволяет достаточно надежно определить характер разрушения — хрупкое или вязкое, а также вид нагружения, при котором произошло разрушение. Но причисление изломов к определенной группе по каким-то отдельным, хотя и типичным признакам, но взятым в отрыве от общего состояния детали и условий ее работы, может быть ошибочным. При анализе разрушений встречаются статические изломы деталей, работающих в условиях циклического нагружения, и наоборот, усталостные изломы у деталей, работающих в статических условиях. Иногда изломы имеют одинаковый вид, например не всегда удается отличить изломы замедленного разрушения от хрупких однократных или коррозионного растрескивания. В таких случаях другие данные (об условиях службы, обнаружения разрушения, металлографического исследования и т. д.) позволяют с большей определенностью отнести излом к тому или другому виду. Однако и в этих случаях на долю анализа остается задача выявления и уточнения различных обстоятельств разрушений и способствующих разрушению факторов.

Кроме определения характера разрушения, важно также выяснить вид и направление действия нагрузок (растяжение, сжатие, изгиб, срез, кручение или их комбинации).

Разрушение от растяжения. При этом разрушении у пластичных металлов в большинстве случаев образуется местная пластическая деформация (шейка). Поверхность излома тонкостенных конструкций, как правило, располагается под углом 45° к направлению действия растягивающей нагрузки. На крупных деталях в центре образуется участок, располагающийся перпендикулярно действию растягивающих нагрузок, а на периферийной части в большинстве случаев образуются скосы под углом 45° . Разрушение от растяжения малопластичных металлов

происходит без заметной пластической деформации, а поверхность излома располагается перпендикулярно к оси действия растягивающей нагрузки.

Разрушение от сжатия. Для пластичных металлов оно характеризуется местным увеличением площади поперечного сечения излома и изгибом от потери продольной устойчивости. Менее пластичные металлы часто разрушаются скальванием под углом 45° к направлению действия нагрузки.

Разрушение от изгиба. В данном случае на поверхности излома образуются две зоны разрушений: от растяжения и сжатия. Участок излома от сжатия имеет более гладкую поверхность, которая образовалась в результате взаимного трения и смятия двух половин разрушившейся детали. Кроме того, эта зона излома чаще располагается под некоторым углом к направлению действия изгибающей нагрузки. В растянутой зоне детали часто выявляются начальные трещины, располагающиеся параллельно излому.

Разрушение от среза. Характерным признаком этого разрушения является наличие местной деформации, распространяющейся в направлении срезывающего усилия. Поверхности излома в результате взаимного перемещения заглаживаются и на них видны риски и царапины, ориентированные в направлении среза.

Разрушение от кручения. Здесь поверхности изломов в большинстве своем гладкие (притертые), но могут быть с вырывами материала и сколами. В связи с тем, что излом в значительной мере определяется пластичностью металла и его характеристиками прочности, расположение поверхности излома по отношению к оси детали может быть различным: при небольшой перегрузке он располагается приблизительно под углом 45° , при большой перегрузке или резком скручивании — 90° . Часто на обеих половинах разрушенной от кручения детали имеется некоторое остаточное скручивание.

Выяснение направления распространения разрушения, а следовательно, и места расположения очага производится путем анализа макрорельефа излома. На многих

изломах важным признаком в этом отношении являются складки или рубцы, наличие зон с различной шероховатостью.

На хрупком изломе можно различить три зоны: фокус излома, зону относительно медленного распространения разрушения и зону, соответствующую быстрому, лавинному разрушению.

Фокус и очаг излома, как правило, располагаются непосредственно у поверхности образца или детали, поскольку поверхность является наиболее вероятным местом концентрации напряжений, которые возникают вследствие наличия внутренних или внешних неоднородностей. Поэтому образование фокуса гораздо больше, чем образование первой и, в особенности, второй зоны, и зависит от исходного физического и геометрического состояния поверхности.

Хрупкий излом при однократном и тем более длительном нагружении может иметь много фокусов. Чем выше скорость возникновения фокусов и чем меньше скорость распространения трещины, тем большее число фокусов должно наблюдаться на изломе. Расположение и само наличие его указывают на неоднородность и неодновременность процесса разрушения.

Первая зона излома соответствует начальной стадии разрушения, когда развитие трещины происходит сравнительно медленно. Обычно поверхность этой зоны более гладкая, чем остальная поверхность излома. Вторая зона излома соответствует очень быстрому, иногда лавинному, со скоростями, соизмеримыми со скоростью звуковых колебаний, распространению разрушения.

Поверхность первой и второй зон хрупких изломов при наличии одного фокуса имеет рубцы, веерообразно расходящиеся от фокуса в направлении развития разрушения. В этом случае в месте возникновения разрушения рубцы бывают очень невысокими и тонкими, в зоне развивающегося разрушения они становятся грубее и приобретают иногда вид заноз, отстающих от основного материала. Характерное направление рубцов от фокуса излома помогает установить место зарождения разрушения. В том слу-

чае, если практически одновременно возникает не один, а несколько фокусов, из которых некоторое время трещины распространяются самостоятельно и лишь с течением времени сливаются в единую поверхность разрушения, рубцы имеют более грубое строение в начальной зоне изломов и становятся более тонкими по мере слияния соседних трещин.

В очаге изломов замедленного разрушения, в отличие от изломов однократного хрупкого разрушения, в отдельных случаях имеет место небольшая зона с менее хрупким, чем основная поверхность, строением. При наличии на поверхности детали хрупкого слоя в изломе не будет наблюдаться начального пластичного участка.

При макроосмотре излома замедленного разрушения важно выявить наличие двух существенно различных по строению зон. Первая зона гладкая, иногда блестящая, имеет некоторое сходство с усталостными изломами, однако не имеет типичных макро- и микропризнаков разрушения от циклических нагрузок. Наиболее характерным для нее является значительная доля межзеренного разрушения, но это часто может быть установлено лишь микрографическим анализом. Вторая зона, имеющая более пластичное строение, матовость, тонкую шероховатость и следы макроскопической пластической деформации у кромки излома в виде скосов, является зоной кратковременного разрушения, т. е. долома.

Фокус излома пластичных материалов, нагружаемых осевым растяжением, обычно располагается в центре сечения, где достигается условие объемного напряженного состояния. Его смещение относительно центра наблюдается при уменьшении пластичности, когда увеличивается чувствительность материала к перекосу или к различного вида дефектам. В этом случае фокус излома может существенно отличаться по своему строению от остальной поверхности, например, представлять собой участок микросреза (при разрушении по какой-либо хрупкой составляющей).

В случаях пластичного разрушения фокус или очаг излома выявляется лишь как наиболее гладкий участок.

На усталостных изломах также можно выделить три основные зоны: очаг разрушения, собственно усталостного развития разрушения, кратковременного долома.

По количеству очагов, связи их с концентраторами напряжений и другим признакам при усталостном разрушении можно оценить примерный уровень переменных напряжений. В общем случае с увеличением уровня напряжения в изломе увеличивается количество очагов (фокусов), однако большое количество очагов может быть также следствием наличия многих концентраторов конструктивного или технологического происхождения. Поэтому необходимо учитывать не только количество, но и расположение и, главное, последовательность возникновения очагов. В том случае, когда очаги излома не совпадают с имеющимися концентраторами напряжения или дефектами материала, можно предположить действие достаточно высоких внешних нагрузок. При низких напряжениях начало разрушения в основном определяется различного рода концентраторами. Последовательность возникновения очагов при микроскопическом исследовании оценивается по густоте макроскопических усталостных линий и блеску поверхности около очагов. Их более густое расположение и больший блеск обычно соответствует более медленному распространению трещин, т. е., как правило, более раннему их возникновению. Размер усталостной зоны, прилегающей к первоначальному очагу, обычно больше, чем вблизи очагов, возникших уже в процессе усталостного разрушения. Характер и соотношение между зонами усталостной и окончательного долома изменяются также в зависимости от условий нагружения относительно структуры материала.

5.5.6. ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗЛОМОВ

Макроскопическое исследование изломов (при увеличении до 120^х). Исследование поверхности изломов невооруженным глазом и с помощью увеличительных луп позволяет дать общее описание их строения и выявить крупные дефекты, такие как расслоения, усадочные раковины

и т. д. Характер строения изломов является общим для определенных металлов и зависит от условий эксплуатации машин.

Исследование излома следует начинать с составления его схемы, на которую наносят контуры излома, характерные особенности рельефа (выступы, впадины, ровные участки, границы затекшего масла, краски, окислов и нагара). Для более детального изучения поверхности разрушения излом наклоняют под разными углами к источнику освещения.

Следующий этап изучения излома с помощью лупы при увеличении до $5-10^{\times}$ и бинокулярных микроскопов при увеличении до $15-40^{\times}$. Особенности строения поверхности разрушения фиксируются на схеме. Поверхность рассматривается под различным направлением к источнику освещения.

Вместо составления схемы излома допускается его фотографирование — сначала без дополнительного увеличения, затем через объектив микроскопа с помощью микрофотонасадок.

После очистки излома в кислотных растворителях желательно промыть его в растворе щелочи, воде и просушить гигроскопической бумагой или в струе теплого воздуха.

Вторичное визуальное исследование поверхности излома, очищенной от посторонних включений и окислов, позволяет выявить особенности его строения, скрытые слоем продуктов загрязнения, нанести их на схему и сфотографировать. При повторном осмотре излом также наклоняют под разными углами к источнику освещения. Это позволит не только правильно определить рельеф, но и выявить участки с различной отражательной способностью (блеском).

Следующий этап — изучение строения изломов через лупу $5-10$ -кратного увеличения с большим полем зрения при косом освещении. Выявленные особенности рельефа наносят на схему.

Отдельно участки излома желательно дополнительно исследовать с помощью бинокулярного микроскопа при

увеличении 20–80^х для выявления мелких дефектов в виде пор и включений. Детальное изучение фокуса излома целесообразно проводить при увеличении до 120^х. Выявленные особенности поверхности разрушения наносятся на схему.

Макроскопическое изучение поверхности излома заканчивается его фотографированием. Оптимальный угол освещения и увеличение при фотографировании выбирают в зависимости от характера неровностей на поверхности и требуемой четкости передачи на фотоснимке той или иной особенности строения излома. Необходимо учитывать, что чрезмерное увеличение может привести к снижению глубины резкости и искажениям.

Исследование изломов с помощью металлографических микроскопов. С помощью металлографических микроскопов проводят детальное исследование строения отдельных участков излома. Для этих целей желательно использовать микроскоп типа МИМ-9.

Поскольку излом имеет сложную поверхность, получение резкого изображения на всем поле с возрастанием увеличения затруднительно. В связи с этим необходимо учитывать следующее: исследование общего вида излома начинают при увеличении порядка 100–120^х. Рассматривая общую картину излома, выделяют характерные участки или области с какими-либо особенностями, а затем исследуют фасетки при большем увеличении.

Изучение строения фасеток осуществляют с применением прямого и косого освещения. Исследование излома при увеличении до 500^х в прямом свете при слегка наклонном положении объекта, закрепленного в приспособлении, позволяет подчеркнуть микрорельеф поверхности вследствие чередования света и тени, создающего впечатление глубины.

Ввиду того, что излом имеет шероховатую поверхность, обычно изучают микроучастки, расположенные на самих выступах, недалеко от края. В том случае, если сохранность излома не является обязательной, возможно стачивание наиболее выступающих частей (выравнивание).

При изучении изломов с большим увеличением следует использовать методику последовательного фотографирования поверхности разрушения на различной глубине, от снимка к снимку перемещая объектив на глубину его резкости и применяя метод выравнивания поверхности. Полученные снимки монтируют, прикладывая друг к другу участки с резким изображением излома. Съемку следует вести при минимально возможной апертурной диафрагме с соблюдением следующих условий:

$$n_0 = \frac{H}{h}; \quad H \leq F; \quad h_1 \leq h; \quad h_2 \leq h; \quad h_3 \leq h, \dots, h_i \leq h,$$

где n_0 — число съемок; H — высота структурного рельефа; F — фокусное расстояние объектива; h — глубина резкости; h_i — расстояние между средними линиями изображений.

Особое значение при исследовании поверхности разрушения с использованием металлографических микроскопов имеет сохранность чистоты излома. Необходимо тщательно оберегать его от окисления, пыли и попадания масла, так как всякая дополнительная чистка вносит искажение в структуру и может нарушить первоначальный рельеф. Загрязненный после разрезки на части излом промывают сначала в бензине путем последовательных погружений и легкого взбалтывания, затем в ацетоне и спирте. Недопустимо прикладывать одну половину излома к другой, трогать поверхность разрушения руками. Образцы рекомендуется хранить в эксикаторе или в коробочках завернутыми в вату.

Микроскопическое изучение излома с помощью световых микроскопов рекомендуется проводить в следующем порядке:

1. Исследование изломов с помощью бинокулярных и стереоскопических микроскопов с линейным увеличением до $200\times$.

2. Фотографирование выбранных участков излома по методикам, применяемым при фотографировании металлографических шлифов.

3. Разрезка излома на отдельные образцы перпендикулярно плоскости разрушения.

4. Очистка, промывка и сушка образцов.

5. Детальное исследование отдельных участков излома на металлографических микроскопах с линейным увеличением до 500^{\times} .

6. Фотографирование отдельных участков поверхности разрушения.

7. Изучение строения фасеток скола при линейных увеличениях до 1000 – 1500^{\times} и фотографирование.

8. Выравнивание наиболее выступающих участков излома и последовательное фотографирование поверхности разрушения на различной глубине.

5.5.7. ОЦЕНКА КРИСТАЛЛИЧНОСТИ ИЗЛОМОВ

Поверхность разрушения может состоять из участков, характерных как для хрупкого, так и вязкого излома. Для исследования таких полухрупких или смешанных изломов на макроуровне главным параметром является степень или коэффициент кристалличности, т. е. отношение площади, занятой кристаллическими участками, ко всей площади излома.

Различие в поведении пластичных и хрупких материалов под нагрузкой весьма существенно. Пластическая деформация предохраняет материал при перегрузках от разрушения. Материалы в хрупком состоянии обладают очень малой энергоемкостью и поэтому плохо сопротивляются действию динамических, растягивающих нагрузок и весьма чувствительны к конструктивным концентриаторам напряжений и дефектам.

Хрупкое и вязкое разрушения в изломе выглядят по-разному. Полностью хрупкий разрыв распространяется в кристаллических телах вдоль простых кристаллографических плоскостей и дает гладкую поверхность излома, состоящую из плоских граней расколотых кристаллитов. Последние обладают высокой отражающей способностью, что создает металлический блеск. Такой вид разрушения часто называют «отрыв». В месте отрыва заметной остаточной деформации металла не наблюдается. Он происходит из-за воздействия нормальных напряжений.

Пластическое разрушение сопровождается пластической деформацией. Здесь кроме нормальных напряжений в разрушении участвуют и касательные, так как пластическая деформация вызывается действием только касательных напряжений.

Вследствие указанных причин хрупкие материалы для изготовления ответственных элементов, работающих на растяжение, не пригодны.

Анализ причин аварий конструкций и машин, проводящийся периодически в разных областях техники, показывает, что разрушение деталей имеет во многих случаях хрупкий характер, в то время как эти детали были сделаны из пластичных материалов. Образцы, вырезанные из потерпевших аварию объектов после их хрупкого разрушения, при испытаниях на осевое растяжение в лабораторных условиях снова показывают пластический характер разрушения, которому предшествует заметная пластическая деформация.

Таким образом, хрупкость и пластичность не есть неизменные свойства материалов, а являются лишь состояниями, в которых материалы могут находиться. Под влиянием различных факторов материалы могут переходить из хрупкого состояния в пластичное и наоборот.

Классификация видов изломов. Под изломом понимают поверхность, образовавшуюся в результате разрушения (разделения на части) образца или детали.

Излом содержит информацию об особенностях и причинах разрушения. Вид излома определяется условиями нагружения (напряженным состоянием, скоростью и амплитудой нагружения), кристаллографическими строением и микроструктурой металла, деформируемой технологией его выплавки, обработки давлением и термообработки, наличием текстуры и анизотропии механических свойств, температурными условиями и средой, в которых работает конструкция. Методами фрактографии решаются такие важные задачи, как оценка металлургического качества и структуры металла, изучение закономерностей процесса разрушения, его механизма, кинетики, влияния структурных, технологических и прочих факторов на разрушение, установление характера и причин эксплуатационных разрушений.

Классификация основных видов изломов

Признак, по которому проводится классификация	Вид излома	Определение, характерные признаки
1	2	3
По характеру силового воздействия*	Изломы кратковременного однократного статического и динамического нагружения	Нагрузка в основном монотонно изменяется, периода постоянной нагрузки нет или он мал относительно периода нагружения
	Изломы длительного статического нагружения (замедленного разрушения, ползучести, коррозии под напряжением)	Период изменяющейся нагрузки соизмерим с периодом процесса развития повреждений, приводящих к разрушению
	Изломы усталостного разрушения (собственно усталостные, малоцикловые усталостные, коррозионно-усталостные, термоусталостные, пр.)	Нагрузка периодически и многократно изменяется в процессе нагружения и разрушения. На поверхности разрушения наблюдаются несколько зон с различным макрорельефом
По ориентации излома	Прямой	Поверхность разрушения ориентирована нормально к оси образца или детали (образование поверхности разрушения, перпендикулярной к направлению наибольших растягивающих усилий, является признаком макрохрупкого разрушения)
	Косой	Поверхность разрушения наклонена под углом к оси образца или детали (является признаком макровязкого разрушения)
	Прямой со скосами (чашечный)	
По макрографии излома	Однородный	Излом, характеризующийся морфологически единой поверхностью разрушения
	Неоднородный	Излом, характеризующийся наличием зон, отличающихся по макрорельефу
	Звездочкой	Поверхность разрушения с наклонными площадками в виде радиальных лучей

1	2	3
По макро-геометрии излома	Шевронный	Излом характеризуется системой ступенек, образующих рисунок «елочки» или шеврона
	Сложной формы	
По шероховатости, блеску и цвету	Кристаллический	Поверхность разрушения, характеризующаяся наличием блестящих плоских участков. Является признаком хрупкого излома
	Волокнистый	Поверхность разрушения, характеризующаяся наличием волокон, образующихся при пластической деформации зерен в процессе разрушения. Является признаком вязкого излома
	Волокнисто-полосчатый	Поверхность разрушения, характеризующаяся наличием слоистости. Слоистость связана, как правило, со структурной неоднородностью деформированного в процессе изготовления материала
	Волокнисто-чешуйчатый	Излом, характеризующийся наличием гладких участков в виде чешуек. Характерен для разрушения деформированных материалов в направлении толщины листа (перпендикулярно плоскости листа)
	Камне-видный	Излом, характеризующийся бугорчатым грубозернистым строением; зерна без металлического блеска выглядят как бы оплавленными. Имеет место у перегретой стали
	Фарфоровидный	Поверхность разрушения с почти неразличимой кристалличностью строения, гладкая, матовая, сходная с поверхностью разрушения фарфора
	Бархатистый	Гладкая, без кристаллического блеска поверхность разрушения. Встречается у закаленных инструментальных сталей
	Нафталинистый	Поверхность разрушения, характеризующаяся крупнозернистым строением при наличии на поверхности гладких, блестящих, неметаллического вида фасеток. Встречается в инструментальных сталях при неправильной технологии горячей механической и термической обработок
	Матовый	
	Блестящий	
	Серый, черный, синий и др.	

1	2	3
По степени пластической деформации, протекающей в процессе разрушения*	Хрупкий	Относительное сужение площади поперечного сечения не превышает 1,5%
	Квазихрупкий	Относительное сужение площади поперечного сечения не превышает 15%
	Вязкий	Относительное сужение площади поперечного сечения превышает 15%
По микромеханизму разрушения*	Хрупкий	Излом при разрушении путем скола. Трещина распространяется по определенным кристаллографическим плоскостям или границам зерен. К особенностям микрорельефа относятся: фасетки внутризеренного и межзеренного скола, ступеньки скола, ручистый узор, язычки. Ступеньки скола и язычки входят друг в друга на двух ответных поверхностях разрушения
	Квазихрупкий	Излом при разрушении путем квазискола, при котором наряду с признаками хрупкого разрушения обнаруживаются признаки некоторой локальной пластической деформации. К особенностям микрорельефа относятся: фасетки квазискола, гребни, ступеньки, язычки. Ступеньки скола и язычки входят друг в друга на двух ответных поверхностях излома, в то время как гребни выступают на обеих половинках излома
	Вязкий	При разрушении вследствие зарождения, роста и слияния микропустот наблюдается ямочный излом. При этом чем выше способность материала к пластической деформации, тем больше глубина ямок. К особенностям микрорельефа относятся ямки: равноосные и вытянутые
	Усталостный	Излом вследствие развития усталостной трещины. К особенностям микрорельефа относятся: усталостные бороздки, траковые следы. На поверхности разрушения могут наблюдаться также все особенности микрорельефа, характерные для хрупкого и вязкого разрушения и другие элементы рельефа, например ровные вытянутые участки (плато), на которых наблюдается рябь. Усталостные бороздки не всегда обнаруживаются в усталостных изломах, особенно в высокопрочной стали
По связи с элементами структуры материала	Внутризеренный	
	Межзеренный	
	Межсубзеренный	

1	2	3
По энергии разрушения стандартных образцов*	Хрупкий	Малая (условно) работа разрушения ($K = 5 \text{ Дж}$)
	Квази-хрупкий	Средняя (условно) работа разрушения ($K = 5-20 \text{ Дж}$)
	Вязкий	Высокая (условно) работа разрушения ($K = 20 \text{ Дж}$)

* Наиболее важные признаки классификации.

Классификация основных видов излома и термины с некоторыми сокращениями представлены в табл. 5.1. Определение излома как вязкого или хрупкого требует обязательного указания признака, по которому проведена идентификация.

Например, полное описание излома типа сотового рельефа будет следующим: излом хрупкий по степени пластической деформации и энергии разрушения, вязкий по микромеханизму разрушения. Возможны также случаи образования изломов вязких по степени пластической деформации, но хрупких по микромеханизму и энергии разрушения.

5.5.8. НЕКОТОРЫЕ ТЕРМИНЫ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ ДЛЯ ОПИСАНИЯ ИЗЛОМОВ

Ступенька — след слияния двух трещин при образовании магистральной. Может быть различной формы: как прямолинейной, так и изогнутой.

Линии усталостные — расходящиеся от очага разрушения отметки фронта трещины на определенной стадии ее развития.

Трещина магистральная — трещина, по которой произошло полное разрушение.

Для описания микрорельефа изломов применяются термины:

1. Фасетка — элемент поверхности разрушения, лежащий в одной или близких плоскостях, отделенных границей, в пределах которой разрушение развивается в одном

направлении. При визуальном рассмотрении и использовании оптического микроскопа выглядит как блестящий участок; в растровом электронном микроскопе — как область одинакового цвета (степени почернения).

2. **Фасетка скола** — фасетка, образующаяся в результате разрушения по определенным кристаллографическим плоскостям (плоскостям скола; для поверхностей скола характерен ручистый узор и язычки).

3. **Ручистый узор** — система сходящихся ступенек скола, образующаяся в результате разрушения перемычек между хрупкими трещинами, распространяющимися путем скола по параллельным, близкорасположенным кристаллографическим плоскостям (может быть и веерообразным).

4. **Язычок** — элемент микрорельефа треугольной или трапециевидной формы, образовавшийся в результате локального разрушения вдоль поверхности раздела матрица-двойник.

5. **Гребень** — вытянутый участок, возвышающийся над поверхностью излома и образовавшийся в результате пластической деформации и разрушения перемычек между трещинами.

6. **Фасетка квазискола** — относительно ровный (плоский) участок разрушения, не всегда связанный ориентационно с плоскостями скола и характеризующийся тем, что наряду с признаками хрупкого разрушения имеют место признаки пластической деформации (для квазискола характерно мелкое хаотическое строение, связанное с субструктурой, межфазными границами и пр.).

7. **Ямка** — микроуглубление на поверхности излома, возникающее в результате образования, роста и слияния микропустот.

8. **Расслоение** — разделение вдоль границы волокна (параллельно направлению распространения трещины) с образованием плоских участков.

9. **Усталостные бороздки** — элемент микрорельефа усталостного излома в виде повторяющихся вытянутых углублений и выступов, ориентированных перпендикулярно направлению развития трещины (расстояние меж-

ду бороздками коррелировано со скоростью развития трещины и условиями нагружения).

10. Траковые следы — элемент микрорельефа усталостного излома, образовавшийся в результате соприкосновения противоположных поверхностей разрушения.

5.5.9. ОСОБЕННОСТИ УСТАЛОСТНЫХ ИЗЛОМОВ

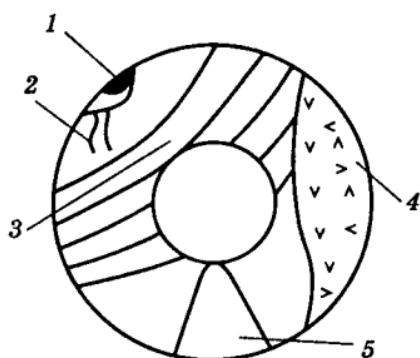
Усталостные изломы имеют характерные признаки, которые позволяют отличить их от изломов другого рода. На их поверхности можно различить пять зон и характерных особенностей (рис. 5.3).

Фокусом излома называют малую локальную зону, близкую к точке, в которой возникает начальная микроскопическая трещина усталости и откуда начинается ее развитие. Обычно фокус излома располагается на поверхности в местах концентрации напряжений или поверхностных дефектов в виде царапин, трещин, неметаллических включений и т. п. При наличии внутренних дефектов или при поверхностном упрочнении фокус излома может располагаться и под поверхностью.

Очаг разрушения — малая зона, прилегающая к фокусу излома и соответствующая начальной макроскопической трещине усталости. Зона излома в области очага разрушения обычно характеризуется наибольшим блеском и наиболее гладкой поверхностью по сравнению с другими участками излома. Усталостные линии на поверхности очага обычно отсутствуют. На усталостном изломе могут быть и несколько очагов разрушения. При

Рис. 5.3
Схема усталостного излома шатунной шейки коленчатого вала:

1 — фокус излома и очаг разрушения; 2 — вторичные ступеньки и рубцы; 3 — усталостные линии в зоне избирательного развития; 4 — зона ускоренного развития излома; 5 — зона долома.



установлении причины разрушения большое значение имеет правильное выявление очагов разрушения.

Участок избирательного развития соответствует зоне развившейся трещины усталости. Эта зона часто имеет вид гладкой блестящей поверхности с усталостными линиями, волнообразно расходящимися от очага разрушения, как из центра. Усталостные линии — это следы фронта продвижения трещины. Направление развития первоначальной трещины может измениться. При этом образуются зародившиеся трещинки, развивающиеся в другом направлении и называемые пасынковыми. От слияния пасынковых трещин образуются вторичные ступеньки и рубцы (см. рис. 5.3).

Гладкий и блестящий вид участка избирательного развития объясняется не трением и наклепом, возникающими вследствие притирания смежных поверхностей, а связан с микроизбирательностью распространения усталостной трещины.

Участок ускоренного развития является переходной зоной между участком собственно усталостного развития трещины и зоной долома. Эта зона образуется в течение нескольких циклов, предшествующих окончательному разрушению.

Зона долома образуется на последней стадии излома. Зачастую она обладает признаками макрохрупкого разрушения.

Изучение формы и свойств поверхности усталостных изломов позволяет в ряде случаев судить о характере усилий, вызвавших разрушение, о степени перегруженности сломавшейся детали и тому подобное, что позволяет правильно определить причину, вызвавшую разрушение детали и наметить мероприятия по предотвращению повторных разрушений.

5.5.10. КОЛИЧЕСТВЕННЫЕ МЕТОДЫ ОЦЕНКИ КРИСТАЛЛИЧНОСТИ ИЗЛОМОВ

Процент кристалличности часто определяется при визуальном рассмотрении излома или при увеличении до 20^х.

Процент кристалличности = $\frac{\text{кристаллическая зона}}{\text{общая площадь излома}} \times 100$.

Возможно планиметрирование площади всего излома и кристаллических участков по фотоснимку поверхности разрушения.

Кристалличность излома оценивают также по диаграммам и специальным картам. Этот метод позволяет определить 0, 10, 20, 30, 50, 80 и 100% кристалличности.

Фотометрический метод определения кристалличности основан на зависимости отражающей способности поверхности излома от величины и степени деформации зерен. Сравнивают степени черноты излома и полированного нетравленного шлифа. Относительную степень кристалличности определяют по формулам, соответствующим негативным (5.1) и позитивным (5.2) изображениям:

$$D_H = \Phi_1 - \mathcal{E}_1 + 100; \quad (5.1)$$

$$D_H = \Phi_2 - \mathcal{E}_2 + 100, \quad (5.2)$$

где D_H — деформированность зерен в единицах черноты; Φ — степень черноты фасеток; \mathcal{E} — степень черноты эталона.

К полученной разности прибавляют 100, так как в противном случае результаты будут занижены на величину степени черноты эталона.

Следует отметить, что общепризнанного метода, позволяющего производить объективную количественную оценку процентного содержания долей вязкой и хрупкой составляющей в изломе, пока не существует.

5.5.11. ОБЩАЯ СХЕМА ФРАКТОГРАФИЧЕСКОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

Общая схема фрактографического исследования при анализе разрушения сводится к следующему:

1. Составление схемы разрушения, выявление первичного разрушения; определение на детали места расположения излома, в частности, не совпадает ли место разрушения с зоной действия наибольших напряжений; имеются ли в детали конструктивные концентраторы напряжений; как взаимно расположены концентраторы и место излома, а также очаг излома. Выявление в изломе

металлургических дефектов; связи очага излома с дефектами, коррозионными, эрозионными и другими повреждениями.

2. Определение макроориентированности излома относительно направления действия главных напряжений (если последние известны).

3. Определение вида излома по характеру силового воздействия (от однократного нагружения, длительного статического нагружения или усталостного).

4. Характер разрушения в изломе по степени пластической деформации или по микромеханизму разрушения (хрупкий, квазихрупкий, вязкий, усталостный).

5. Определение на поверхности излома наличия достаточно резко разграниченных макроскопических различных по строению и цвету зон и участков, что будет свидетельствовать о протекании разрушения во времени; наличия различных макроскопических знаков — рубцов, ступенек, усталостных линий и т. д.

6. Выявление наличия на изломе продуктов коррозии, окислов и тому подобных; их связь с очагом излома.

7. Выявление наличия трещин вблизи и вдали от излома; оценка их расположения, количества, направления.

8. Составление заключения.

В заключении предоставляются: характер разрушения детали; факторы, способствующие разрушению (уровень напряжений или температуры, концентраторы напряжений в виде рисок, отсутствия радиусов перехода, перепады жесткости и т. д.).

5.5.12. ОРГАНИЗАЦИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ ПРИЧИН ОТКАЗОВ

Причина отказа элемента машины считается выявленной, если в результате данных исследований удается составить четкую и обоснованную формулировку этой причины.

Выполнение требования, изложенного выше, обеспечение возможности выявления причин как можно большего числа фиксируемых отказов машин, установленной

для испытательной организации номенклатуры, возможно при наличии в испытательной организации четко организованной и постоянно функционирующей системы исследований этих причин.

Система исследований причин отказов входящих в общую систему сбора и обработки информации о надежности машин, должна обеспечивать:

1. Тесную увязку работы по исследованиям причин со сбором и анализом статистических данных об отказах.

2. Планомерность и постоянство работ, описанных в предыдущих разделах.

3. Достаточный методический уровень исследований и квалифицированный анализ их данных.

4. Достаточно высокий профессиональный уровень персонала исполнителей исследований.

5. Возможность предоставления в распоряжение исполнителей необходимых для исследований технических средств и услуг аналитических лабораторий.

6. Возможность применения специальных стендовых испытаний.

Принятие организационных и методических решений требует учета сложности исследований тех или иных видов отказов (классификация отказов по сложности исследования их причин представлена в табл. 5.2).

Организацию работы по исследованиям рекомендуется осуществлять, придерживаясь следующей схемы:

1. По данным сбора статистических данных об отказах составляются перечни отказов с установленными причинами их возникновения (отдельные перечни могут и не составляться, но в этом случае форма перечня должна обеспечивать возможность наименее трудоемкой выборки данных о причинах отказов).

2. Отказы с неустановленными причинами систематизируются по принадлежности к определенным группам их видов (отказы, связанные, например, с изломами, износами в условиях несовершенной смазки, разрушениями и износами неметаллических изделий, разрушениями сварных швов и т. п.). К каждому из этих отказов составляется перечень предполагаемых и(или) возможных причин.

Таблица 5.2

Классификация отказов по сложности исследования их причин

№*	В результате чего достигается выявление причины отказа	Источники информации, отчетные документы
1	Причина отказа очевидна — для ее выявления достаточно данных эксплуатационных наблюдений или опроса персонала, обслуживающего машину	Материалы первичных документов регистрации отказов
2	Анализ данных технического осмотра отказавшей(ых) детали(ей)	Протокол технической экспертизы детали(ей), законченный на стадии технического осмотра — данные осмотра дают возможность сформулировать причину отказа
3	Анализ данных технического осмотра детали(ей) и данные лабораторных исследований материала этой(их) детали(ей)	Протокол технической экспертизы, законченный на стадии лабораторных исследований — данные технического осмотра и лабораторных исследований материала детали(ей) дают возможность сформулировать причину отказа
4	Анализ данных обследований технического состояния, условий эксплуатации машины, технического осмотра дефектной(ых) детали(ей) и(или) лабораторных исследований	То же, что по п. 3, и документы, содержащие систематизированные данные обследований в условиях эксплуатации и периодических обследований технического состояния машин. Анализ данных и заключения в протоколе техэкспертизы
5	Логические обоснования в результате анализа данных обследований условий эксплуатации и(или) технического состояния машин	Отчет (доклад, справка) о выполнении задания(ий) на расследование причин эксплуатационных отказов определенного этим заданием вида(ов)
6	Логические и расчетные обоснования в результате изучения проектной, конструкторской и эксплуатационной документации в увязке с данными обследований условий эксплуатации и технического состояния машины и изучение режимов в заданных условиях эксплуатации. Контроль правильности полученного заключения путем применения стендовых или эксплуатационных испытаний элементов машины в условиях, имитирующих критические режимы нагружения	Отчет (доклад) о выполнении задания(ий) на расследование причин отказов, связанных с недостатками конструкции элементов машины и несоответствием требований эксплуатационной документации условиям эксплуатации

* Условный номер группы сложности исследований.

3. Далее отказы систематизируются по принадлежности к группам возможных и(или) предполагаемых причин.

4. Перечень отказов, систематизированный по указанной в предыдущем абзаце принадлежности, используется для составления программы работ по исследованиям причин отказов.

5. Из указанного выше перечня выбираются отказы, по которым проведены технические экспертизы детали(ей) на уровне технического осмотра, и по полученным в результате этого данным принимается решение об организации лабораторных исследований или микрометража.

6. Отказы, по которым проведены технические экспертизы детали(ей) на уровне лабораторных исследований, и отказы, по которым совсем не проводилось технических экспертиз детали(ей), систематизируются по принадлежности к способам и методам расследований.

7. Составляются задания на исследования, которые должны быть обеспечены необходимыми методическими и(или) инструктивными документами.

8. При отсутствии готовых методик или инструкций, регламентирующих цели, порядок, правила, способы, методы исследований, такие документы должны быть разработаны.

9. Решается вопрос об исполнителях исследований.

10. Задание выдается исполнителю(ям).

11. Производится исследование.

12. После выполнения задания исполнитель(и) составляет(ют) отчетный документ, требования к которому должны быть изложены в задании.

13. Если в результате исследований причина отказа (группы отказов) установлена, то этот отказ (группа отказов) включается в перечень отказов с установленными причинами — в противном случае принимается решение об изменении направления исследования.

Содержание задания на исследование определяется его сложностью (табл. 5.2) и(или) объемами ранее проведенных работ по исследованиям.

Для исследования причин отказов 1–3 групп сложности исследований специальное задание не составляется

(порядок проведения таких исследований должен быть заложен в методике сбора статистических данных об отказах).

К отказам 4-й группы сложности следует относить те отказы, исследование причин которых на стадии технического осмотра и лабораторных исследований не дает оснований для обоснования причины, но предварительные логические предположения дают основания для заключения о связи отказа с условиями эксплуатации. Задание на исследование причин отказов 4-й группы сложности рекомендуется составлять на группу отказов, в которой последние могут быть объединены под одной предполагаемой причиной, связанной с условиями эксплуатации.

К 5-й группе сложности исследований отказов (см. табл. 5.2.) относятся отказы, технических экспертиз деталей по которым не проводилось, и имеются только логические предположения о причинах, связанных с условиями эксплуатации. Задания на исследования причин 5-й группы отказов следует составлять на группу отказов, объединенных под несколькими предполагаемыми причинами, связанными с некоторыми взаимосвязанными факторами условий эксплуатации.

К 6-й группе относят отказы, исследования причин которых по заданиям на 4-ю и 5-ю группы не приводят к решению рассматриваемой задачи — это отказы, связанные с конструктивными недостатками и несоответствиями в требованиях эксплуатационной документации условиям эксплуатации.

Исследование причин отказов 6-й группы сложности представляет собой наиболее сложный процесс по сравнению с отказами 1–5-й групп и в большинстве случаев является заключительным этапом исследований, следующим за исследованиями на уровне 4-й и(или) 5-й групп отказов.

Задание на исследование отказов 6-й группы составляется на один конкретный вид отказа, а также на группу видов отказов, когда к каждому из них могут быть применены одинаковые методы и технические средства исследований и использованы одинаковые источники информации.

Задание на исследование должно содержать:

- 1. Описание(я) отказа (группы отказов).**
- 2. Перечень возможных причин возникновения отказа(ов).**
- 3. Статистические данные об отказе(ах), значимость последствий отказа(ов).**
- 4. Данные ранее проведенных исследований причин аналогичных видов, отказов.**
- 5. Формулировку задачи по исследованиям.**
- 6. Указания на то, какие конструкторские и эксплуатационные документы и их части следует изучить и в каком аспекте их проанализировать.**
- 7. Указания по изучению данных обследований условий эксплуатации и технического состояния машин технических осмотров и лабораторных исследований.**
- 8. Метод (методику или ссылку на нее) исследования режимов нагружения изучаемого элемента машины в условиях эксплуатации.**
- 9. Указания по анализу полученных в результате исследования данных по проверке полученного заключения о причине отказа (группы отказов) и применению стендовых или эксплуатационных испытаний образцов(а) элемента машины с имитацией критических режимов нагружения деталей.**
- 10. Этапы и сроки выполнения исследований.**
- 11. Требования к отчетному документу.**
- 12. Перечень предоставляемых в распоряжение ответственного исполнителя средств исследований.**

Исполнители исследований должны быть обеспечены необходимыми для исследований материалами, документацией, техническими средствами и им должны быть предоставлены необходимые условия для выполнения задания.

При создании системы исследований причин отказов необходимо:

- 1. Определить организационную структуру руководства по выполнению исследований; главное лицо, ответственное за работу в целом, и лиц, ответственных за выполнение отдельных частей рассматриваемой работы.**

2. Определить функции ответственных лиц.

3. Выявить объемы работ по исследованиям; конкретные ее части; потребность в технических средствах исследований, специалистах, способных выполнять определенные части работ по исследованиям, в методической, нормативной и руководящей документации.

4. Определить порядок документирования (регистрации) выполнения исследований, визирования и представления документов для их использования в работе по обеспечению надежности машин.

5. Разработать и осуществить мероприятия по организации рабочих мест исполнителей; материально-техническому обеспечению исследований; обеспечению НТД; составлению необходимой методической и инструктивной документации; созданию и(или) реорганизации аналитических подразделений (лабораторий, групп); решить вопросы размещения заказов на проведение отдельных видов работ по исследованиям в сторонних организациях.

Организационная структура руководства исследованиями и исполнения этой работы должна вписываться в общую структуру управления исследованиями надежности машин, действующей в испытательной организации или в испытательном подразделении завода-изготовителя машин.

5.6. РЕЗЕРВИРОВАНИЕ НАДЕЖНОСТИ

Резервирование — метод повышения надежности введением избыточности, т. е. введением дополнительных средств и возможностей сверх минимально необходимых для выполнения объектом заданных режимов.

Примеры резервирования: запасные части (холодный резерв), резервные машины, дублирующие (избыточные) узлы и агрегаты.

Виды резервирования: функциональное, нагружочное.

Функциональное резервирование предусматривает использование способности элементов выполнять допол-

нительные функции, например использование одновременно амортизирующих и связывающих (крепежных) элементов типа амортизаторов.

Нагрузочное резервирование заключается в способности объекта воспринимать дополнительные нагрузки, например за счет коэффициента запаса прочности.

Основным называют элемент структуры объекта, минимально необходимый для выполнения объектом заданных функций.

Резервный элемент (резерв) — элемент, предназначенный для обеспечения работоспособности объекта в случае отказа основного элемента.

Кратность резервирования — отношение числа резервных элементов к числу резервируемых основных.

Дублирование — резервирование, кратность которого равна единице.

В надежности различают два основных вида соединения элементов: последовательное и параллельное.

При последовательном соединении отказ одного элемента влечет за собой отказ всей системы. Большинство механизмов передач машин представляет собой систему последовательно соединенных элементов.

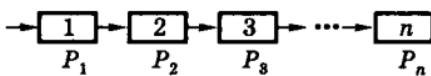


Рис. 5.4
Последовательное соединение элементов

Вероятность безотказной работы системы с последовательным соединением элементов (рис. 5.4) определяется по формуле умножения вероятностей независимых событий и равна произведению вероятностей безотказной работы составляющих ее элементов

$$P_{\text{посл}}(t) = P_1 \cdot P_2 \cdot P_3 \cdot \dots \cdot P_n = \prod_{i=1}^n P_i, \quad (5.3)$$

Вероятность отказа системы из последовательно соединенных элементов $q_{\text{посл}}$ будет

$$q_{\text{посл}} = 1 - P_{\text{посл}}(t). \quad (5.4)$$

При одинаковой вероятности безотказной работы P_i всех ($i = 1 \dots n$) последовательно соединенных элементов имеем

$$P_{\text{посл}}(t) = P_i^n. \quad (5.5)$$

Пример. Система состоит из 50 последовательно соединенных элементов ($n = 50$) с вероятностью безотказной работы каждого элемента $P_i = 0,99$. Вероятность безотказной работы всей системы равна

$$P_{\text{посл}}(t) = (0,99)^{50} \approx 0,6.$$

Параллельным соединением называется совокупность элементов, работоспособность которой нарушается только при условии отказа всех параллельных элементов, входящих в совокупность.

Параллельное соединение элементов в системе служит основой резервирования. Но последовательное и(или) параллельное соединения могут обеспечить лишь частичное резервирование. Для обеспечения полного резервирования иногда надо применять и то и другое соединение одновременно.

Пример. Фильтр гидросистемы может отказать в результате засорения и(или) разрушения. При засорении резервирование может быть обеспечено параллельным включением резервного фильтра, а при разрушении — последовательным.

Резервирование приводит к удорожанию конструкции машины или оборудования, поэтому оно должно быть экономически обоснованным. Например, является экономически оправданным наличие у автомобиля ножного и ручного тормозов, двух фар, но не оправдано наличие двух двигателей или двух коробок передач.

Если при параллельном резервировании резервные элементы постоянно присоединены к основным и постоянно находятся в том же режиме, что и основные, то это является нагруженным резервом.

Если резервные элементы находятся в менее нагруженном режиме (золотники гидрораспределителя для присоединения выносных гидроцилиндров), чем основной эле-

мент, то это является облегченным резервированием. В качестве холодного (ненагруженного каким-либо образом) резерва надежности являются запасные части.

Пример параллельных соединений с нагруженным и облегченным резервом представлен на рис. 5.5.

Вероятность безотказной работы при нагруженном резервировании может быть подсчитана следующим образом: если обозначить через q_1, q_2, \dots, q_n вероятность появления отказа каждого из элементов за время t , то отказ системы в случае параллельного соединения $q_{\text{пар}}$ произойдет при условии отказа всех n элементов, т. е.

$$q_{\text{пар}}(t) = q_1 \cdot q_2 \cdot \dots \cdot q_n = \prod_{i=1}^n q_i. \quad (5.6)$$

Вероятность безотказной работы системы $P_{\text{пар}}$ будет

$$P_{\text{пар}}(t) = 1 - \prod_{i=1}^n q_i = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - P_i). \quad (5.7)$$

Пример. Система состоит из трех параллельно соединенных элементов ($n = 3$). Вероятность отказа каждого элемента $q_i = 0,1$. Вероятность безотказной работы данной системы:

$$P_{\text{пар}}(t) = 1 - (0,1)^3 = 0,999.$$

Автомобиль (трактор) имеет в системе освещения фары, подфарники, габаритные огни, которые соединены методом резервирования, т. е. параллельно, по два изделия в каждой цепи. Отказ в работе одного объекта, например фары, не вызывает потерю освещения и позволяет продолжить эксплуатацию машины. Вероятность безотказной работы системы освещения в этом случае определяется по формуле (5.7).

Пример. Система, обеспечивающая безопасность водителя и автомобиля, состоит из подушек и ремней безопасности. Вероятность безотказной работы ремней безопасности $P_p = 0,98$, а подушек безопасности $P_n = 0,97$.

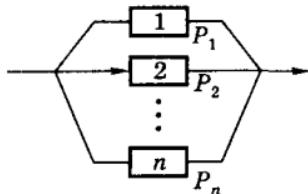


Рис. 5.5
Параллельное соединение с нагруженным или облегченным резервом

Вероятность отказа ремней (q_p) и подушек (q_n) соответственно можно записать так:

$$q_p = 1 - P_p = 1 - 0,98 = 0,02;$$
$$q_n = 1 - P_n = 1 - 0,97 = 0,03.$$

Вероятность полного отказа системы безопасности (q_t) будет записана так:

$$q_t = q_p \cdot q_n = 0,02 \cdot 0,03 = 0,0006.$$

А вероятность безотказной работы системы безопасности (P_T) можно записать как

$$P_T = 1 - q_p \cdot q_n = 1 - [(1 - P_p) \dots (1 - P_n)] =$$
$$= 1 - [(1 - 0,98) \cdot (1 - 0,97)] = 0,9994.$$

На практике встречаются структурные схемы, состоящие из m параллельных цепей, а каждая цепь имеет n последовательно соединенных элементов. Вероятность безотказной работы вычисляют с использованием формул для параллельно-последовательных схем.

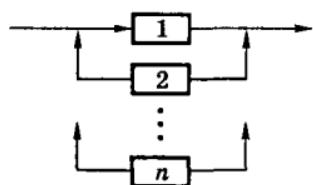


Рис. 5.6
Резервирование замещением ненагруженным резервом

Рассмотрим схемы различных видов соединений сложных цепей.

При ненагруженном резерве (рис. 5.6) резервный элемент практически не несет нагрузки. В этом случае используется резервирование замещением, при котором функции основного элемента передаются резервному только после отказа основного.

Резервирование замещением, при котором группа основных элементов объекта резервируется одним или несколькими резервными, каждый из которых может заменить любой отказавший основной элемент, называется скользящим резервированием.

Теория надежности дает практическую рекомендацию, а именно при прочих равных условиях выгоднее иметь в качестве резерва отдельные сборочные единицы (детали) сложных агрегатов нежели сам агрегат. То есть, имея в оборотном фонде отдельные элементы, например,

двигателя — головку блока цилиндров, узлы топливной аппаратуры, цилиндро-поршневую группу и т. п., можно восстановить одновременно работоспособность нескольких тракторов, чего нельзя сделать при одном резервном двигателе, объединяющем все вышеперечисленные узлы.

Расчеты по формулам теории надежности показывают, что один запасной двигатель внутреннего сгорания, расчлененный на отдельные элементы, дает примерно такой же эффект, как и пять запасных двигателей, хранящихся в сборе.

Резервирование, при котором резервируются отдельные элементы объекта (рис. 5.7), называется раздельным резервированием. При раздельном резервировании имеется возможность включить резервный элемент при выходе из строя любого, что значительно повышает надежность. При раздельном резервировании вероятность безотказной работы системы, состоящей из n последовательно соединенных элементов, вычисляется по формуле

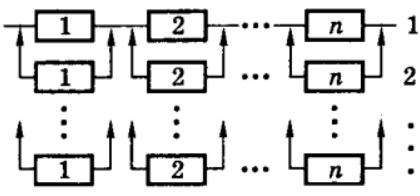


Рис. 5.7
Раздельное резервирование

$$P_{\text{разд}} = \prod_{i=1}^n \left[1 - \prod_{j=1}^m (1 - P_i) \right]. \quad (5.8)$$

При равнодежных элементах, когда $P_i = P$, эта формула имеет вид

$$P_{\text{разд}} = [1 - (1 - P)^m]^n. \quad (5.9)$$

Пример. Имеем три цепи ($m = 3$) по четыре последовательно соединенных элемента в каждой ($n = 4$). Вероятность безотказной работы каждого элемента $P = 0,9$. Вероятность безотказной работы всего соединения будет

$$P_{\text{разд}} = [1 - (1 - 0,9)^3]^4 = (1 - 0,1^3)^4 = 0,997.$$

Резервирование, при котором резервируется объект в целом, называется общим резервированием (см. рис. 5.8).

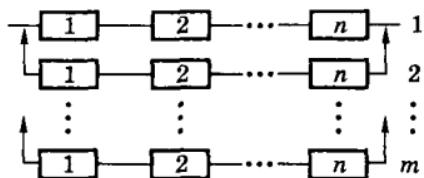


рис. 5.8
Общее резервирование

При общем резервировании вероятность безотказной работы (P_0) можно записать как

$$P_0 = 1 - \prod_{j=1}^m (1 - P_j) = 1 - \prod_{j=1}^m \left(1 - \prod_{i=1}^n P_i\right), \quad (5.10)$$

где P_i , P_j — соответственно вероятность безотказной работы одного элемента и всей цепи; m — количество цепей; n — количество элементов одной цепи.

Для случая равной надежности всех элементов, когда $P_i = P$, формула (5.10) принимает следующий вид:

$$P_0 = 1 - (1 - P^n)^m. \quad (5.11)$$

Подставив в формулу (5.11) исходные данные предыдущего примера, получим $P_0 = 1 - (1 - 0,9^4)^3 = 0,958$.

Итак, вероятность безотказной работы при общем резервировании ниже, чем при раздельном. Поэтому, например, выгоднее иметь сменные перепускные и предохранительные клапаны в запасе, нежели запасной распределитель в сборе.

Смешанное резервирование предусматривает совмещение различных видов резервирования. Например, может применяться общее резервирование отдельных объектов и раздельное резервирование наиболее ответственных и менее надежных элементов.

Резервирование может быть без восстановления и с восстановлением, при котором работоспособность любого основного и резервного элементов объекта в случаях возникновения их отказов подлежит восстановлению.

ОЦЕНКА ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ ТЕХНИКИ НА ЭТАПАХ СОЗДАНИЯ И ПРОИЗВОДСТВА

6.1. РАСЧЕТ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ МАШИН И ОБОРУДОВАНИЯ НА СТАДИИ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗАДАНИЯ

Технические требования по надежности (долговечности, ремонтопригодности, безотказности) могут быть заданы действующей нормативно-технической документацией (по проектированию, проведению планово-предупредительных ремонтов и другими специальными требованиями), уровнем надежности наиболее прогрессивных отечественных и зарубежных аналогов или требованиями потребителя.

Требование по долговечности выражается через величину ресурса до списания (полный ресурс) и через число капитальных ремонтов.

Ресурсные показатели на машину определяются следующим образом:

$$T_{p1K} = \frac{8760 \cdot T_{cl} \cdot K_{id} \cdot K_{ig} \cdot K_c}{\sum_1^k C^{k-1}}, \quad (6.1)$$

где T_{p1K} — средний ресурс до первого капитального ремонта; T_{cl} — средний срок службы до списания; K_{ig} — коэффициент использования машины в течение года; K_{id} — коэффициент использования машины в течение суток; K_c — коэффициент использования машины в течение смены; $C \geq 0,8$ — коэффициент сокращения ремонтных

циклов; K — предполагаемое число межремонтных циклов; 8760 — количество календарных часов в году.

В случае если проектируемое изделие капитальному ремонту не подвергается, то рассчитывается ресурс до списания так:

$$T_{\text{сп}} = 8760 \cdot T_{\text{сл}} \cdot K_{\text{ид}} \cdot K_{\text{иг}} \cdot K_c. \quad (6.2)$$

Если проектируемое изделие будет эксплуатироваться в многосменном режиме, то K может принимать значение больше 2, т. е. количество капитальных ремонтов может быть больше одного.

При использовании этой формулы необходимо учитывать как достигнутый уровень надежности, так и перспективный.

Коэффициент использования машин в течение года рассчитывается по формуле

$$K_{\text{иг}} = \frac{\text{число рабочих дней в году}}{365}. \quad (6.3)$$

Для машин, которые используются только в пределах рабочей недели и не используются по праздникам, $K_{\text{иг}} = 0,7$.

Коэффициент использования машины в течение суток определяется из выражения

$$K_{\text{ид}} = \frac{\text{часовая продолжительность рабочего дня}}{24}. \quad (6.4)$$

При работе в одну смену $K_{\text{ид}} = 0,33$; при работе в две смены $K_{\text{ид}} = 0,67$; при непрерывной работе в течение суток $K_{\text{ид}} = 1,0$.

Коэффициент использования машины в течение смены рассчитывается следующим образом:

$$K_c = \frac{\text{фактическое машинное время в смене}}{8}. \quad (6.5)$$

Гамма-процентный ресурс машины до первого капитального ремонта $T_{\text{p}1\kappa}$ рассчитывается и назначается в соответствии с принятой величиной среднего ресурса. Расчет гамма-процентного ресурса ведется по формуле

$$T_{\text{p}1\kappa} = \frac{T_{\text{p}1}}{K_\gamma}, \quad (6.6)$$

где K_y — соотношение среднего и гамма-процентного ресурсов, зависящее от закона распределения ресурса, с соответствующим коэффициентом вариации (v), и от заданного уровня регламентируемой вероятности γ (гамма).

Коэффициент вариации распределения ресурса машин до первого капитального ремонта определяется по статистическим данным эксплуатации машин-аналогов или прототипов.

Нижний уровень регламентированной вероятности при назначении гамма-процентного ресурса равен 80% как для машины в целом, так и для ее агрегатов, узлов и деталей.

Показатели ремонтопригодности, безотказности, а также комплексные показатели (коэффициент готовности и коэффициент технического использования) должны быть назначены не ниже, чем у машин-аналогов или прототипов, серийно выпускаемых к моменту проектирования новой машины. Величины показателей приводятся в картах технического уровня и технических условиях на изготовление машин и оборудования.

Определение показателей надежности агрегатов и узлов производится в соответствии с количественными показателями надежности на машину в целом. Ресурсы агрегатов и узлов до их замены или капитального ремонта назначаются в единицах наработки машины, причем средние ресурсы должны быть равными или кратными среднему ресурсу машины, т. е.

$$T_{p1K} = n \cdot T_{pi}, \quad (6.7)$$

где T_{p1K} — средний ресурс машины до первого капитального ремонта; T_{pi} — средний ресурс i -го агрегата или узла до замены или капитального ремонта, измеряемый в единицах наработки машины; n — кратность ресурсов, равная количеству замен или капитальных ремонтов данного агрегата или узла за межремонтный цикл машины.

Различные агрегаты и узлы загружены в рабочем цикле машины по-разному. Поэтому следует различать ресурс узла в единицах собственной наработки и ресурс узла в единицах наработки машины. Кратность собственных ресурсов необязательна.

Величина ресурса узла в единицах собственной наработки вычисляется по ресурсу в единицах наработки машины с учетом использования узла в рабочем цикле машины:

$$T'_{pi} = T_{pi} \cdot K_i, \quad (6.8)$$

где T'_{pi} — средний ресурс узла в единицах собственной наработки; T_{pi} — средний ресурс узла в единицах наработки машины; K_i — коэффициент использования узла в основных и вспомогательных операциях машины.

Значение коэффициента использования K_i рассчитывается по выражению

$$K_i = K_B \cdot K_H, \quad (6.9)$$

где K_B и K_H — коэффициенты использования узла соответственно по времени и по нагрузке.

При определении гамма-процентных ресурсов T_{pyi} агрегатов и узлов необходимо на основании расчета назначить вероятности их работы таким образом, чтобы обеспечивалась общая регламентированная вероятность работы машины в целом:

$$P_M(T_{py1K}) \geq 0,80. \quad (6.10)$$

Расчет вероятности работы машины без капитального ремонта в течение заданной наработки осуществляется с помощью структурных схем надежности.

При построении структурных схем руководствуются следующими положениями. Для машины, включающей в себя несколько агрегатов и узлов, состояний, соответствующих потребности в капитальном ремонте, может быть несколько. Такое состояние, когда для устранения ресурсных отказов отдельных агрегатов и узлов машины требуется проведение такого объема работ, который равен или больше по продолжительности простоя машины при ее капитальном ремонте (t_p), называется ситуацией капитального ремонта.

При оценке ремонтных ситуаций агрегаты и узлы группируются по времени их разборки-сборки (t_{pi}) та-

ким образом, чтобы $\sum_{i=1}^n t_{pi} \geq t_p$, где

n — количество наименований узлов в ремонтируемой группе. Каждая сформированная по такому принципу группа ремонтимых узлов соответствует ситуации капитального ремонта машины.

Графическое изображение структурных схем дает наглядное представление о составе узлов, образующих группы ремонтных ситуаций (рис. 6.1).

Принцип образования структурных схем рассмотрим на следующем примере.

Известно, что при проведении капитального ремонта четырех узлов, входящих в машину, затрачивается разное время, которое по отношению ко времени капитального ремонта всей машины соответственно: $t_{p1} = 1,0$; $t_{p2} = 0,6$; $t_{p3} = 0,3$; $t_{p4} = 0,1$.

Вероятность отработать установленную наработку до своего капитального ремонта каждым узлом соответственно равна P_1, P_2, P_3, P_4 .

Возможны самые различные ремонтные ситуации, при которых суммарное время будет равно или превысит t_p машины.

Сумма вероятностей всех возможных комбинаций дает полную вероятность капитального ремонта машины. Различные комбинации ремонтных ситуаций представлены в табл. 6.1.

После сложения вероятностей ремонтных ситуаций получим выражение для полной вероятности появления капитального ремонта машины

$$P_n(T_{p,IK}) = 1 - P_1[1 - (1 - P_2)(1 - P_3)(1 - P_4)]. \quad (6.11)$$

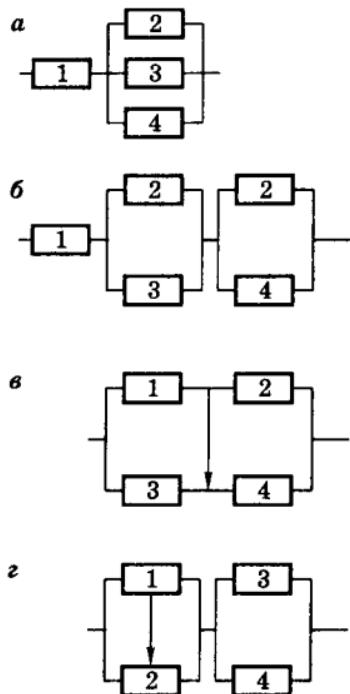


Рис. 6.1

Варианты структурных схем надежности машин с различной продолжительностью ремонтных операций

**Комбинации вероятностей ситуаций
капитального ремонта машины**

Номер узла	1	2	3	4	Общее относительное время ремонтных работ	Вероятность ситуации капитального ремонта
Относительное время ремонта	1,0	0,6	0,3	0,1		
1	2	3	4	5	6	7
Ремонтные ситуации	1	+	-	-	1,0	$(1 - P_1) \cdot P_2 \cdot P_3 \cdot P_4$
	2	+	+	-	1,6	$(1 - P_1) \cdot (1 - P_2) \cdot P_3 \cdot P_4$
	3	+	+	+	1,9	$(1 - P_1) \cdot (1 - P_2) \cdot (1 - P_3) \cdot P_4$
	4	+	+	+	2,0	$(1 - P_1) \cdot (1 - P_2) \cdot (1 - P_3) \cdot (1 - P_4)$
	5	+	-	+	1,3	$(1 - P_1) \cdot (1 - P_3) \cdot P_2 \cdot P_4$
	6	+	-	-	1,1	$(1 - P_1) \cdot (1 - P_4) \cdot P_2 \cdot P_3$
	7	+	-	+	1,4	$(1 - P_1) \cdot (1 - P_3) \cdot (1 - P_4) \cdot P_2$
	8	+	+	-	1,7	$(1 - P_1) \cdot (1 - P_2) \cdot (1 - P_4) \cdot P_3$
	9	-	+	+	1,0	$(1 - P_2) \cdot (1 - P_3) \cdot (1 - P_4) \cdot P_1$

Откуда вероятность работы машины без капитального ремонта за данную наработку (T_{py1K}) будет

$$P_M(T_{py1K}) = 1 - P_n(T_{py1K}) = \\ = P_1[1 - (1 - P_2)(1 - P_3)(1 - P_4)]. \quad (6.12)$$

Это выражение показывает, что в структурной схеме узел 1 соединяется последовательно с группой из трех остальных узлов, которые между собой соединены параллельно. На рис. 6.1 вместе с этой структурной схемой представлены еще три варианта ситуации капитального ремонта в зависимости от значений t_{pi} узлов.

В схеме (а) и (б) первая ремонтная ситуация будет иметь место при переборке первого узла. Вторая ремонтная ситуация в схеме (а) будет иметь место при одновременной разборке-сборке узлов 2, 3, 4.

В схеме (б) вторая ремонтная ситуация будет иметь место при переборке узлов 2 и 3, а также при переборке

узлов 2 и 4. Стрелка в схемах (в) и (г) обозначает, что этот узел (или группа узлов) в расчете общей вероятности капитального ремонта не учитывается ввиду его малого значения.

Регламентированная вероятность $P_M(T_{p\gamma 1K})$ работы машины без капитального ремонта в течение заданного гамма-процентного ресурса определяется как произведение регламентированных вероятностей работы отдельных узлов или групп (P_i):

$$P_M(T_{p\gamma 1K}) = \prod_{i=1}^m P_i. \quad (6.13)$$

При назначении гамма-процентных ресурсов агрегатов и узлов должно быть соблюдено следующее условие:

$$T_{p\gamma i} = T_{p1K}. \quad (6.14)$$

Величина среднего ресурса агрегата или узла в единицах собственно наработки рассчитывается по выражению

$$T'_{pi} = T_{pi} \cdot K_i. \quad (6.15)$$

Величина гамма-процентного ресурса агрегата или узла в единицах собственной наработки определяется по формуле

$$T'_{p\gamma i} = T_{p\gamma i} \cdot K_i = \frac{T'_{pi}}{K_{\gamma i}}, \quad (6.16)$$

где $K_{\gamma i} = T'_{pi} / T_{p\gamma i}$ — соотношение среднего и гамма-процентного ресурсов агрегата или узла в соответствующих единицах наработки.

Величина $K_{\gamma i}$ зависит от закона распределения ресурса, коэффициента его вариации и величины регламентированной вероятности ($\gamma_i = P_i$). Коэффициент вариации ресурсов (v) изделий есть отношение среднего квадратического отклонения (σ_{p1K}) к среднему значению ресурса (T_{p1K}), т. е.

$$v = \frac{\sigma_{p1K}}{T_{p1K}}. \quad (6.17)$$

Для расчетов на стадии проектирования ориентировочные значения коэффициентов вариации ресурсов агрегатов и узлов представлены в табл. 6.3, которая пред-

Таблица 6.2

Классификация факторов, определяющих вид закона распределения ресурса агрегата

Номер и содержание класса классификационного признака	Номер и содержание группы классификационного признака
1. По характеру отказа, разрушению	1. Износ, старение, коррозия. 2. Усталость
2. Степень стабильности условий работы	1. Стабильное. 2. Изменяющееся в широких пределах
3. Степень нагруженности изделия	1. При средних нагрузках. 2. При нагрузках, близких к максимальным
4. Уровень технологии изготовления изделия	1. Высокий. 2. Средний

Таблица 6.3

Рекомендуемые значения коэффициентов вариации ресурсов

Шифр определяющих факторов	Закон распределения	Коэффициент вариации	Шифр определяющих факторов	Закон распределения	Коэффициент вариации
1	2	3	1	2	3
1111	Н	0,1...0,2	2111	В	0,3...0,4
1112	Н	0,2...0,25	2112	В	0,3...0,45
1121	Н	0,2...0,3	2121	В	0,35...0,5
1122	Н	0,3...0,4	2122	В	0,4...0,5
1211	Н	0,3...0,4	2211	В	0,35...0,55
1212	В	0,4...0,5	2221	В	0,4...0,6
1222	В	0,5...0,6	2222	В	0,5...0,7

Примечания: Н — нормальный закон распределения, В — закон распределения Вейбулла.

усматривает классификацию факторов, определяющих вид закона распределения ресурса, представленную в табл. 6.2.

Цифры шифра означают номер группы классификационного признака. Место, занимаемое цифрой (слева направо), соответствует номеру класса классификационного признака.

Например, шифр 1221 означает, что по характеру разрушения определяющим для данного узла является износ (1).

По степени стабильности условия работы относятся к изменяющимся в широких пределах (2). Степень нагружения характеризуется нагрузками, близкими к максимальным (2), и уровень технологии изготовления агрегата высокий (1). Как следует из табл. 6.2 и 6.3, для такого узла наиболее вероятно ожидать распределение ресурса по закону Вейбулла с коэффициентом вариации в пределах 0,4...0,6.

Для агрегатов и узлов электрооборудования закон распределения ресурса следует считать экспоненциальным (Э) с коэффициентом вариации, равным 0,8...1,0.

Вычислив количественные значения K_{yi} , необходимые для получения равных или кратных средних ресурсов агрегатов (в единицах наработки машины), находим соответствующие им значения вероятностей (P_i) и рассчитываем общую вероятность работы машины без капитального ремонта в течение заданного гамма-процентного ресурса, исходя из ее структурной схемы.

Комплектующие изделия и базовые машины должны выбираться в соответствии с назначеными показателями надежности проектируемой машины и действующей системой технического обслуживания.

6.2. РАСЧЕТ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ МАШИН И ОБОРУДОВАНИЯ НА СТАДИИ ТЕХНИЧЕСКОГО ПРОЕКТА

Расчет норм надежности на стадии технического проекта производится с целью определения нормативов по детали в соответствии с требованиями на узлы. Кроме того, определяются основные показатели системы технического обслуживания. Основным показателем надежности деталей является средний ресурс до первого капитального ремонта (до замены).

Поскольку ресурсные показатели агрегатов и узлов определяются ресурсными показателями деталей, то при расчете надежности на стадии технического проекта, помимо определения среднего ресурса деталей, необходимо

рассчитать их регламентированные вероятности ($P_j = \gamma_j$) работы без замены, а затем их гамма-процентные ресурсы.

Средний ресурс детали в единицах наработки узла находится из выражения

$$T_{p\gamma} = \frac{T'_{pj}}{n'} = \frac{T_{pj} \cdot K_j}{n'}, \text{ моточасов (км)}, \quad (6.18)$$

где $n' = 1, 2, 3\dots$ — кратность ресурса детали ресурсу узла или предполагаемое число замен данной детали в узле.

Средний ресурс детали до первого ремонта или до замены в единицах собственной наработки определяется по выражению

$$T'_{pj} = T_{pj} \cdot K_j, \quad (6.19)$$

где K_j — коэффициент использования детали в рабочем времени узла.

Гамма-процентный ресурс детали в единицах наработки узла находится по формуле

$$T_{p\gamma j} = T'_{p\gamma i} = T_{p\gamma 1K} \cdot K_i. \quad (6.20)$$

Этот же ресурс в единицах собственной наработки:

$$\begin{aligned} T'_{p\gamma j} &= T'_{p\gamma i} \cdot K_j = \\ &= T_{p\gamma 1K} \cdot K_i \cdot K_j \text{ моточасов (км)}. \end{aligned} \quad (6.21)$$

Коэффициент $K_{\gamma j}$ зависит от закона распределения ресурса детали и определяется по принятой величине коэффициента вариации ресурса и величине регламентированной вероятности ($\gamma_i = P_j$) работы без замены. Коэффициент вариации определяется на основании ресурсных испытаний деталей или принимается ориентировочно по табл. 6.2, 6.3.

Величина регламентированной вероятности безотказной работы деталей определяется с помощью структурных схем надежности узлов, принцип построения которых аналогичен принципу создания структурной схемы машины. Структурные схемы надежности узлов существенно зависят от их конструктивного решения и взаимного расположения деталей в них.

Ресурсные показатели комплектующих должны соответствовать показателям надежности проектируемого узла.

Результаты расчетов показателей надежности деталей машины (оборудования) являются исходными данными для определения номенклатуры и количества запасных частей в групповых и индивидуальных комплектах запасных частей — ЗИПах.

6.3. ПРИМЕР РАСЧЕТА ПОКАЗАТЕЛЕЙ (НОРМ) НАДЕЖНОСТИ

Проектируемое оборудование: транспортер сортировочный автоматизированный с гравитационными сбрасывателями.

6.3.1. СТАДИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗАДАНИЯ

Определение показателей надежности при разработке технического задания на проектирование транспортера выполняется с целью обеспечения технических требований по уровню надежности.

Транспортер — изделие ремонтируемое, эксплуатируется до предельного состояния в циклическом регулярном режиме.

Основные определяемые показатели надежности: коэффициент готовности (K_r); коэффициент технического использования (K_{ti}); наработка на отказ или среднее время безотказной работы (T); средний (T_{p1k}) и гамма-процентный (T_{py1k}) ресурс до первого капитального ремонта; удельные суммарные трудозатраты на техническое обслуживание (τ_{TO}) и текущий ремонт (τ_{TP}).

Для расчета показателей надежности принимаем:

- срок службы до списания — $T_{cl} = 8$ лет;
- сменность работы — 2;
- количество капитальных ремонтов — 1;
- срок службы до капремонта — $T_k = 4$ года;
- число межремонтных циклов $K = 2$;
- коэффициент сокращения межремонтных циклов $C = 1$.

Средний ресурс транспортера (в моточасах) до первого капитального ремонта подсчитывается по выражению (6.1), т. е.

$$T_{\text{p1K}} = \frac{T_{\text{сп}} \cdot 8760 \cdot K_{\text{иг}} \cdot K_{\text{ид}} \cdot K_c}{\sum_1^K C^{K-1}},$$

где $K_{\text{иг}}$, $K_{\text{ид}}$, K_c — средние коэффициенты использования транспортера соответственно в течение года, суток, смены.

В соответствии с формулами (6.3) и (6.4) — $K_{\text{иг}} = 255/365 = 0,7$; $K_{\text{ид}} = 16/24 = 0,67$. По аналогии с другими транспортерами K_c принимаем равным 0,85.

$$T_{\text{p1K}} = \frac{8 \cdot 8760 \cdot 0,7 \cdot 0,85 \cdot 0,67}{1+1} = 14\,000 \text{ моточасов.}$$

Величина гамма-процентного ресурса оборудования до первого капитального ремонта определяется по выражению

$$T_{\text{p}\gamma\text{1K}} = \frac{T_{\text{p1K}}}{K_\gamma},$$

где K_γ — соотношение между средним и гамма-процентным ресурсом.

Принимаем величину $\gamma \geq 80\%$. Для дальнейшего расчета необходимо иметь шифр изделия по факторам, определяющим параметры распределения величины ресурса. По табл. 6.2 принимаем шифр: 1222, а по табл. 6.3 находим коэффициент вариации ресурса $v = 0,55$ при распределении Вейбулла. Соотношение среднего и гамма-процентного ресурсов при $\gamma = P_M(T_{\text{p}\gamma\text{1K}}) = 0,8$ равно двум ($K_\gamma = 2,0$). Тогда имеем

$$T_{\text{p}\gamma\text{1K}} = \frac{14\,000}{2} = 7000 \text{ моточасов.}$$

Транспортер может быть представлен как машина, состоящая из семи узлов или агрегатов, представленных в табл. 6.4.

После анализа конструктивных особенностей транспортера задаем удельную величину затрат времени на разборку-сборку каждого узла или агрегатов относительного суммарного времени, которое необходимо для демонтажа и монтажа всего транспортера в целом и принято за единицу.

Затраты времени на разборку-сборку узлов (агрегатов)

№ п/п	Наименование узла (агрегата)	Время, затрачиваемое на разборку-сборку узлов транспортера, в относительных единицах
1	Электрооборудование	0,85
2	Устройство управления сбрасывателями	0,5
3	Ударные механизмы	0,5
4	Цепь	0,4
5	Траверсы	0,4
6	Станция приводная	0,2
7	Станция натяжная	0,05

ницу ($t_p = 1$). В табл. 6.4 указаны затраты времени на капитальный ремонт составляющих транспортер узлов в относительных единицах. По данным табл. 6.4 составляем структурную схему надежности транспортера, исходя из того, что замена электрооборудования сама по себе составляет самостоятельную ситуацию капитального ремонта, а остальные ситуации капитального ремонта должны

соответствовать времени ремонта не менее $t_p \geq 1$ (рис. 6.2).

В соответствии со структурной схемой общую вероятность отработки транспортером назначенного ему гамма-процентного ресурса можно записать в следующем виде:

$$\cdot P_M(T_{p_1 K}) = P_1 [1 - (1 - P_2)(1 - P_3)(1 - P_7)] \times \\ \times [1 - (1 - P_4)(1 - P_5)(1 - P_6)] \geq 0,8.$$

Средний ресурс до капитального ремонта i -го узла транспортера в единицах собственной наработки T_{pi} определяется из выражения

$$T'_{pi} = T_{pi} \cdot K_i \text{ моточасов},$$

где T_{pi} — наработка узла до замены в единицах наработки транспортера, K_i — коэффициент использования i -го узла в рабочих и вспомогательных операциях транспортера.

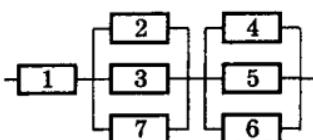


Рис. 6.2
Структурная схема
надежности
транспортера

Значения коэффициентов использования узлов

№ п/п	Наименование узлов, агрегатов	Значение коэффициентов использования		
		По времени (K_B)	По нагрузке (K_H)	Общий (K_i)
1	Электрооборудование	1	1	1
2	Устройство управления сбрасывателями	1	1	1
3	Ударные механизмы	0,1	0,5	0,05
4	Цепь	1	1	1
5	Траверсы	1	0,2	0,2
6	Станция приводная	1	1	1
7	Станция натяжная	1	1	1

Значение коэффициента K_i , определяется по выражению

$$K_i = K_B \cdot K_H,$$

где K_B и K_H — коэффициенты использования i -го узла соответственно по времени и нагрузке.

Значения коэффициентов сведены в табл. 6.5.

Гамма-процентный ресурс i -го узла в единицах наработки транспортера должен быть равен гамма-процентному ресурсу транспортера, т. е.

$$T_{pyi} = T_{pyIK} = 7000 \text{ моточасов.}$$

Гамма-процентный ресурс i -го узла в единицах собственной наработки определяется по выражению

$$T''_{pyi} = T_{pyi} \cdot K_i.$$

Пользуясь рекомендациями табл. 6.2 и 6.3, определяем шифр узлов и параметры распределения величин ресурсов этих узлов, а также величину K_{yi} , т. е. соотношение между средним и гамма-процентным ресурсом i -го узла.

Следующим шагом находим значения вероятностей выполнения узлами своих гамма-процентных ресурсов ($P_i = \gamma_i$).

Общая вероятность выполнения транспортером назначенного ему ресурса, исходя из его структурной схемы, будет следующая:

$$P_M(T_{p,1K}) = P_1[1 - (1 - P_2)(1 - P_3)(1 - P_7)] \times \\ \times [1 - (1 - P_4)(1 - P_5)(1 - P_6)] = 0,8[1 - (1 - 0,8)^3] \times \\ \times [1 - (1 - 0,8)^3] = 0,8 \cdot 0,992 \cdot 0,992 = 0,79 \approx 0,8.$$

Итоговые расчеты показателей надежности узлов транспортера представлены в табл. 6.6.

Комплексные показатели проектируемого транспортера назначаются по аналогу и равны:

- удельные суммарные трудозатраты на текущий ремонт:

$$\tau_{tp} = 0,04 \frac{\text{чел. - час}}{\text{моточасов}};$$

Таблица 6.6

Итоговые расчеты показателей надежности узлов

T_{pi}	K_i	T_{pi}	Шифр	Закон распределения	v_i	$T_{p,ti}$	$T_{p,ti}$	K_{ti}	P_i
<i>1. Электрооборудование</i>									
28 000	1	28 000	—	Э	1,0	7000	7000	4,0	0,8
<i>2. Устройство управления сбрасывателем</i>									
28000	1	28 000	—	Э	1,0	7000	7000	4,0	0,8
<i>3. Ударные механизмы</i>									
14 000	0,05	700	2212	В	0,55	7000	350	2,0	0,8
<i>4. Цепь</i>									
14 000	1	14 000	1222	В	0,55	7000	7000	2,0	0,8
<i>5. Траверсы</i>									
14 000	0,2	2800	1222	В	0,55	7000	1400	2,0	0,8
<i>6. Станция приводная</i>									
14 000	1	14 000	1222	В	0,55	7000	7000	2,0	0,8
<i>7. Станция натяжная</i>									
14 000	1	14 000	1222	В	0,55	7000	7000	2,0	0,8

- удельные суммарные трудозатраты на техническое обслуживание:

$$\tau_{\text{то}} = 0,19 \frac{\text{чел. - час}}{\text{моточасов}};$$

- коэффициент готовности:

$$K_r = \frac{1}{1 + t_{\text{tp}}} = \frac{1}{1 + 0,04} = 0,96;$$

- коэффициент технического использования:

$$K_{\text{ти}} = \frac{1}{1 + t_{\text{tp}} + t_{\text{то}}} = \frac{1}{1 + 0,04 + 0,2} = 0,81.$$

6.3.2. СТАДИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО ПРОЕКТА

Определение показателей надежности на стадии технического проекта является продолжением расчета, проведенного на стадии технического задания. Рассмотрим его на примере нескольких узлов, в частности узла, имеющего «Ударные механизмы», состоящего из четырех элементов, приведенных в табл. 6.7.

Таблица 6.7

Коэффициенты использования и затраты времени на замену деталей, составляющих ударные механизмы

№ п/п	Наименование деталей узла	Относительное время замены, t_{pj}	Коэффициент использования в рабочем цикле узла, K_j
1	Корпус	1,0	1
2	Кронштейн опоры	0,8	1
3	Труба с рычагами	0,6	1
4	Электромагнит	0,1	1

Основные условия выполнения машиной и узлами своих ресурсов (в зависимости от выполнения деталями собственных ресурсов) можно записать в виде:

$$T_{p1K} = T_{pi} \cdot n = \frac{T'_{pi}}{K_i} \cdot n = \frac{T'_{pj} \cdot n'}{K_i \cdot K_j} \cdot n;$$

$$T_{p\gamma 1K} = T_{p\gamma i} = \frac{T'_{p\gamma i}}{K_i} = \frac{T_{p\gamma j}}{K_i} = \frac{T'_{p\gamma j}}{K_i \cdot K_j},$$

где n — кратность среднего ресурса узла среднему ресурсу всего изделия; n' — кратность среднего ресурса детали среднему ресурсу узла в единицах его собственной наработки.

Так как $T'_{pi} = K_i \cdot T_{pi}$, то для данного узла (табл. 6.6) имеем $T'_{pi} = 700$ моточасов. Тогда $T'_{pj} = K_j \cdot T_{pj} = 1 \cdot 700 = 700$ моточасов. Из условия 2 вытекает, что $T_{pyj} = T'_{pyj} = 350$ моточасов, т. е. гамма-процентные ресурсы всех деталей в единицах наработки узла должны быть обязательно равными гамма-процентному ресурсу узла в единицах его собственной наработки.

Так как в данном узле все детали имеют коэффициент загрузки $K_j = 1$; то $T'_{pyj} = T_{pyj} \cdot K_j = 350$ моточасов.

Определив по табл. 6.2 и 6.3 шифры деталей, входящих в данный узел, и параметры распределения ресурсов, находим их значения из выражения

$$K_{\gamma j} = \frac{T_{pj}}{T'_{pj}} = \frac{T'_{pj}}{T_{pyj}}.$$

Затем находим величины их собственных вероятностей P_j или гамм (γ_j). Ввиду того, что электромагнит имеет экспоненциальный закон распределения ресурса с $\psi = 0,8 \dots 1,0$ и при полученном значении у него $K_{\gamma j} = 2,0$ есть $P_j = 0,6$ (что недопустимо мало), то необходимо ввести в состав индивидуального ЗИПа еще один электромагнит, то есть производим холодное резервирование этой детали. В этом случае вероятность выполнения этой деталью своего гамма-процентного ресурса будет подсчитана как общая вероятность резервированного блока, состоящего из двух параллельных элементов, т. е.

$$P_j = 1 - (1 - P)^2 = 1 - (1 - 0,6)^2 = 0,84.$$

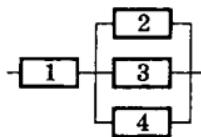
По полученному значению $P_j = 0,84$ уточняем величину $K_{\gamma j}$ этого блока. Находим, что $K_{\gamma j} = 6,0$.

Отсюда средний ресурс детали будет

$$T_{pj} = K_{\gamma j} \cdot T'_{pj} = 6 \times 350 = 2100 \text{ моточасов.}$$

В соответствии с данными относительного времени замены каждой детали составляем структурную схему

данного узла, а по полученным значениям P_j получаем окончательное его P_i :



$$P_i = P_1[1 - (1 - P_2)(1 - P_3)(1 - P_4)] = \\ = 0,81[1 - (1 - 0,83)(1 - 0,83)(1 - 0,84)] = \\ = 0,81 \cdot 0,996 = 0,806.$$

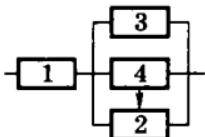
В табл. 6.8 представлены данные для определения требований к показателям долговечности траверсы.

Таблица 6.8

Исходные данные для расчета вероятности гамма-процентного ресурса траверсы

№ п/п	Наименование деталей узла	Относительное время замены, t_{pj}	Коэффициент использования в рабочем цикле узла, K_j
1	Корпус	1,0	1
2	Палец	0,2	1
3	Седло	0,6	1
4	Заплечка	0,4	1

Расчет вероятности ресурсных показателей деталей этого узла проводится аналогично расчету, проведенному для элементов ударных механизмов. По имеющимся данным, представленным в табл. 6.8, составляем структурную схему узла и получаем окончательное значение общей вероятности выполнения данным узлом своего гамма-процентного ресурса:



$$P_i = P_1[1 - (1 - P_3)(1 - P_4)] = \\ = 0,81[1 - (1 - 0,89)(1 - 0,89)] = 0,8.$$

Рассмотрим расчет вероятности наработки до предельного состояния более сложным узлом — станцией приводной с исходными данными, представленными в табл. 6.9.

Последовательность расчета аналогична предыдущим. Все детали узла, за исключением подшипника, удовлетворяют необходимым требованиям. Подшипник имеет коэффициент вариации ресурсов $v_j = 0,7$, что при значении $K_{yj} = 2,0$ определяет недопустимо малую величину $P_j = 0,73$. Поэтому вводим один подшипник в состав ин-

Исходные данные для ремонта показателей надежности
станции приводной

№ п/п	Наименование деталей узла	Относительное время замены, t_{pj}	Коэффициент использования в рабочем цикле узла, K_j
1	Рама	1,0	1
2	Туер	0,8	1
3	Подшипник	0,6	1
4	Сальник	0,2	1
5	Электродвигатель	0,3	1
6	Редуктор	0,4	1
7	Полумуфта 1	0,1	1
8	Полумуфта 2	0,1	1
9	Звездочка	0,1	1

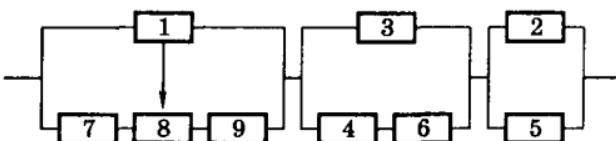
дивидуального ЗИПа и считаем вероятность резервированного блока (P_j) как

$$P_j = 1 - (1 - P)^2 = 1 - (1 - 0,73)^2 = 0,93.$$

По полученному значению $P_j = 0,93$ уточняем величину $K_{\gamma j}$ этого резервированного блока: $K_{\gamma j} = 6,0$. Отсюда средний ресурс детали (с резервом) будет равен 42 тыс. моточасов.

В соответствии с данными относительного времени замены деталей составляем структурную схему данного узла и получаем окончательное значение его P_i :

$$\begin{aligned} P_i &= P_1 [1 - (1 - P_3)(1 - P_4)] \cdot [1 - (1 - P_3)(1 - P_6)] \times \\ &\times [1 - (1 - P_2)(1 - P_5)] = 0,81[1 - (1 - 0,93)(1 - 0,97)] \times \\ &\times [1 - (1 - 0,93)(1 - 0,89)] \cdot [1 - (1 - 0,89)(1 - 0,89)] = \\ &= 0,81 \cdot 0,998 \cdot 0,993 \cdot 0,99 = 0,80 \end{aligned}$$



В заключение проведем аналогичный расчет по станции натяжной согласно данным табл. 6.10.

Данные для расчета по станции натяжной

№ п/п	Наименование деталей узла	Относительное время замены, t_{pj}	Коэффициент использования в рабочем цикле узла, K_j
1	Рама	1,0	1
2	Туер	0,8	1
3	Подшипник	0,6	1
4	Сальник	0,4	1

Расчет деталей данного узла целиком совпадает с расчетом аналогичных деталей предыдущего. Таким образом, остается построить структурную схему этого узла и получить окончательное значение P_i .

$$\begin{aligned}
 P_i &= P_1[1 - (1 - P_2)(1 - P_3)] \times \\
 &\quad \times [1 - (1 - P_2)(1 - P_4)] = \\
 &= 0,81[1 - (1 - 0,89)(1 - 0,93)] \times \\
 &\quad \times [1 - (1 - 0,89)(1 - 0,89)] = \\
 &= 0,81 \cdot 0,9923 \cdot 0,988 = 0,8
 \end{aligned}$$

Итоговые расчеты показателей надежности деталей транспортера сведены в табл. 6.11.

Итоговые расчеты показателей

№ п/п	Наименование узла и его деталей	T_{pi}	T_{pj}	K_j	T_{pj}	$\frac{T_{pj}}{T_{pi}} =$
1	2	3	4	5	6	7
1.0	Электрооборудование	28 000	28 000	1	28 000	7000
2.0	Устройство управления сбрасывателями	28 000	28 000	1	28 000	7000
3.0	Ударные механизмы	700	—	—	—	350
3.1	Корпус	700	700	1	700	350
3.2	Кронштейн опоры	700	700	1	700	350
3.3	Труба с рычагами	700	700	1	700	350
3.4	Электромагнит	700	2100	1	2100	350

**6.3.3.
РАСЧЕТ ПОКАЗАТЕЛЕЙ,
ХАРАКТЕРИЗУЮЩИХ ТЕХНИЧЕСКОЕ
ОБСЛУЖИВАНИЕ ТРАНСПОРТЕРА**

На основании данных, полученных на двух стадиях проектирования, назначаем виды технического обслуживания, их периодичность и продолжительность.

Техническое обслуживание транспортера представляет собой комплекс мероприятий, направленных на предупреждение аварийного износа деталей, сопряжений узлов путем своевременного проведения смазочных, регулировочных и крепежных работ.

Все данные по назначаемой системе технического обслуживания и ремонта сведены в табл. 6.12. При соблюдении данной системы технического обслуживания и ремонта транспортер будет иметь следующие комплексные показатели надежности (K_g , $K_{ти}$ — коэффициенты соответственно технической готовности и технического использования):

$$K_g = \frac{14000}{14000 + 560} = 0,96;$$

$$K_{ти} = \frac{14000}{14000 + 560 + 805 + 1056 + 56} = \frac{14000}{16477} = 0,85.$$

Таблица 6.11

надежности деталей транспортера

Шифр детали	Вид распределения	v_j	T_{pyj}	K_j	P_j	Примечание
8	9	10	11	12	13	14
— .	Э	1,0	7000	4,0	0,8	Покупное
—	Э	1,0	7000	4,0	0,8	Покупное
—	—	—	—	—	0,8	—
2222	В	0,57	350	2,0	0,81	—
2212	В	0,5	350	2,0	0,83	—
2212	В	0,5	350	2,0	0,83	—
—	Э	1,0	350	6,0	0,84	Поставляется в ЗИПе

№ п/п	Наименование узла и его деталей	T_{pi}	T_{pj}	K_j	T_{pj}	$T_{pj} =$ $= T_{pj}$
1	2	3	4	5	6	7
4.0	Цепь	14 000	14 000	1	14000	7000
5.0	Траверса	2800	—	—	—	1400
5.1	Корпус	2800	2800	1	2800	1400
5.2	Палец	2800	2800	1	2800	1400
5.3	Седло	2800	2800	1	2800	1400
5.4	Зашелка	2800	2800	1	2800	1400
6.0	Станция приводная	14 000	—	—	—	7000
6.1	Рама	14 000	14 000	1	14 000	7000
6.2	Туер	14 000	14 000	1	14 000	7000
6.3	Подшипник	14 000	42 000	1	42 000	7000
6.4	Сальник	14 000	14 000	1	14 000	7000
6.5	Электродвигатель	14 000	14 000	1	14 000	7000
6.6	Редуктор	14 000	14 000	1	14 000	7000
6.7	Полумуфта 1	14 000	14 000	1	14 000	7000
6.8	Полумуфта 2	14 000	14 000	1	14 000	7000
6.9	Звездочка	14 000	14 000	1	14 000	7000
7.0	Станция натяжная	14 000	—	—	—	7000
7.1	Рама	14 000	14 000	—	14 000	7000
7.2	Туер	14 000	14 000	—	14 000	7000
7.3	Подшипник	14 000	14 000	1	14 000	7000
7.4	Сальник	14 000	14 000	1	14 000	7000

	Шифр детали	Вид распределения	v_j	T_{pj}	K_{pj}	P_j	Примечание
	8	9	10	11	12	13	14
	1222	B	0,55	7000	2,0	0,8	Покупная
	—	—	—	—	—	0,8	—
	1222	B	0,57	1400	2,0	0,81	—
	1212	B	0,45	1400	2,0	0,87	—
	2112	B	0,4	1400	2,0	0,89	—
	2112	B	0,4	1400	2,0	0,89	—
	—	—	—	—	—	0,8	—
	2222	B	0,57	7000	2,0	0,81	—
	2112	B	0,4	7000	2,0	0,89	—
	—	B	0,7	7000	6,0	0,93	Поставляет- ся в ЗИПе
	1121	H	0,25	7000	2,0	0,97	Покупной
	1221	B	0,4	7000	2,0	0,89	Покупной
	1221	B	0,4	7000	2,0	0,89	Покупной
	2112	B	0,4	7000	2,0	0,89	—
	2112	B	0,4	7000	2,0	0,89	—
	1212	B	0,45	7000	2,0	0,87	—
	—	—	—	—	—	0,8	—
	2222	B	0,57	7000	2,0	0,81	—
	2112	B	0,4	7000	2,0	0,89	—
	—	B	0,7	7000	2,0	0,93	Поставляет- ся в ЗИПе
	1121	H	0,25	7000	2,0	0,89	Покупной

Данные по системе технического обслуживания и ремонта

Вид технического воздействия*	Периодичность (в единицах наработки машины)	Количество видов в межремонтном цикле	Средняя продолжительность выполнения в ч	
			Время проведения одного вида	Суммарное время
ЕО	Ежесменно	1610	0,5	805
ТО-1	100 моточасов	132	8	1056
TP	По потребности	—	4	560
СО	2 раза в год	7	8	56
КР	14 000 моточасов	1	70	70

* ЕО — ежесменное обслуживание; ТО-1 — техническое обслуживание № 1; СО — сезонное обслуживание; ТР — текущий ремонт; КР — капитальный ремонт.

6.4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ЗАВЕРШЕННЫХ ИСПЫТАНИЙ

6.4.1. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В данной задаче рассматриваются методика и пример расчета показателей долговечности (ресурса) по результатам завершенных наблюдений при большом количестве испытываемых объектов, которое позволяет составить интервальный вариационный ряд опытных данных с частотой — вариант в интервал, достаточной для выдвижения гипотезы об их принадлежности к тому или иному вероятностному закону распределения. Методика также позволяет провести статистическую оценку выдвинутой гипотезы методом моментов, заключающуюся в сохранении основных черт статистического распределения у параметров выравнивающего (сглаживающего) закона — равенства оценок математического ожидания и дисперсии статистического и выравнивающего распределений.

Задача сводится к расчету численных значений характеристик вариационного ряда и проверке правдоподобия

Наработка коробок передач лесных машин (в моточасах)

1900	1851	2426	2348	2398	2198	1789	2298	2054	1200	2580	1867	1546
1932	1415	1799	1884	1866	2432	2293	1688	1934	2354	2390	1817	1298
1803	2848	1144	1804	2355	1041	1299	908	987	2054	1844	2411	2308
630	2435	1599	1753	2210	2178	2437	1769	1567	1378	941	2079	1286

выдвигаемых гипотез о принадлежности опытных данных к рассматриваемым в задаче вероятностным законам.

В качестве характеристики среднего значения вариационного ряда выбрана средняя арифметическая; в качестве меры рассеивания признака приняты среднее линейное отклонение, дисперсия, среднее квадратическое отклонение, коэффициент вариации по среднему квадратическому отклонению.

По результатам расчета получаем следующие показатели долговечности:

- точечные оценки математического ожидания ресурса, среднего квадратического отклонения и коэффициента вариации;
- интервал разброса статистического математического ожидания;
- точечные оценки 80%-ного ресурса.

Исследуя результаты испытаний на долговечность коробки передач (КП) лесных машин, под наблюдение были поставлены 52 КП. Все доведены до предельного состояния, $N = 52$. Значения наработок КП в виде неупорядоченного ряда приведены в табл. 6.13.

6.4.2.

РАСЧЕТ ЧИСЛОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК
ИНТЕРВАЛЬНОГО ВАРИАЦИОННОГО РЯДА

Предварительная обработка опытных данных заключается в построении интервального вариационного ряда. Количество интервалов определяется по формуле

$$Z = 1 + 3,2 \cdot \lg N, \quad (6.22)$$

где Z — количество интервалов вариационного ряда; N — число (объем) наблюдений.

Количество интервалов округляется до ближайшего большего целого.

По формуле (6.22) имеем $Z = 1 + 3,2 \cdot \lg 52 = 6,491$. Принимаем количество интервалов $Z = 7$.

Ширина интервала определяется по формуле

$$R = \frac{L_{\max} - L_{\min}}{Z}, \quad (6.23)$$

где R — ширина интервала; L_{\max} — варианта с максимальным значением; L_{\min} — варианта с минимальным значением.

Ширина интервала округляется до ближайшего большего целого. В соответствии с формулой (6.23) при $L_{\max} = 2848$ моточасов и $L_{\min} = 630$ моточасов имеем

$$R = \frac{2848 - 630}{7} = 316,857.$$

Принимаем ширину интервала $R = 317$. Здесь и далее все величины в моточасах.

Определяется нижняя, верхняя граница и середина первого интервала по формулам

$$L_{1H} = \frac{L_{\max} + L_{\min} - Z \cdot R}{2}; \quad (6.24)$$

$$L_{1B} = L_{1H} + R; \quad (6.25)$$

$$L_1 = L_{1H} + \frac{R}{2}. \quad (6.26)$$

В соответствии с выражениями (6.24)–(6.26) определяем, что

$$L_{1H} = \frac{2848 + 630 - 7 \cdot 317}{2} = 629,5;$$

$$L_{1B} = 629,5 + 317 = 946,5;$$

$$L_1 = 629,5 + \frac{317}{2} = 788.$$

Затем определяются соответствующие величины каждого последующего интервала по формуле

$$L_i = L_1 + (i - 1) \cdot R. \quad (6.27)$$

Характеристики интервального вариационного ряда

L_i	788	1105	1422	1739	2056	2373	2690	Σ
m_i	3	4	7	14	9	13	2	52

В формуле (6.27) и далее i принимает значения от 1 до Z ($i = 1, 2, 3 \dots Z$). По формуле (6.27) рассчитываем верхнюю, нижнюю границы и середину всех интервалов. Значения середины интервалов заносим в первую графу табл. 6.14 промежуточных расчетов характеристик вариационного ряда. Определяем опытные частоты интервалов и заносим их во вторую графу табл. 6.14.

Далее рассчитываются характеристики интервального вариационного ряда и параметры рассеивания признака:

$$L_{\text{ср.Н}} = \frac{1}{Z} \cdot \sum L_i; \quad (6.28)$$

$$L_{\text{ср.В}} = \frac{1}{N} \cdot \sum L_i \cdot m_i, \quad (6.29)$$

где $L_{\text{ср.Н}}$ — невзвешенная средняя арифметическая (точечная оценка математического ожидания невзвешенная); $L_{\text{ср.В}}$ — взвешенная средняя арифметическая (точечная оценка математического ожидания взвешенная); L_i — середина i -го интервала; m_i — опытная частота i -го интервала.

Среднее линейное отклонение невзвешенное ρ_H можно записать как

$$\rho_H = \frac{1}{Z} \cdot \sum |L_i - L_{\text{ср.Н}}|. \quad (6.30)$$

Среднее линейное отклонение взвешенное ρ_B можно записать как

$$\rho_B = \frac{1}{N} \cdot \sum |L_i - L_{\text{ср.Н}}| \cdot m_i. \quad (6.31)$$

Знак модуля разности между серединой интервала L_i и средней арифметической $L_{\text{ср}}$ показывает, что суммирование производится без учета знаков.

Значение точечной оценки дисперсии можно рассчитать двумя способами: по формуле второго центрального смешанного момента, а также через значение средней

арифметической вариационного ряда, определенной по выражениям (6.28) и (6.29).

$$D_H = \frac{1}{Z} \cdot \sum L_i^2 - L_{cp.H}^2;$$

$$D_B = \frac{1}{N} \cdot \sum L_i^2 \cdot m_i - L_{cp.B}^2 \quad (6.32)$$

или

$$D_H = \frac{1}{Z} \cdot \sum (L_i - L_{cp.H})^2;$$

$$D_B = \frac{1}{N} \cdot \sum (L_i - L_{cp.B})^2 \cdot m_i, \quad (6.33)$$

где D_H — точечная оценка дисперсии невзвешенная; D_B — точечная оценка дисперсии взвешенная.

Определяются несмещенные значения оценок дисперсии:

$$D_{H.H} = \frac{Z}{Z-1} \cdot D_H;$$

$$D_{B.H} = \frac{N}{N-1} \cdot D_B. \quad (6.34)$$

Рассчитываются оценки среднего квадратического отклонения и коэффициента вариации по формулам

$$\sigma_{L.H} = \sqrt{D_{H.H}}; \quad \sigma_{L.B} = \sqrt{D_{B.H}}; \quad (6.35)$$

$$V = \frac{\sigma_L}{L_{cp}}, \quad (6.36)$$

где $\sigma_{L.H}$ — точечная оценка среднего квадратического отклонения невзвешенная; $\sigma_{L.B}$ — точечная оценка среднего квадратического отклонения взвешенная; V — оценка коэффициента вариации.

В соответствии с формулами (6.24)–(6.36) получим

$$L_{cp.H} = \frac{12170}{7} = 1739; \quad L_{cp.B} = \frac{95820}{52} = 1843;$$

$$\rho_H = \frac{3804}{7} = 543,4; \quad \rho_B = \frac{21020}{52} = 404,2;$$

$$D_H = \frac{23890000}{7} - 1739^2 = 402000;$$

$$D_{\text{H.H}} = \frac{7 \cdot 402\,000}{6} = 468\,900;$$

$$D_B = \frac{189\,000\,000}{52} - 1843^2 = 238\,500;$$

$$D_{\text{B.H}} = \frac{52 \cdot 238\,500}{51} = 243\,200;$$

$$\sigma_{\text{L.H}} = \sqrt{468\,900} = 684,8; \quad \sigma_{\text{L.B}} = \sqrt{243\,200} = 493,2;$$

$$V_H = \frac{684,8}{1739} = 0,394; \quad V_B = \frac{493,2}{1842} = 0,268.$$

Характеристики исходного статистического распределения с обработкой отдельных вариантов рассчитываются по формулам

$$L_{\text{cp}} = \frac{1}{N} \cdot \sum L_i; \quad (6.37)$$

$$D = \frac{1}{N} \cdot \sum L_i^2 - L_{\text{cp}}^2, \quad (6.38)$$

где L_i — i -вариант в безынтервальном вариационном ряду опытных данных.

В соответствии с формулами (6.37)–(6.38), в которых i принимает значение от 1 до N получим

$$L_{\text{cp}} = \frac{1}{52} \cdot \sum 96\,620 = 1858;$$

$$D = \frac{192\,400\,000 - 3\,453\,000}{52} = 3\,633\,000.$$

6.4.3.

СТАТИСТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ГИПОТЕЗ О ПРИНАДЛЕЖНОСТИ ОПЫТНЫХ НАРАБОТОК К ВЕРОЯТНОСТНЫМ ЗАКОНАМ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ

Статистическая оценка гипотез о принадлежности опытных данных к тому или иному вероятностному закону распределения производится с помощью критерия Пирсона — χ^2 (хи-квадрат). Опытные значения критерия определяется по формуле (3.44).

Опытные значения критерия χ^2_{nab} сравниваются с табличным значением. При $\chi^2_{\text{nab}} \leq \chi^2_{\text{теор}}$, гипотеза о принадлежности опытных данных к рассматриваемому закону не отвергается. Табличные значения критерия $\chi^2_{\text{теор}}$

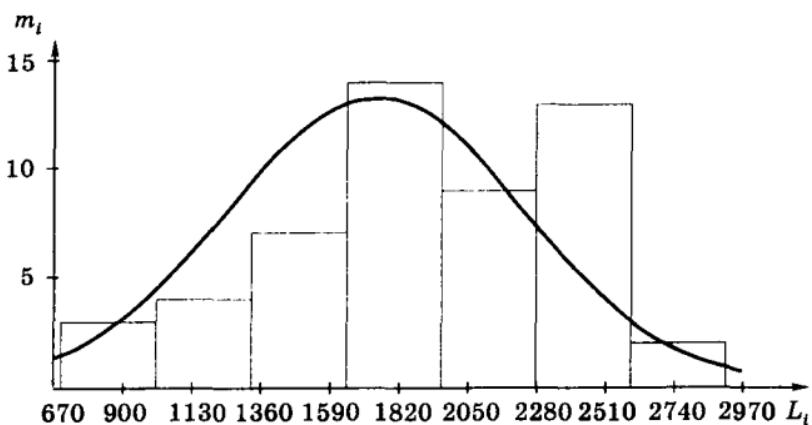


Рис. 6.3

Проверка правдоподобия гипотезы о принадлежности опытных данных к нормальному закону распределения

(правосторонняя критическая область) в зависимости от уровня значимости α и числа степеней свободы приведены в табл. 1 Приложения.

Число степеней свободы k определяется по выражению (3.45).

При проверке правдоподобия гипотезы о принадлежности опытных данных к нормальному распределению (рис. 6.3) теоретическая частота интервала определяется по формуле

$$m'_i = \frac{N \cdot R}{\sigma_{L.B.}} \cdot \phi(t_i), \quad (6.39)$$

где $f(t_i)$ — плотность нормального распределения.

$$\phi(t_i) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{t_i^2}{2}}, \quad (6.40)$$

$$t_i = \frac{L_i - L_{cp.B.}}{\sigma_{L.B.}}. \quad (6.41)$$

Значения плотности нормального распределения приведены в табл. 2 Приложения.

При принятии гипотезы о принадлежности опытных данных к какому-либо вероятностному закону распределения рассчитывается оценка теоретического математического ожидания с использованием теоретических частот соответствующего распределения.

$$L_T = \frac{1}{N_T} \sum L_i \cdot m'_i, \quad (6.42)$$

где L_T — оценка теоретического математического ожидания; N_T — сумма теоретических частот интервалов, $N_T = \sum m'_i$.

Промежуточные расчетные данные, необходимые для определения по формуле (3.44) опытного значения критерия χ^2 при проверке гипотезы о принадлежности наработок КП к нормальному распределению, приведены в табл. 6.15.

По формуле (6.41) рассчитываем значения аргумента t_i , плотности нормального распределения и заносим их в графу 3 табл. 6.15.

По табл. 2 Приложения выбираем значение плотности распределения и заносим в графу 4.

Определяем по формуле (6.42) оценку теоретического математического ожидания наработки КП при нормальном распределении. Согласно табл. 6.15 $\sum m'_i = 50,671$ и $\sum L_i \cdot m'_i = 92,620$. Тогда

$$L_T = \frac{92,600}{50,671} = 1828 \text{ моточасов.}$$

По формуле (6.39) рассчитываем теоретические частоты интервалов (графа 5 таблицы) и определяем слагаемые

Таблица 6.15

Расчет опытного значения критерия χ^2 при нормальном распределении

L_i	m_i	$ t_i $	$f(t_i)$	$m'_i = \frac{N \cdot R}{\sigma_{LB}} \cdot f(t_i)$	$\frac{(m_i - m'_i)^2}{m'_i}$	$L_i \cdot m'_i$
1	2	3	4	5	6	7
788	3	2,14	0,040	1,34	2,069	1054
1105	4	1,50	0,130	4,35	0,027	4801
1422	7	0,85	0,278	9,29	0,565	13 210
1739	14	0,21	0,390	13,04	0,071	22 670
2056	9	0,43	0,364	12,17	0,824	25 010
2373	13	1,08	0,223	7,45	4,127	17 690
2690	2	1,72	0,091	3,04	0,357	8182

критерия χ^2 (графа 6 таблицы). Суммируя значения графы 6, получаем $\chi^2 = 8,041$.

Для выбора табличного значения критерия $\chi^2_{\text{теор}}$ назначаем уровень значимости $\alpha = 0,1$ и определяем число степеней свободы по формуле (3.45). Количество наложенных связей $S = 3$. Тогда имеем

$$k = 7 - 3 = 4.$$

По табл. 1 Приложения, при уровне значимости $\alpha = 0,1$ и числе степеней свободы $K = 4$, выбираем $\chi^2_{\text{теор}} = 7,7$. Имея $\chi^2_{\text{теор}} < \chi^2_{\text{набл}}$, делаем заключение, что гипотеза о принадлежности наработок КП к нормальному закону в рассматриваемом примере не правдоподобна.

При проверке правдоподобия гипотезы о принадлежности опытных данных к распределению Вейбулла (рис. 6.4) теоретическая частота интервала определяется по формуле

$$m'_i = \frac{N \cdot R}{a} \cdot a \cdot f(L_i), \quad (6.43)$$

где a — параметр масштаба; $f(L_i)$ — плотность распределения Вейбулла, соответствующая наработке L_i .

Оценка параметра масштаба a определяется по выражению

$$a = \frac{L_{\text{ср.В}}}{K_V}, \quad (6.44)$$

где K_V — коэффициент распределения Вейбулла.

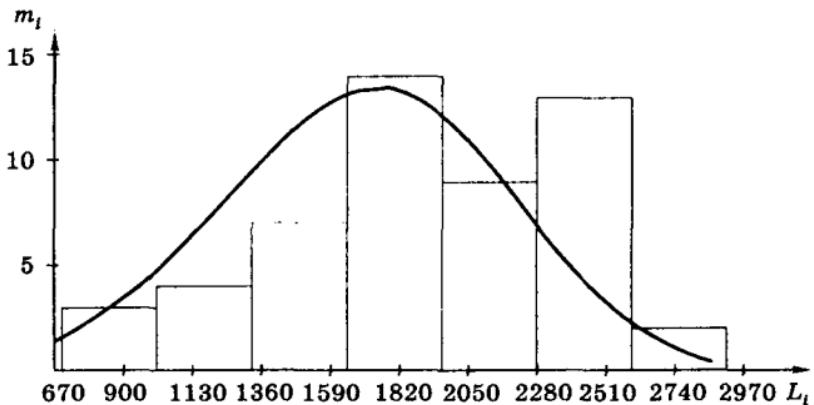


Рис. 6.4

Проверка правдоподобия гипотезы о принадлежности опытных данных к распределению Вейбулла

Плотность распределения Вейбулла рассчитывается по формуле

$$f(L_i) = \frac{b}{a} \cdot \left(\frac{L_i}{a} \right)^{b-1} \cdot e^{-\left(\frac{L_i}{a} \right)^b}, \quad (6.45)$$

где b — параметр формы распределения Вейбулла.

Коэффициент распределения K_V и параметр формы b выбираются по табл. 3 Приложения в зависимости от значения оценки коэффициента вариации. Значения выражения $a \cdot f(L)$ табулированы и даны в табл. 4 Приложения.

По формуле (6.44) определяем оценку параметра масштаба. Для этого по табл. 3 Приложения в зависимости от коэффициента вариации выбираем значение K_V и b : при $V_B = 0,193$, $K_V = 0,906$. Получаем

$$a = \frac{1842}{0,906} = 2033.$$

Промежуточные расчетные данные, необходимые для определения опытного значения критерия χ^2 при распределении Вейбулла, сведены в табл. 6.16. Параметр формы $b = 4$.

Плотность распределения Вейбулла рассчитывалась по формуле (6.45). Промежуточные расчетные величины

Таблица 6.16

**Расчет опытного значения критерия χ^2
при распределении Вейбулла**

L_i	m_i	$\frac{L_i}{a}$	$\left(\frac{L_i}{a} \right)^{b-1}$	$e^{-\left(\frac{L_i}{a} \right)^b}$	$a \cdot f(L_i)$	m'_i	$\frac{(m_i - m'_i)^2}{m'_i}$	$L_i \cdot m'_i$
1	2	3	4	5	6	7	8	9
788	3	0,388	0,058	0,978	0,228	1,846	0,721	1455
1105	4	0,544	0,161	0,916	0,589	4,773	0,125	5274
1422	7	0,699	0,342	0,787	1,077	8,736	0,345	12 420
1739	14	0,855	0,626	0,585	1,466	11,884	0,377	20 670
2056	9	1,011	1,034	0,351	1,454	11,786	0,658	24 230
2373	13	1,167	1,59	0,156	0,994	8,059	3,029	19 120
2690	2	1,323	2,317	0,047	0,432	3,505	0,646	9427

внесены в графы 3, 4 и 5. Значение выражения $a \cdot f(L_i)$ — графа 6 таблицы. Суммируя значения графы 8, получаем $\chi^2_{\text{набл}} = 5,9$. Имея $\chi^2_{\text{теор}} < \chi^2_{\text{набл}}$, делаем заключение, что гипотеза о принадлежности наработок КП к распределению Вейбулла не отвергается.

По формуле (6.42) определяем оценку теоретического математического ожидания ресурса КП при распределении Вейбулла.

Имея из таблицы 6.15 $\Sigma m'_i = 50,589$ и $\Sigma L_i \cdot m'_i = 92\,600$. Тогда

$$L_T = \frac{92\,600}{50,589} = 1830 \text{ моточасов.}$$

При проверке справедливости гипотезы о принадлежности опытных данных к экспоненциальному распределению (рис. 6.5) теоретическая частота интервала определяется по формуле

$$m'_i = \frac{N \cdot R}{L_{\text{ср.В}}} \cdot e^{-\frac{L_i}{L_{\text{ср.В}}}}. \quad (6.46)$$

При принятии гипотезы о принадлежности опытных данных к какому-либо вероятностному закону распределения рассчитывается оценка теоретического математического ожидания с использованием теоретических частот соответствующего распределения.

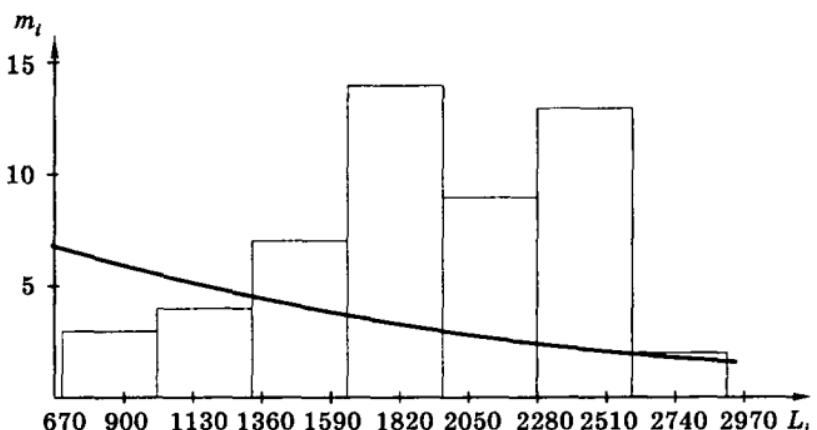


Рис. 6.5

Проверка правдоподобия гипотезы о принадлежности опытных данных к экспоненциальному закону распределения

**Расчет опытного значения критерия χ^2
при экспоненциальном распределении**

L_i	m_i	$\frac{L_i}{L_{\text{ср.в}}}$	$e^{-\frac{L_i}{L_{\text{ср.в}}}}$	m'_i	$\frac{(m_i - m'_i)^2}{m'_i}$	$L_i \cdot m'_i$
1	2	3	4	5	6	7
788	3	0,428	0,652	5,833	1,376	4596
1105	4	0,6	0,549	4,911	0,169	5427
1422	7	0,772	0,462	4,135	1,985	5880
1739	14	0,944	0,389	3,481	31,78	6054
2056	9	1,116	0,328	2,931	12,565	6026
2373	13	1,288	0,276	2,468	44,947	5856
2690	2	1,46	0,232	2,078	0,003	5589

По формуле (6.46) ведем расчет теоретических частот интервалов. Промежуточные расчетные данные, необходимые для определения опытного значения критерия χ^2 при экспоненциальном распределении, даны в табл. 6.17.

Определим оценку теоретического математического ожидания наработки КП при экспоненциальном распределении. Имея из табл. 6.17 $\sum m'_i = 25,837$ и $\sum L_i \cdot m'_i = 39430$. Тогда

$$L_T = \frac{39430}{25,837} = 1526 \text{ моточасов.}$$

Суммируя значения графы 6 табл. 6.17, получаем $\chi^2_{\text{набл}} = 92,826$. Имея $\chi^2_{\text{теор}} < \chi^2_{\text{набл}}$, делаем заключение, что гипотеза о принадлежности опытных наработок КП к экспоненциальному распределению в рассматриваемом примере не правдоподобна.

6.4.4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГРАНИЦ ИНТЕРВАЛЬНОГО РАЗБРОСА СРЕДНЕЙ НАРАБОТКИ

При принятии гипотезы о принадлежности опытных данных к нормальному распределению границы доверительного интервала разброса средней наработки определим их по формулам:

$$L_B = L_{\text{ср.В}} + \frac{\sigma_{L,B}}{\sqrt{N}} \cdot t_S; \quad (6.47)$$

$$L_H = L_{\text{ср.В}} - \frac{\sigma_{L,B}}{\sqrt{N}} \cdot t_S, \quad (6.48)$$

где L_B — верхняя граница интервала разброса; L_H — нижняя граница интервала разброса; t_S — квантиль функции Стьюдента.

Значение квантиля функции Стьюдента выбирается по табл. 5 Приложения.

Границы интервала разброса математического ожидания определяем по формулам (6.47) и (6.48). Для выбора квантиля функции Стьюдента назначаем доверительную вероятность $P_d = 0,9$. При $P_d = 0,9$ и числе наблюдений $N = 52$ квантиль функции Стьюдента $t_S = 1,676$. Тогда запишем

$$L_B = 1843 + \frac{493,181}{\sqrt{52}} \cdot 1,676 = 1957;$$

$$L_H = 1843 - \frac{493,181}{\sqrt{52}} \cdot 1,676 = 1728.$$

Доверительный полуинтервал равен 114,5.

При принятии гипотезы о принадлежности опытных данных к распределению Вейбулла L_B и L_H рассчитываются по формулам

$$L_B = L_{\text{ср.В}} \cdot r_1^{\frac{1}{b}}; \quad (6.49)$$

$$L_H = L_{\text{ср.В}} \cdot r_2^{\frac{1}{b}}. \quad (6.50)$$

Значения коэффициентов r_1 и r_2 приведены в табл. 6 Приложения.

Рассчитываем границы интервала разброса статистического математического ожидания наработки КП по формулам (6.49) и (6.50). По табл. 6 Приложения при $N = 52$ выбираем $r_1 = 1,21$, $r_2 = 0,84$. Тогда при $b = 4$ запишем

$$L_B = 1843 \cdot 1,21^{\frac{1}{4}} = 1933;$$

$$L_H = 1843 \cdot 0,84^{\frac{1}{4}} = 1764.$$

При экспоненциальном распределении

$$L_B = L_{\text{ср.}B} \cdot r_1 \quad (6.51)$$

$$L_H = L_{\text{ср.}B} \cdot r_2 \quad (6.52)$$

Значения коэффициентов r_1 и r_2 выбираются так же, как при распределении Вейбулла.

$$L_B = 1843 \cdot 1,21 = 2230;$$

$$L_H = 1843 \cdot 0,84 = 1548.$$

6.4.5.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТОЧЕЧНЫХ ОЦЕНОК ГАММА-ПРОЦЕНТНОГО РЕСУРСА КОРОБКИ ПЕРЕДАЧ

Определим точечные оценки 80 и 90% -ного ресурса КП по всем рассматриваемым распределениям.

При нормальном распределении точечные оценки гамма-процентного ресурса определяются по формуле

$$T_{P\gamma} = L_{\text{ср.}B} + u_\gamma \sigma_{LB}, \quad (6.53)$$

где $T_{P\gamma}$ — оценка гамма-процентного ресурса, u_γ — квантиль функции нормального распределения.

Значения u_γ соответственно составляют $u_{80\%} = -0,842$, $u_{90\%} = -1,282$. Приняв это, можно записать

$$T_{P80\%} = 1843 - 0,842 \cdot 493,181 = 1427;$$

$$T_{P90\%} = 1843 - 1,282 \cdot 493,181 = 1210.$$

При распределении Вейбулла значения $T_{P\gamma}$ рассчитываются по формуле

$$T_{P\gamma} = C_\gamma \frac{L_{\text{ср.}B}}{K_V} = C_\gamma \cdot a, \quad (6.54)$$

где C_γ — квантиль функции распределения Вейбулла.

По формуле (6.54) определяем точечные оценки 80 и 90% -ного ресурса. В соответствии с табл. 8 Приложения при $b = 4$ $C_{80\%} = 0,687$ и $C_{90\%} = 0,57$. При $a = 2033$ запишем

$$T_{P80\%} = 0,687 \cdot 2033 = 1397;$$

$$T_{P90\%} = 0,57 \cdot 2033 = 1159.$$

При экспоненциальном распределении выражение для расчета оценки гамма-процентного ресурса имеет вид

$$T_{P\gamma} = Z_\gamma \cdot L_{\text{ср.В}}, \quad (6.55)$$

где Z_γ — квантиль функции экспоненциального распределения.

$Z_{80\%} = 0,223; Z_{90\%} = 0,105$, т. е. можно написать

$$\begin{aligned} T_{P80\%} &= 0,223 \cdot 1843 = 410,908; \\ T_{P90\%} &= 0,105 \cdot 1843 = 193,477. \end{aligned}$$

6.4.6.

РЕЗУЛЬТАТЫ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДИКИ ПО РАСЧЕТУ РЕСУРСНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ДЛЯ ИМПОРТНОЙ ТЕХНИКИ

По данной методике были определены показатели долговечности отдельных деталей форвардера John Deere. Результаты оценки среднего ресурса $T_{P\text{ср.}}$, среднего квадратического отклонения ресурса σ_T и оценки коэффициента вариации V сведены в табл. 6.18.

Таблица 6.18

**Оценка ресурса отдельных деталей
форвардера John Deere**

Код детали по каталогу (наименование детали)	Оценка ресурса по зафиксированным отказам по фактическому расходу запчастей			
	Вид закона распределения	$T_{P\text{ср.}}$, моточас	σ_T , моточас	V
F058748 (серьга манипулятора)	нормальный	2164	549	0,254
	логнормальный	2314	1231	0,532
RE518088 (топливный насос высокого давления)	нормальный	2691	794	0,295
	вейбулла	2972	1248	0,420
F064910 (рукав высокого давления на поворот ротора грейфера)	нормальный	496	198	0,398
	нормальный	568	119	0,210
F064910 (рукав высокого давления на телескопическом удлинителе манипулятора)	нормальный	903	233	0,258
	логнормальный	998	117	0,117

6.5.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ НЕЗАВЕРШЕННЫХ ИСПЫТАНИЙ

6.5.1. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Кроме ситуации, которая рассмотрена в предыдущей задаче, при проведении ресурсных испытаний возможны и другие. Одна из них, когда часть объектов, поставленных под наблюдение, доведена до предельного состояния, а другая часть к моменту анализа еще работоспособна или снята с наблюдения до завершения испытаний. Такие объекты названы приостановленными. Наблюдения являются незавершенными. В этом случае нет возможности определить характеристики статистического распределения, так как данные по приостановленным объектам не включаются в результаты наблюдений.

Другая типичная ситуация — испытания завершены, т. е. все объекты, поставленные под наблюдение, доведены до предельного состояния. Можно определить характеристики статистического распределения опытных данных (оценки ресурса). Но количество объектов испытаний мало и не позволяет построить интервальный вариационный ряд с частотой вариант в интервалах, достаточной для выдвижения гипотезы о принадлежности их к какому-либо виду вероятностного закона распределения.

В том и другом случае метод моментов статистической оценки гипотез о принадлежности опытных данных к тому или иному вероятностному закону неприменим. Невыполним первый или второй этап метода.

В таких ситуациях проверка правдоподобия названных гипотез может проводиться графоаналитическим способом. По осям координат таких сеток откладываются наработки отказавших объектов и накопленные частоты отказов. Выбирается закон распределения, на координатной сетке которого полученные точки точнее ложатся на прямую линию. Оценка проводится визуально. Затем определяются оценки ресурса.

В данной задаче применительно к машинному счету для выбора закона распределения опытных данных, по параметрам которого определяются оценки показателей долговечности, используется аналитический метод, заключающийся в том, что по каждому из рассматриваемых законов определяются параметры, имеющие линейную зависимость.

Выводится уравнение однофакторной линейной регрессии данных параметров, через коэффициенты регрессии которого рассчитываются оценки параметров закона распределения опытных данных. Определяется также линейный коэффициент корреляции. Принимается закон распределения, при котором коэффициент корреляции имеет наибольшее значение.

В задаче рассматривается определение оценок показателей долговечности по параметрам нормального и логарифмически нормального закона и распределения Вейбулла. Этот метод можно применять для определения оценок показателей ресурса по данным завершенных и незавершенных наблюдений при любом количестве испытываемых объектов по параметрам перечисленных законов распределения.

Результаты незавершенных наблюдений представляют собой выборку из N объектов, в которой M из них достигли предельного состояния, а остальные $N - M$ приостановлены. Используемый в задаче метод определения оценок параметров долговечности позволяет учесть всю информацию по наработкам отказавших и приостановленных объектов, что увеличивает точность получаемых величин.

Первичный материал наблюдений может быть представлен в виде интегральной функции интенсивности замен или опытной функции распределения. При обработке одних и тех же данных наблюдений с применением функции замен и функции распределения возможны некоторые расхождения численных значений оценок показателей долговечности, объясняющиеся особенностями методов. Если в отдельных случаях они окажутся существенными, то следует пользоваться оценками с меньшими численными

Таблица 6.19

**Общий вариационный ряд наработок тракторов,
поставленных на испытания (в моточасах)**

Порядковый номер трактора, K	Наработка, L	Порядковый номер трактора, K	Наработка, L
1	2010	11*	2301
2*	2031	12	5050
3	3295	13	5172
4	3314	14*	5259
5	3550	15	5314
6	3785	16*	5412
7	4186	17*	5652
8	4390	18*	6060
9	4516	19*	6501
10	4781	20*	7194

* Объекты, достигшие в ходе испытаний предельного состояния.

Таблица 6.20

**Вариационный ряд наработки тракторов,
достигших предельного состояния**

Номер отказа, i	1	2	3	4	5	6	7	8
Порядковый номер трактора, K_i	2	11	14	16	17	18	19	20
Наработка, L_i	2301	5034	5259	5412	5652	6060	6501	7194

значениями. Тогда принятые решения будут предусматривать запас надежности.

Вариационный ряд наработок трелевочных тракторов представлен в табл. 6.19.

Исследуются результаты испытаний на долговечность трелевочных тракторов. Под наблюдение были поставлены 20 машин, $N = 20$. Восемь из них доработали до предельного состояния, $M = 8$. Испытания остальных приостановлены. В табл. 6.20 представлен (для примера) вариационный ряд наработки тракторов, достигших предельного состояния.

6.5.2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ, ИМЕЮЩИХ ЛИНЕЙНУЮ ЗАВИСИМОСТЬ

При нормальном распределении имеется зависимость

$$U = \frac{L - L_{\text{ср}}}{\sigma_L}, \quad (6.56)$$

где U — квантиль функции нормального распределения при соответствующей наработке L ; $L_{\text{ср}}$ — среднее значение исследуемого параметра; σ_L — среднее квадратическое отклонение.

Применительно к результатам незавершенных наблюдений $L_{\text{ср}}$ и σ_L являются средней наработкой и средним квадратическим отклонением наработки объектов до предельного состояния.

Уравнение (6.56) можно записать в следующем виде:

$$U = \frac{1}{\sigma_L} \cdot L - \frac{L_{\text{ср}}}{\sigma_L}. \quad (6.57)$$

Из уравнения (6.57) видно, что при нормальном распределении линейную зависимость имеют наработка машин и квантиля функции нормального распределения, соответствующей данной наработке.

Следовательно, при проверке правдоподобия гипотезы о принадлежности опытных данных к нормальному закону можно вывести уравнение однофакторной линейной регрессии, в котором за факториальный признак можно принять наработку отказавших объектов, за результативный — квантиль соответствующих значений функции нормального распределения, и через полученные коэффициенты регрессии определить оценки параметров распределения. При логнормальном распределении вместо наработки отказавших объектов факториальным признаком в уравнении будет ее логарифм.

При этом задача сводится к определению опытных значений функции распределения $F(L)$ в точках, соответствующих наработке объектов, по которым выбирается квантиль U . Эта задача может быть решена двумя методами. Первый метод — метод Нельсона [21] основан на опреде-

лении опытной функции интенсивности замен $W(L)$ в точках экспериментальных наработок объектов. Для определения опытных значений $W(L)$ наработки всех достигших предельного состояния объектов и приостановленных объектов располагают в порядке возрастания в общий вариационный ряд $L_1, L_2, L_3, \dots, L_N$. Каждый отказавший объект (отказ) имеет в общем ряду наработок порядковый номер K . Опытные значения функции замен $W(L)$ определяются по формуле

$$W(L_i) = \sum_{j=1}^i \frac{1}{N+1-(K_i)_j}, \quad (6.58)$$

где i — номер отказа в вариационном ряду только отказавших объектов.

Интегральная функция интенсивности замен $W(L)$ и функция распределения $F(L)$ имеют зависимость

$$W(L) = -\ln[1 - F(L)]. \quad (6.59)$$

Согласно уравнению (6.59) по известным опытным значениям функции интенсивности замен можно рассчитать экспериментальные значения функции распределения, соответствующие наработкам достигших предельного состояния объектов, и по ним выбрать квантиль U функции нормального распределения. Однако при использовании метода Нельсона значение квантиля U можно выбрать и по рассчитанным опытным значениям функции интенсивности замен. В табл. 7 Приложения даны значения функции интенсивности замен $W(L)$ с интервалом 0,01, соответствующие ей значения функции распределения $F(L)$ и квантиля U функции нормального распределения.

Второй метод — метод Джонсона [14] предусматривает определение опытных значений функции распределения непосредственно по формуле

$$F(L_i) = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^i \frac{N+1-N \cdot F(L_{i-1})}{N+2-(K_i)_j}. \quad (6.60)$$

По рассчитанным значениям функции распределения по табл. 7 Приложения выбираются квантили U для вывода уравнения регрессии при проверке правдоподобия

гипотезы о принадлежности опытных наработок к нормальному или логнормальному закону.

Функция распределения Вейбулла имеет вид

$$F(L) = 1 - \exp\left(-\frac{L}{a}\right)^b. \quad (6.61)$$

Сравнивая выражения (6.59) и (6.61), можно записать

$$W(L) = \left(\frac{L}{a}\right)^b. \quad (6.62)$$

Логарифмируя выражение (6.62), получаем

$$\lg W(L) = b \cdot \ln L - b \cdot \lg a. \quad (6.63)$$

Уравнение (6.63) показывает, что при распределении Вейбулла линейную зависимость имеют логарифмы наработки объектов и логарифмы интегральной функции интенсивности замен.

Записав уравнение (6.61) в следующем виде:

$$1 - F(L) = \exp\left(-\frac{L}{a}\right)^b.$$

и дважды логарифмируя его, получим

$$\lg[-\ln(1 - F(L))] = b \cdot \ln L - b \cdot \lg a. \quad (6.64)$$

Уравнение (6.64) можно получить, подставив согласно зависимости (6.59) значение $W(L)$ в формулу (6.63).

При проверке правдоподобия гипотезы о принадлежности экспериментальных наработок достигших предельного состояния объектов к распределению Вейбулла можно, пользуясь формулой (6.58), рассчитать опытные значения интегральной функции интенсивности замен $W(L)$ или по формуле (6.60) определить опытные значения функции распределения $F(L)$ в точках, соответствующих наработкам достигших предельного состояния объектов, и вывести уравнения однофакторной линейной регрессии вида выражения (6.63) или (6.64), в которых факториальным признаком будет логарифм наработки отказавших объектов, результативным — логарифм $W(L)$ или логарифм выражения $[-\ln(1 - F(L))]$ соответственно. В дальнейшем первый вариант будем называть методом Нельсона, второй — методом Джонсона.

6.5.3. РАСЧЕТ ОПЫТНОЙ ФУНКЦИИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ НАРАБОТКИ

Расчет значений опытной функции распределения наработки тракторов, достигших предельного состояния, выполняем по формуле (6.60).

При этом для удобства вычислений введем промежуточные расчетные величины:

$$H_i = N + 1 - F(L_{i-1}) \cdot N;$$

$$Z_i = N + 2 - K_i;$$

$$D_i = \frac{H_i}{Z_i}.$$

Они являются соответственно числителем, знаменателем и частным их деления в выражении под знаком суммы в формуле (6.60). Производится суммирование слагаемых под знаком суммы с помощью выражения $S_i = S_{i-1} + D_i$ и рассчитывается значение опытной функции распределения по зависимости

$$F(L_i) = \frac{S_i}{N}.$$

Таблица 6.21

Расчет опытной функции распределения наработок тракторов, достигших предельного состояния

Номер отказа, i	1	2	3	4	5	6	7	8
Порядковый номер трактора, K_i	2	11	14	16	17	18	19	20
H_i	21,00	19,95	18,136	15,869	13,224	10,58	7,935	5,29
Z_i	19	10	7	5	4	3	2	1
$D_i = \frac{H_i}{Z_i}$	1,105	1,995	2,591	3,174	3,306	3,527	3,967	5,29
$S_i = S_{i-1} + D_i$	1,105	3,10	5,691	8,865	12,171	15,698	19,665	24,955
$F(L_i)$	0,053	0,143	0,257	0,389	0,521	0,653	0,786	0,918
Квантиль функции нормального распределения, U	-1,665	-1,085	-0,646	-0,287	0,058	0,385	0,800	1,392

Промежуточные расчетные величины и значение опытной функции распределения представлены в виде табл. 6.21.

По рассчитанным значениям опытной функции распределения согласно табл. 7 Приложения выбираем квантиль U функции нормального распределения и заносим в последнюю строку таблицы 6.21.

6.5.4. РАСЧЕТ ОПЫТНОЙ ФУНКЦИИ ИНТЕНСИВНОСТИ ЗАМЕН

Вычисление значений опытной функции интенсивности замен, соответствующей наработкам достигших предельного состояния тракторов, производится по формуле (6.61). Здесь также вводятся промежуточные расчетные величины:

$$Z_i = N + 1 - K_i; \quad D_i = \frac{1}{Z_i}.$$

Они являются знаменателем и частным от деления под знаком суммы в формуле (6.58). Производится суммирование слагаемых с помощью выражения $S_i = S_{i-1} + D_i$, которое является значением опытной функции интенсивности замен $W(L_i)$. Промежуточные расчетные величины и значение $W(L_i)$ внесены в табл. 6.22.

Таблица 6.22
Расчет опытной функции интенсивности замен

Номер отказа, i	1	2	3	4	5	6	7	8
Порядковый номер трактора, K_i	2	11	14	16	17	18	19	20
Z_i	19	10	7	5	4	3	2	1
D_i	0,053	0,1	0,143	0,2	0,25	0,333	0,5	1,0
$W(L_i)$	0,053	0,153	0,295	0,495	0,745	1,079	1,579	2,579
Квантиль функции нормального распределения, U	-1,665	-1,085	-0,646	-0,272	0,058	0,385	0,834	1,419

По рассчитанным значениям опытной функции интенсивности замен согласно табл. 7 Приложения выбирается квантиль U функции нормального распределения и заносится в последнюю строку табл. 6.22.

6.5.5. УРАВНЕНИЕ ОДНОФАКТОРНОЙ ЛИНЕЙНОЙ РЕГРЕССИИ ПО ДАННЫМ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ

Уравнение однофакторной линейной регрессии в общем виде можно записать выражением

$$Y = B_0 + B_1 \cdot X, \quad (6.65)$$

где Y — результативный признак; X — факториальный признак; B_0, B_1 — коэффициенты линейной регрессии.

Значения коэффициентов линейной регрессии рассчитываются по формулам

$$B_0 = \frac{\sum Y_i \cdot \sum X_i^2 - \sum X_i \cdot Y_i \cdot \sum X_i}{M \cdot \sum X_i^2 - \sum X_i \cdot \sum X_i}; \quad (6.66)$$

$$B_1 = \frac{M \cdot \sum X_i \cdot Y_i - \sum X_i \cdot \sum Y_i}{M \cdot \sum X_i^2 - \sum X_i \cdot \sum X_i}, \quad (6.67)$$

где $\sum X_i$ — сумма факториального признака; $\sum Y_i$ — сумма результативного признака; $\sum X_i \cdot Y_i$ — сумма произведения факториального и результативного признаков.

В формулах (6.66) и (6.67) далее i принимает значения от 1 до M ($i = 1, 2, 3, \dots, M$).

Линейный коэффициент корреляции определяется по формуле

$$r = \frac{(X \cdot Y)_{\text{ср}} - X_{\text{ср}} \cdot Y_{\text{ср}}}{\sigma_X \cdot \sigma_Y}, \quad (6.68)$$

где $(X \cdot Y)_{\text{ср}}$ — среднее значение произведения факториального и результативного признаков; $X_{\text{ср}}$ — среднее значение факториального признака; $Y_{\text{ср}}$ — среднее значение результативного признака; σ_X — среднее квадратическое отклонение факториального признака; σ_Y — среднее квадратическое отклонение результативного признака.

$$(X \cdot Y)_{\text{ср}} = \frac{1}{M} \cdot \sum X_i \cdot Y_i; \quad (6.69)$$

$$X_{\text{cp}} = \frac{1}{M} \cdot \sum X_i; \quad (6.70)$$

$$Y_{\text{cp}} = \frac{1}{M} \cdot \sum Y_i; \quad (6.71)$$

$$\sigma_X = \sqrt{\frac{1}{M-1} \cdot \sum (X_i - X_{\text{cp}})^2}; \quad (6.72)$$

$$\sigma_Y = \sqrt{\frac{1}{M-1} \cdot \sum (Y_i - Y_{\text{cp}})^2}. \quad (6.73)$$

Уравнение однофакторной линейной регрессии при нормальном распределении в соответствии с выражениями (6.57) и (6.65) имеет вид

$$U = B_0 + B_1 \cdot L. \quad (6.74)$$

Тогда с использованием уравнений (6.66) и (6.67) запишем

$$B_0 = \frac{\sum U_i \cdot \sum L_i^2 - \sum L_i \cdot \sum U_i \cdot \sum L_i}{M \cdot \sum L_i^2 - \sum L_i \cdot \sum L_i}; \quad (6.75)$$

$$B_1 = \frac{M \cdot \sum L_i \cdot U_i - \sum L_i \cdot \sum U_i}{M \cdot \sum L_i^2 - \sum L_i \cdot \sum L_i}, \quad (6.76)$$

С использованием выражений (6.68)–(6.73) запишем

$$r = \frac{(L \cdot U)_{\text{cp}} - L_{\text{cp}} \cdot U_{\text{cp}}}{\sigma_L \cdot \sigma_U}, \quad (6.77)$$

$$(L \cdot U)_{\text{cp}} = \frac{1}{M} \cdot \sum L_i \cdot U_i; \quad (6.78)$$

$$L_{\text{cp}} = \frac{1}{M} \cdot \sum L_i; \quad (6.79)$$

$$U_{\text{cp}} = \frac{1}{M} \cdot \sum U_i; \quad (6.80)$$

$$\sigma_L = \sqrt{\frac{1}{M-1} \cdot \sum (L_i - L_{\text{cp}})^2}; \quad (6.81)$$

$$\sigma_U = \sqrt{\frac{1}{M-1} \cdot \sum (U_i - U_{\text{cp}})^2}. \quad (6.82)$$

Данные для расчета оценок коэффициентов линейной регрессии и коэффициентов корреляции по всем рассматриваемым распределениям и обоим методам приведены в табл. 6.23. Квантили функции нормального распределения, выбранные по опытным значениям $W(L)$ и $F(L)$, имеют по некоторым номерам отказов разные значения. Но сумма и соответственно их среднее значение, входящее в расчетные формулы коэффициентов, в обоих случаях равны.

Расчет оценок коэффициентов регрессии и корреляции по методу Джонсона и Нельсона получается идентичным, поэтому выполнен по нормальному и логнормальному распределениям один раз. В табл. 6.23 внесены квантили U , выбранные по значению $F(L)$.

При нормальном распределении значения оценок коэффициентов B_0 и B_1 определяем по формулам (6.78) и (6.79)

$$B_0 = \frac{-1,048 \cdot 250\,300\,000 - 3632 \cdot 43\,410}{8 \cdot 250\,300\,000 - 43\,410 \cdot 43\,410} = -3,576;$$

$$B_1 = \frac{8 \cdot 3632 - 43\,410 \cdot (-1,048)}{8 \cdot 250\,300\,000 - 43\,410 \cdot 43\,410} = 0,0006.$$

Уравнение линейной регрессии имеет вид

$$U = -3,576 + 0,0006 \cdot L.$$

По формулам (6.78)–(6.82) определяем числовые значения следующих характеристик:

$$(L \cdot U)_{cp} = \frac{3632}{8} = 454,02;$$

$$L_{cp} = \frac{43\,410}{8} = 5427;$$

$$U_{cp} = -\frac{1,048}{8} = -0,131;$$

$$\sigma_L = \sqrt{\frac{1}{7} \cdot 14\,682\,000} = 1448;$$

$$\sigma_U = \sqrt{\frac{1}{7} \cdot 7,041} = 1,003.$$

Данные для расчета коэффициентов

Номер трактора, i	1	2	3
Наработка, L_i моточас.	2301	5034	5259
Функция распределения, $F(L_i)$	0,053	0,143	0,257
Функция замен, $W(L_i)$	0,053	0,153	0,295
Квантиль функции нормального распределения, U_i	-1,665	-1,085	-0,646
$\lg L_i$	3,362	3,702	3,721
$\lg W(L_i)$	-1,279	-0,816	-0,529
Y_{B_i}	-1,268	-0,811	-0,528
L_i^2	5 295 000	25 340 000	27 660 000
$(\lg L_i)^2$	11,302	13,704	13,845
$U_i \cdot L_i$	-3831	-5462	-3397
$\lg L_i \cdot U_i$	-5,598	-4,017	-2,404
$\lg L_i \cdot Y_{B_i}$	-4,695	-3,484	-2,589
$\lg L_i \cdot \lg W(L_i)$	-4,299	-3,022	-1,970
$(L_i - L_{cp})^2$	9 770 000	154 200	28 100
$(U_i - U_{cp})^2$	2,353	0,91	0,265
$[\lg L_i - (\lg L)_{cp}]^2$	0,125	0,0002	0,00003
$(Y_{B_i} - Y_{B_{cp}})^2$	0,928	0,256	0,05
$[W(L_i) - (W(L))_{cp}]^2$	0,226	0,167	0,106

По формуле (6.77) определяем оценку коэффициента корреляции:

$$r = \frac{454,02 - 5427 \cdot (-0,131)}{1448 \cdot 1,003} = 0,802.$$

Уравнение линейной регрессии при логнормальном распределении в соответствии с выражением (6.65) имеет вид

$$U = B_0 + B_1 \cdot \lg L. \quad (6.83)$$

Согласно уравнениям (6.66) и (6.67) запишем

$$B_0 = \frac{\sum U_i \cdot \sum (\lg L_i)^2 - \sum (\lg L_i \cdot U_i) \cdot \sum \lg L_i}{M \cdot \sum (\lg L_i)^2 - \sum \lg L_i \cdot \sum \lg L_i}; \quad (6.84)$$

линейной регрессии и корреляции

4	5	6	7	8	Σ параметра
5412	5652	6060	6501	7194	43 413
0,389	0,521	0,653	0,786	0,918	—
0,495	0,745	1,079	1,579	2,579	6,978
-0,287	0,058	0,385	0,800	1,392	-1,048
3,733	3,752	3,782	3,813	3,857	29,723
-0,305	-0,128	0,033	0,198	0,411	-2,414
-0,308	-0,133	0,025	0,187	0,398	-2,438
29 290 000	31 950 000	36 720 000	422 60000	51 750 000	250 300 000
13,938	14,079	14,307	14,539	14,876	110,591
-1553	327,82	2333	5201	10010	3632
-1,071	0,218	1,456	3,05	5,369	-13,802
-1,718	-1,296	-0,699	-0,05	0,615	-2,996
-1,139	-0,479	0,125	0,756	1,587	-8,441
213,89	50790	40 1200	115 4000	3 124 000	14 680 000
0,024	0,036	0,266	0,867	2,32	7,041
0,0003	0,001	0,005	0,010	0,02	0,161
0,000006	0,029	0,109	0,242	0,493	2,108
0,051	0,007	0,014	0,203	0,904	1,680

$$B_1 = \frac{M \cdot \sum (\lg L_i \cdot U_i) - \sum \lg L_i \cdot \sum U_i}{M \cdot \sum (\lg L_i)^2 - \sum \lg L_i \cdot \sum \lg L_i}; \quad (6.85)$$

Согласно формулам (6.68)–(6.70) и (6.72) имеем

$$r = \frac{(\lg L \cdot U)_{\text{cp}} - (\lg L)_{\text{cp}} \cdot U_{\text{cp}}}{\sigma_{\lg L} \cdot \sigma_U}; \quad (6.86)$$

$$(\lg L \cdot U)_{\text{cp}} = \frac{1}{M} \cdot \sum (\lg L_i \cdot U_i); \quad (6.87)$$

$$(\lg L)_{\text{cp}} = \frac{1}{M} \cdot \sum \lg L_i; \quad (6.88)$$

$$\sigma_{\lg L} = \sqrt{\frac{1}{M-1} \cdot \sum [\lg L_i - (\lg L)_{cp}]^2}. \quad (6.89)$$

Числовые значения коэффициентов линейной регрессии определяем по формулам (6.84) и (6.85):

$$B_0 = \frac{-1,048 \cdot 110,591 - (-2,996) \cdot 29,723}{8 \cdot 110,591 - 29,723 \cdot 29,723} = -20,855;$$

$$B_1 = \frac{8 \cdot (-2,996) - 29,723 \cdot (-1,048)}{8 \cdot 110,591 - 29,723 \cdot 29,723} = 5,578.$$

Уравнение линейной регрессии имеет вид

$$U = -20,855 + 5,578 \cdot \lg L.$$

По формулам (6.87)–(6.89) рассчитываем числовые значения следующих характеристик:

$$(\lg L \cdot U)_{cp} = -\frac{2,996}{8} = -0,375;$$

$$(\lg L)_{cp} = \frac{29,723}{8} = 3,715;$$

$$\sigma_{\lg L} = \sqrt{\frac{1}{7} \cdot 0,161} = 0,152.$$

По формуле (6.86) рассчитываем оценку коэффициента корреляции при логнормальном распределении:

$$r = \frac{-0,375 - 3,715 \cdot (-0,131)}{0,152 \cdot 1,003} = 0,738.$$

При использовании метода Джонсона уравнение линейной регрессии для распределения Вейбулла в соответствии с выражениями (6.64) и (6.65) имеет вид

$$\lg[-\ln(1 - F(L))] = B_0 + B_1 \cdot \lg L. \quad (6.90)$$

Обозначив $Y_B = \lg[-\ln(1 - F(L))]$, запишем

$$Y_B = B_0 + B_1 \cdot \lg L. \quad (6.91)$$

Согласно уравнениям (6.66) и (6.67) получаем

$$B_0 = \frac{\sum Y_{B_i} \cdot \sum (\lg L_i)^2 - \sum (\lg L_i \cdot Y_{B_i}) \cdot \sum \lg L_i}{M \cdot \sum (\lg L_i)^2 - \sum \lg L_i \cdot \sum \lg L_i}; \quad (6.92)$$

$$B_1 = \frac{M \cdot \sum (\lg L_i \cdot Y_{B_i}) - \sum \lg L_i \cdot \sum Y_{B_i}}{M \cdot \sum (\lg L_i)^2 - \sum \lg L_i \cdot \sum \lg L_i}. \quad (6.93)$$

С использованием формул (6.68), (6.69), (6.71) и (6.73) получаем

$$r = \frac{(\lg L \cdot H_B)_{\text{cp}} - (\lg L)_{\text{cp}} \cdot (Y_B)_{\text{cp}}}{\sigma_{\lg L} \cdot \sigma_{Y_B}}; \quad (6.94)$$

$$(\lg L \cdot Y_B)_{\text{cp}} = \frac{1}{M} \cdot \sum (\lg L_i \cdot Y_{B_i}); \quad (6.95)$$

$$(Y_B)_{\text{cp}} = \frac{1}{M} \cdot \sum Y_{B_i}; \quad (6.96)$$

$$\sigma_{Y_B} = \sqrt{\frac{1}{M-1} \cdot \sum [Y_{B_i} - (Y_B)_{\text{cp}}]^2}. \quad (6.97)$$

При использовании метода Джонсона числовые значения коэффициентов линейной регрессии рассчитываются по формулам (6.92) и (6.93):

$$B_0 = \frac{-2,438 \cdot 110,591 - (-8,536) \cdot 29,723}{8 \cdot 110,591 - 29,723 \cdot 29,723} = -12,358;$$

$$B_1 = \frac{8 \cdot (-8,536) - 29,723 \cdot (-2,438)}{8 \cdot 110,591 - 29,723 \cdot 29,723} = 3,244.$$

Уравнение линейной регрессии имеет вид

$$\lg[-\ln(1 - F(L))] = -12,358 + 3,244 \cdot \lg L$$

или

$$Y_B = -12,358 + 3,244 \cdot \lg L.$$

По формулам (6.95)–(6.97) рассчитываем параметры, необходимые для определения оценок коэффициента корреляции:

$$(\lg L \cdot Y_B)_{\text{cp}} = -\frac{8,536}{8} = -1,067;$$

$$(Y_B)_{\text{cp}} = -\frac{2,438}{8} = -0,305;$$

$$\sigma_{Y_B} = \sqrt{\frac{1}{7} \cdot 2,108} = 0,549.$$

По формуле (6.94) рассчитываем оценку коэффициента корреляции

$$r = \frac{-1,067 - 3,715 \cdot (-0,305)}{0,152 \cdot 0,549} = 0,784.$$

При использовании метода Нельсона уравнение линейной регрессии в соответствии с выражениями (6.63) и (6.65) имеет вид

$$\lg W(L) = B_0 + B_1 \cdot \lg L. \quad (6.98)$$

Согласно уравнениям (6.75) и (6.76) имеем

$$B_0 = \frac{\sum \lg W(L_i) \cdot \sum (\lg L_i)^2 - \sum \lg L_i \cdot \lg W(L_i) \cdot \sum \lg L_i}{M \cdot \sum (\lg L_i)^2 - \sum \lg L_i \cdot \sum \lg L_i}; \quad (6.99)$$

$$B_1 = \frac{M \cdot \sum \lg L_i \cdot \lg W(L_i) - \sum \lg L_i \cdot \sum \lg W(L_i)}{M \cdot \sum (\lg L_i)^2 - \sum \lg L_i \cdot \sum \lg L_i}. \quad (6.100)$$

С использованием формул (6.68), (6.69), (6.71) и (6.73) получаем

$$r = \frac{[\lg L \cdot \lg W(L)]_{cp} - (\lg L)_{cp} \cdot [\lg W(L)]_{cp}}{\sigma_{\lg L} \cdot \sigma_{\lg W(L)}}; \quad (6.101)$$

$$[\lg L \cdot \lg W(L)]_{cp} = \frac{1}{M} \cdot \sum \lg L_i \cdot \lg W(L_i); \quad (6.102)$$

$$[\lg W(L)]_{cp} = \frac{1}{M} \cdot \sum \lg W(L_i); \quad (6.103)$$

$$\sigma_{\lg W(L)} = \sqrt{\frac{1}{M-1} \cdot \sum [\lg W(L_i) - (\lg W(L))_{cp}]^2}. \quad (6.104)$$

Числовые значения коэффициента линейной регрессии определяем по формулам (6.99) и (6.100):

$$B_0 = \frac{-2,414 \cdot 110,591 - (-8,441) \cdot 29,723}{8 \cdot 110,591 - 29,723 \cdot 29,723} = -12,531;$$

$$B_1 = \frac{8 \cdot (-8,441) - 29,723 \cdot (-2,414)}{8 \cdot 110,591 - 29,723 \cdot 29,723} = 3,291.$$

Уравнение линейной регрессии имеет вид

$$\lg W(L) = -12,531 + 3,291 \cdot \lg L.$$

По формулам (6.102)–(6.104) вычисляем следующие характеристики:

$$[\lg L \cdot \lg W(L)]_{\text{cp}} = -\frac{8,441}{8} = -1,055;$$

$$[\lg W(L)]_{\text{cp}} = -\frac{2,414}{8} = -0,302;$$

$$\sigma_{\lg W(L)} = \sqrt{\frac{1}{7} \cdot 2,172} = 0,557.$$

По формуле (6.101) определяем оценку коэффициента корреляции

$$r = \frac{-1,055 - 3,715 \cdot (-0,302)}{0,152 \cdot 0,557} = 0,784.$$

6.5.6. ТОЧЕЧНЫЕ ОЦЕНКИ ПАРАМЕТРОВ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ И ПОКАЗАТЕЛЕЙ ДОЛГОВЕЧНОСТИ

Сравнивая уравнения (6.57) и (6.65), можно записать зависимости

$$T_{\text{cp}} = -\frac{B_0}{B_1}; \quad \sigma_T = \frac{1}{B_1}. \quad (6.105)$$

По формулам (6.105) рассчитываются оценки параметров нормального распределения: математического ожидания и среднего квадратического отклонения ресурса. Затем определяется оценка коэффициента вариации V по формуле

$$V = \frac{\sigma_T}{T_{\text{cp}}}. \quad (6.106)$$

Оценки средней наработки тракторов, достигших предельного состояния и среднего квадратического отклонения, определяем по формулам (6.105).

$$T_{\text{cp}} = -\frac{-3,576}{0,0006} = 5633; \quad \sigma_T = \frac{1}{0,0006} = 1575.$$

По формуле (6.106) определяем оценку коэффициента вариации

$$V = \frac{5633}{1575} = 0,28.$$

По аналогии с нормальным распределением формулы (6.105) для определения оценок параметров логнормального распределения будут выглядеть следующим образом:

$$(\lg L)_{cp} = -\frac{B_0}{B_1}; \quad \sigma_{\lg L} = \frac{1}{B_1}. \quad (6.107)$$

Для логарифмически нормального закона

$$f_i = \frac{\mu}{\sigma_{\lg L} \cdot L_i \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot e^{-\frac{-(\lg L - (\lg L)_{cp})^2}{2 \cdot \sigma_{\lg L}^2}},$$

где L_i — значения наработки тракторов согласно табл. 6.20, f_i — соответствующие частоты логарифмически нормального распределения, $\mu = 0,4343$ — масштабный коэффициент.

Оценки средней наработки тракторов, достигших предельного состояния и среднего квадратического отклонения при логнормальном распределении, определяем по известным формулам:

$$T_{cp} = \frac{\sum_i (L_i \cdot f_i)}{\sum_i f_i}; \quad \sigma_T = \sqrt{\frac{\sum_i L_i^2 \cdot f_i}{\sum_i f_i} - T_{cp}^2}.$$

$$T_{cp} = 5623; \quad \sigma_T = 824.$$

Оценка коэффициента вариации в соответствии с формулой (6.106) принимает значение

$$V = \frac{824}{5623} = 0,147.$$

Для распределения Вейбулла сравним уравнения (6.63) и (6.65) или (6.64) и (6.65) и запишем зависимости

$$b = B_1; \quad (6.108)$$

$$b \cdot \lg a = -B_0. \quad (6.109)$$

Подставляя значение $b = B_1$ в уравнение (6.109), получаем

$$B_1 \cdot \lg a = -B_0$$

или

$$\lg a = -\frac{B_0}{B_1}. \quad (6.110)$$

Потенцируя выражение (6.110), получаем

$$a = 10^{\left(-\frac{B_0}{B_1}\right)}. \quad (6.111)$$

По равенству (6.108) принимается точечная оценка параметра формы, по формуле (6.111) рассчитывается оценка параметра масштаба распределения Вейбулла. По оценкам параметров распределения рассчитываются оценки ресурса.

$$T_{cp} = a \cdot \Gamma\left(1 + \frac{1}{b}\right); \quad (6.112)$$

$$\sigma_{cp}^2 = a \cdot \Gamma\left(1 + \frac{2}{b}\right) + \left[\frac{\Gamma\left(1 + \frac{1}{b}\right)}{T_{cp}} \right]^2, \quad (6.113)$$

где Γ — символ гамма-функции Эйлера.

При немашинном расчете оценки среднего ресурса и его среднего квадратического отклонения можно определить по формулам

$$T_{cp} = a \cdot K_V; \quad (6.114)$$

$$\sigma_T = L_{cp} \cdot V, \quad (6.115)$$

где K_V — коэффициент распределения Вейбулла; V — коэффициент вариации.

Значения коэффициентов K_V и V выбираются по табл. 3 Приложения в зависимости от параметра формы b , принятого по равенству (6.108).

В соответствии с равенством (6.108) оценка параметра формы распределения Вейбулла принимает числовое значение коэффициента регрессии B_1 уравнения, выведенного по методу Джонсона или Нельсона.

Метод Джонсона: $b = 3,244$. По выражению (6.111) определяем оценку параметра масштаба распределения:

$$a = 10^{\left(-\frac{-12,358}{3,244}\right)} = 6446.$$

Метод Нельсона: $b = 3,291$, тогда

$$a = 10^{\left(\frac{-12,531}{3,291}\right)} = 6413.$$

По табл. 3 Приложения при указанных значениях b выбираем $K_V = 0,341$, $V = 0,896$.

По формулам (6.114) и (6.115) рассчитываем оценки показателей долговечности.

По Джонсону:

$$T_{cp} = 6446 \cdot 0,896 = 5776; \\ \sigma_T = 5776 \cdot 0,341 = 1970.$$

По Нельсону:

$$T_{cp} = 6413 \cdot 0,896 = 5746; \\ \sigma_T = 5746 \cdot 0,341 = 1959.$$

6.5.7. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГРАНИЦ ИНТЕРВАЛА РАЗБРОСА РЕСУРСА

При нормальном и логнормальном распределении границы интервала разброса среднего ресурса определяются по формулам

$$T_B = L_{cp} + \frac{\sigma_L}{\sqrt{M}} \cdot t_s; \quad (6.116)$$

$$T_H = L_{cp} - \frac{\sigma_L}{\sqrt{M}} \cdot t_s. \quad (6.117)$$

Обозначения в формулах (6.116) и (6.117) те же, что и в выражениях (6.84) и (6.85). Значение квантиля t_s выбирается по табл. 5 Приложения в зависимости от доверительной вероятности P_D и количества достигших предельного состояния объектов M .

Для определения границ интервала разброса среднего ресурса при нормальном и логнормальном распределении примем доверительную вероятность $P_D = 0,9$. По табл. 5 Приложения при $P_D = 0,9$ и числе объектов $M = 8$ (число измерений равно восьми) выбираем значение квантиля функции Стьюдента $t_s = 1,86$. По формулам (6.116) и (6.117) рассчитываем значение верхней и нижней границы интервала.

При нормальном распределении:

$$T_B = 5633 + \frac{1575}{\sqrt{8}} \cdot 1,86 = 5633 + 1036 = 6669;$$

$$T_H = 5633 - \frac{1575}{\sqrt{8}} \cdot 1,86 = 5633 - 1036 = 4597.$$

При логнормальном распределении:

$$T_B = 5623 + \frac{824}{\sqrt{8}} \cdot 1,86 = 5623 + 542 = 6165;$$

$$T_H = 5623 - \frac{824}{\sqrt{8}} \cdot 1,86 = 5623 - 542 = 5081.$$

При распределении Вейбулла L_B и L_H определяются по формулам

$$T_B = T_{cp} \cdot r_1^{\frac{1}{b}}; \quad (6.118)$$

$$T_H = T_{cp} \cdot r_2^{\frac{1}{b}}; \quad (6.119)$$

$$T_H = T_{cp} \cdot r_3^{\frac{1}{b}}. \quad (6.120)$$

Формула (6.119) используется для определения нижней границы интервала разброса в случае обработки данных завершенных наблюдений ($M = N$), формула (6.120) — при обработке данных незавершенных испытаний. Значения коэффициентов r_1 , r_2 , r_3 выбираются по табл. 6 Приложения в зависимости от числа объектов M .

В рассматриваемом примере имеют место результаты незавершенных испытаний, поэтому верхнюю границу интервала разброса определяем по формуле (6.118), нижнюю — по формуле (6.120). По табл. 6 Приложения при числе объектов $M = 8$ выбираем значения $r_1 = 1,72$, $r_3 = 0,62$. При использовании метода Джонсона:

$$T_B = 5776 \cdot 1,72^{\frac{1}{3,244}} = 5776 \cdot 1,182 = 6827;$$

$$T_H = 5776 \cdot 0,62^{\frac{1}{3,244}} = 5776 \cdot 0,863 = 4985.$$

При использовании метода Нельсона:

$$T_B = 5746 \cdot 1,72^{\frac{1}{3,291}} = 5746 \cdot 1,179 = 6775;$$

$$T_H = 5746 \cdot 0,62^{\frac{1}{3,291}} = 5746 \cdot 0,865 = 4970.$$

6.5.8. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТОЧЕЧНЫХ ОЦЕНОК ГАММА-ПРОЦЕНТНОГО РЕСУРСА

Точечные оценки гамма-процентного ресурса определяются по уравнению линейной регрессии выбранного закона распределения при соответствующих значениях результативного признака.

При нормальном распределении согласно уравнению (6.74):

$$T_{P\gamma} = \frac{U_\gamma - B_0}{B_1}. \quad (6.121)$$

При логнормальном распределении согласно уравнению (6.83):

$$\lg T_{P\gamma} = \frac{U_\gamma - B_0}{B_1}. \quad (6.122)$$

При распределении Вейбулла по методу Джонсона и Нельсона согласно уравнениям (6.90) и (6.98) соответственно:

$$\lg T_{P\gamma} = \frac{\lg(-\ln(1 - F(T_\gamma)) - B_0)}{B_1}; \quad (6.123)$$

$$\lg T_{P\gamma} = \frac{\lg W(T_\gamma) - B_0}{B_1}. \quad (6.124)$$

Определим точечные оценки 80 и 90%-ного ресурса тракторов по всем рассматриваемым распределениям. Данные для расчета указанных характеристик по уравнениям линейной регрессии вероятностных законов приведены в табл. 6.24.

При нормальном распределении согласно формуле (6.121) запишем

$$T_{P80\%} = \frac{3,576 - 0,842}{0,0006} = 4306 \text{ моточасов};$$

$$T_{P90\%} = \frac{3,576 - 1,282}{0,0006} = 3613 \text{ моточасов}.$$

Таблица 6.24

Данные для расчета гамма-процентного ресурса

$T_{P\gamma}$	$F(T)$	$W(T)$	U	$\lg W(T)$	$Y_R = \lg[-\ln(1 - F(T))]$
$L_{80\%}$	0,2	0,223	-0,842	-0,652	-0,651
$L_{90\%}$	0,1	0,105	-1,282	-0,979	-0,977

При логнормальном распределении в соответствии с формулой (6.122) имеем

$$\lg T_{P80\%} = \frac{20,855 - 0,842}{5,578} = 3,588;$$

$$\lg T_{P90\%} = \frac{20,855 - 1,282}{5,578} = 3,509.$$

Потенцируя полученные выражения, получаем

$$T_{P80\%} = 10^{3,588} = 3871;$$

$$T_{P90\%} = 10^{3,509} = 3228.$$

При распределении Вейбулла по Джонсону и Нельсону в соответствии с уравнениями (6.123) и (6.124) соответственно имеем

$$\lg T_{P80\%} = \frac{12,358 - 0,651}{3,244} = 3,609;$$

$$\lg T_{P90\%} = \frac{12,358 - 0,977}{3,244} = 3,508;$$

$$\lg T_{P80\%} = \frac{12,531 - 0,652}{3,291} = 3,610;$$

$$\lg T_{P90\%} = \frac{12,531 - 0,979}{3,291} = 3,51.$$

Потенцируя полученные выражения, получаем

$$T_{P80\%} = 10^{3,609} = 4061; \quad T_{P90\%} = 10^{3,508} = 3222;$$

$$T_{P80\%} = 10^{3,610} = 4064; \quad T_{P90\%} = 10^{3,51} = 3233.$$

6.5.9. ВЫВОДЫ

Оценка коэффициента корреляции имеет наибольшее значение при нормальном распределении. Поэтому принимаем гипотезу о принадлежности наработок отказавших тракторов к данному виду вероятностного закона. Точечные и интервальные оценки показателей долговечности имеют следующие значения:

- оценка среднего ресурса $T_{cp} = 5633$ моточаса;
- оценка среднего квадратического отклонения ресурса $\sigma_T = 1575$ моточасов;

- оценка коэффициента вариации $V = 0,28$;
- оценка 80% -го ресурса $T_{P80\%} = 4306$ моточасов;
- оценка 90% -го ресурса $T_{P90\%} = 3613$ моточасов;
- верхняя граница интервала разброса среднего ресурса $T_B = 6669$ моточасов;
- нижняя граница интервала разброса среднего ресурса $T_H = 4597$ моточасов.

Следует отметить, что в данном пункте в качестве полного примера пользования всеми формулами проведен расчет точечных и интервальных оценок показателей долговечности объектов по всем рассматриваемым в задаче вероятностным законам с применением обоих методов. Как показывает данный пример, больших расхождений в значениях оценок показателей долговечности, рассчитанных с применением метода Джонсона и Нельсона, нет. В рассмотренном примере при распределении Вейбулла оценка среднего ресурса, рассчитанного по методу Джонсона $T_{cp} = 5776$, по методу Нельсона — $T_{cp} = 5746$ моточасов. Поэтому на практике расчет оценок показателей долговечности можно проводить любым методом в такой последовательности. Вначале нужно рассчитать оценки коэффициентов корреляции по всем рассматриваемым распределениям, выбрать вероятностный закон, при котором оценка коэффициента корреляции имеет наибольшее значение, затем по выбранному распределению рассчитать коэффициенты линейной регрессии и по ним определить точечные и интервальные оценки показателей долговечности объектов испытаний.

6.6. ПЛАНИРОВАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ ДОЛГОВЕЧНОСТИ УЗЛОВ МАШИН

6.6.1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФУНКЦИИ ОТКЛИКА

Исследование влияния радиального Δ и углового γ смещений осей соединяемых валов на долговечность муфты представлено согласно примеру расчета, выполненного в работе [23].

На долговечность муфты действуют два фактора: радиальное Δ и угловое γ смещения полумуфт. Обозначим кодированные значения факторов через x_1 и x_2 и определим их по следующим зависимостям:

$$x_1 = \frac{\Delta - 0,5 \cdot (\Delta_{\max} + \Delta_{\min})}{0,5 \cdot (\Delta_{\max} - \Delta_{\min})}; \quad (6.125)$$

$$x_2 = \frac{\gamma - 0,5 \cdot (\gamma_{\max} + \gamma_{\min})}{0,5 \cdot (\gamma_{\max} - \gamma_{\min})}. \quad (6.126)$$

Предельные значения радиальных и угловых смещений устанавливаем, исходя из опыта эксплуатации муфт: $\Delta_{\max} = 4,11$ мм, $\Delta_{\min} = 3,2$ мм, $\gamma_{\max} = 4,11$, $\gamma_{\min} = 0,2$. Подставляя предельные значения в формулы, получаем кодированные значения для x_1 и x_2 :

$$x_1 = \frac{\Delta - 3,65}{0,45}; \quad x_2 = \frac{\gamma - 2,15}{1,95}.$$

В качестве отклика Y рассматриваем логарифм ресурса lgL , где L — ресурс, выраженный в оборотах муфты. Для оценки функции отклика нужно найти связь между факторами x_1 , x_2 и откликом. Функцию отклика в первом приближении задаем полиномом первого порядка с учетом эффекта взаимодействия

$$Y = \beta_0 + \beta_1 \cdot x_1 + \beta_2 \cdot x_2 + \beta_{12} \cdot x_1 \cdot x_2, \quad (6.127)$$

где β_0 , β_1 , β_2 , β_{12} — коэффициенты функции.

Соответственно оценку функции отклика (эмпирического уравнения регрессии) ищем в виде

$$\bar{Y} = b_0 + b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2 + b_{12} \cdot x_1 \cdot x_2, \quad (6.128)$$

где b_0 , b_1 , b_2 , b_{12} — оценки коэффициентов β_0 , β_1 , β_2 , β_{12} соответственно.

6.6.2. ПЛАНИРОВАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

При планировании был выбран путь полного факторного эксперимента типа 2^2 . Число опытов $N = 4$; число повторов каждого опыта $m = 3$; необходимое число образцов равно $m \times N = 12$.

Результаты испытаний на долговечность

№ опыта	Факторы			Эффект взаимодействия x_1x_2	Отклик $Y = \lg L$		
	x_0	x_1	x_2		Повторы опыта y_{uq}	Среднее значение y_u	Среднее квадратическое отклонение S_u
1	+	+	-	-	6,8524; 6,8814; 7,0028	6,9130	0,08
2	+	+	+	+	5,9582; 6,0528; 6,1060	6,0390	0,075
3	+	-	+	-	6,5941; 6,6688; 6,8510	6,7050	0,132
4	+	-	-	+	7,9085; 7,9811; 8,2140	8,0350	0,15961

Испытания проводили на стенде. Циркулирующий в контуре момент соответствовал номинальному моменту испытуемой муфты. Конструкция стенда позволяет изменять радиальное и угловое смещение полумуфт в широких пределах.

Результаты испытаний на долговечность представлены в виде значений логарифмов ресурса в табл. 6.25.

Учитывая, что число повторов $m = 3$, среднее значение y_u и среднее квадратическое отклонение S_u логарифма ресурса в u -м опыте определяем по формулам

$$y_u = \frac{1}{3} \cdot \sum_{q=1}^3 y_{uq}; \quad (6.129)$$

$$S_u = \sqrt{\frac{1}{2} \cdot \left[\sum_{q=1}^3 y_{uq}^2 - \frac{\left(\sum_{q=1}^3 y_{uq} \right)^2}{3} \right]}, \quad (6.130)$$

где y_{uq} — текущее значение логарифма ресурса.

По результатам испытаний определяем оценки коэффициентов функций отклика:

$$b_0 = \frac{1}{N} \cdot \sum_{u=1}^N y_u; \quad (6.131)$$

$$b_0 = \frac{1}{4} \cdot (6,913 + 6,039 + 6,705 + 8,035) = 6,923.$$

$$b_1 = \frac{1}{N} \cdot \sum_{u=1}^N y_u \cdot x_{1u}; \quad (6.132)$$

$$b_1 = \frac{1}{4} \cdot (6,913 + 6,039 - 6,705 - 8,035) = -0,447.$$

$$b_2 = \frac{1}{N} \cdot \sum_{u=1}^N y_u \cdot x_{2u}; \quad (6.133)$$

$$b_2 = \frac{1}{4} \cdot (-6,913 + 6,039 + 6,705 - 8,035) = -0,551.$$

$$b_{12} = \frac{1}{N} \cdot \sum_{u=1}^N y_u \cdot x_{2u}; \quad (6.134)$$

$$b_{12} = \frac{1}{4} \cdot (-6,913 + 6,039 - 6,705 + 8,035) = 0,114.$$

Оценку функции отклика в кодированных значениях факторов записываем в виде

$$\bar{Y} = 6,923 - 0,447 \cdot x_1 - 0,551 \cdot x_2 + 0,114 \cdot x_1 \cdot x_2; \quad (6.135)$$

После подстановки кодированных значений x_1 и x_2 получаем оценку зависимости среднего значения логарифма ресурса от радиальных и угловых смещений осей соединяемых валов:

$$\overline{\lg N} = 9,8578 - 0,4778\Delta - 0,4353\gamma + 0,0283\Delta\gamma. \quad (6.136)$$

6.6.3. ПРОВЕРКА ОДНОРОДНОСТИ ДИСПЕРСИЙ

Статистический анализ результатов испытаний начинаем с проверки однородности дисперсий. Вычисляем критерий Кохрена:

$$G = \frac{(S_{\max})^2}{\sum_{u=1}^N (S_u)^2}; \quad (6.137)$$

$$G = 0,358.$$

Критическое значение критерия $G_{kp} = 0,7679$ выбрано в зависимости от числа степеней свободы $k_1 = m - 1 = 3 - 1 = 2$, $k_2 = N = 4$ и доверительной вероятности $P_{\text{дов}} = 0,95$. Критическое значение критерия $G_{kp} > G$, что соответствует выполнению условия однородности дисперсий.

Проверка модели методом сравнения дисперсий адекватности и воспроизводимости невозможна, так как число опытов равно числу определяемых коэффициентов функции отклика. Поэтому был поставлен дополнительный опыт в области, близкой к центру эксперимента. При радиальном смещении $\Delta = 4$ мм и угловом смещении $\gamma = 3$ было испытано три образца и соответственно определены логарифмы их ресурса: 7,2029; 7,089; 7,039. Оценки среднего значения и среднего квадратического отклонения логарифма ресурса в дополнительном опыте соответственно равны:

$$\lg L = 7,1103; S = 0,116.$$

Определяем нижнюю $\lg L_{\min}$ и верхнюю $\lg L_{\max}$ границы доверительного интервала, в котором находится истинная величина среднего значения логарифма ресурса:

$$\lg L_{\min} = \lg L - t \cdot \frac{S}{\sqrt{n}}; \quad (6.138)$$

$$\lg L_{\max} = \lg L + t \cdot \frac{S}{\sqrt{n}}, \quad (6.139)$$

где $n = 3$ — число повторов дополнительного опыта; $t = 4,303$ — квантиль распределения Стьюдента в зависи-

мости от числа степеней свободы $k = n - 1 = 2$ и доверительной вероятности $P_{\text{дов}} = 0,95$.

$$\begin{aligned}\lg L_{\min} &= 6,566; \\ \lg L_{\max} &= 7,654.\end{aligned}$$

Расчетная величина оценки среднего значения логарифма ресурса дополнительного опыта:

$$\begin{aligned}\lg L &= 10,374 - 0,604 \cdot 4 - 0,554 \cdot 3 + \\ &+ 0,057 \cdot 4 \cdot 3 = 6,98.\end{aligned}$$

Расчетная величина $\lg L$ лежит в доверительном интервале $[\lg L_{\min}, \lg L_{\max}]$, что является основанием для принятия гипотезы адекватности модели.

6.6.4. РАСЧЕТ ДИСПЕРСИИ ВОСПРОИЗВОДИМОСТИ

Для проверки значимости коэффициентов модели вычисляем дисперсию воспроизводимости:

$$S_y^2 = \frac{1}{N} \cdot \sum_{u=1}^N S_u^2; \quad (6.140)$$

$$S_y^2 = \frac{1}{4} \cdot (0,08^2 + 0,075^2 + 0,132^2 + 0,1596^2) = 0,014.$$

Дисперсия коэффициентов модели:

$$S_b^2 = \frac{S_y^2}{N \cdot m}; \quad (6.141)$$

$$S_b^2 = \frac{0,014}{4 \cdot 3} = 1,17 \cdot 10^{-3}.$$

Экспериментальные значения критерия Стьюдента t_1 , t_2 , t_{12} для коэффициентов b_1 , b_2 , b_{12} соответственно будут

$$t_1 = \frac{|b_1|}{S_b}; \quad (6.142)$$

$$t_1 = \frac{0,447}{\sqrt{1,17 \cdot 10^{-3}}} = 13,07.$$

$$t_2 = \frac{|b_2|}{S_b};$$

$$t_2 = \frac{0,551}{\sqrt{1,17 \cdot 10^{-3}}} = 16,292.$$

$$t_{12} = \frac{|b_{12}|}{S_b};$$

$$t_{12} = \frac{0,114}{\sqrt{1,17 \cdot 10^{-3}}} = 3,374.$$

Критическое значение критерия Стьюдента $t_{kp} = 2,306$ выбрано по табл. 5 Приложения в зависимости от числа степеней свободы $k = (m - 1)N = (3 - 1)4 = 8$ и доверительной вероятности $P_{дов} = 0,95$. Так как значения критериев t_1 , t_2 , t_{12} больше критического значения t_{kp} , полагают, что все коэффициенты модели значимы. Следовательно, ранее определенная зависимость среднего значения логарифма ресурса от радиального Δ и углового γ смещений остается в силе.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Таблица 1

**Табличные значения критерия χ^2 в зависимости
от уровня значимости α и числа степеней свободы К
(правосторонняя критическая область)**

К	Уровень значимости			
	0,01	0,05	0,10	0,20
1	6,3	3,8	2,7	1,6
2	9,2	5,9	4,0	3,2
3	11,3	7,8	6,2	4,6
4	13,2	9,4	7,7	5,9
5	15,0	11,0	9,2	7,2
6	16,8	12,5	10,6	8,5
7	18,4	14,0	12,0	9,8
8	20,0	15,5	13,3	11,0
9	21,6	16,9	14,6	12,2
10	23,2	18,3	15,9	13,4
11	24,7	19,6	17,2	14,6
12	26,2	21,0	18,5	15,8
13	27,6	22,3	19,8	16,9
14	29,1	23,6	21,0	18,1
15	30,5	24,9	22,3	19,3
16	32,0	26,2	23,5	20,4
17	33,4	27,5	24,7	21,6

K	Уровень значимости			
	0,01	0,05	0,10	0,20
18	34,8	28,8	25,9	22,7
19	36,1	30,1	27,2	23,9
20	37,5	31,4	28,4	25,0
21	38,9	32,6	29,6	26,1
22	40,2	33,9	30,8	27,3
23	41,6	35,1	32,0	28,4
24	42,9	36,4	33,1	29,5
25	44,3	37,6	34,3	30,6
26	45,6	38,8	35,5	31,7
27	46,9	40,1	36,7	32,9
28	48,2	41,3	37,9	34,0
29	49,5	42,5	39,8	35,1
30	50,8	43,7	40,2	36,2

Таблица 2
Плотность нормального распределения

t	$f(t)$	t	$f(t)$	t	$f(t)$	t	$f(t)$
0,01	0,39891	1,01	0,23954	2,01	0,05292	3,01	0,00430
0,02	0,39885	1,02	0,23712	2,02	0,05186	3,02	0,00417
0,03	0,39875	1,03	0,23471	2,03	0,05082	3,03	0,00405
0,04	0,39861	1,04	0,23229	2,04	0,04980	3,04	0,00393
0,05	0,39843	1,05	0,22987	2,05	0,04879	3,05	0,00381
0,06	0,39821	1,06	0,22746	2,06	0,04780	3,06	0,00370
0,07	0,39795	1,07	0,22505	2,07	0,04682	3,07	0,00358
0,08	0,39765	1,08	0,22265	2,08	0,04586	3,08	0,00347
0,09	0,39732	1,09	0,22024	2,09	0,04491	3,09	0,00337
0,10	0,39694	1,10	0,21784	2,10	0,04398	3,10	0,00327
0,11	0,39652	1,11	0,21545	2,11	0,04307	3,11	0,00317
0,12	0,39607	1,12	0,21306	2,12	0,04216	3,12	0,00307
0,13	0,39557	1,13	0,21068	2,13	0,04128	3,13	0,00298

<i>t</i>	<i>f(t)</i>	<i>t</i>	<i>f(t)</i>	<i>t</i>	<i>f(t)</i>	<i>t</i>	<i>f(t)</i>
0,14	0,39504	1,14	0,20830	2,14	0,04041	3,14	0,00288
0,15	0,39447	1,15	0,20593	2,15	0,03955	3,15	0,00279
0,16	0,39386	1,16	0,20356	2,16	0,03871	3,16	0,00271
0,17	0,39321	1,17	0,20121	2,17	0,03788	3,17	0,00262
0,18	0,39252	1,18	0,19886	2,18	0,03706	3,18	0,00254
0,19	0,39179	1,19	0,19651	2,19	0,03626	3,19	0,00246
0,20	0,39103	1,20	0,19418	2,20	0,03547	3,20	0,00238
0,21	0,39023	1,21	0,19185	2,21	0,03470	3,21	0,00231
0,22	0,38939	1,22	0,18954	2,22	0,03394	3,22	0,00224
0,23	0,38852	1,23	0,18723	2,23	0,03319	3,23	0,00216
0,24	0,38760	1,24	0,18493	2,24	0,03246	3,24	0,00210
0,25	0,38666	1,25	0,18264	2,25	0,03174	3,25	0,00203
0,26	0,38567	1,26	0,18037	2,26	0,03103	3,26	0,00196
0,27	0,38465	1,27	0,17810	2,27	0,03034	3,27	0,00190
0,28	0,38359	1,28	0,17584	2,28	0,02965	3,28	0,00184
0,29	0,38250	1,29	0,17360	2,29	0,02898	3,29	0,00178
0,30	0,38138	1,30	0,17136	2,30	0,02833	3,30	0,00172
0,31	0,38021	1,31	0,16914	2,31	0,02768	3,31	0,00167
0,32	0,37902	1,32	0,16693	2,32	0,02705	3,32	0,00161
0,33	0,37779	1,33	0,16473	2,33	0,02643	3,33	0,00156
0,34	0,37652	1,34	0,16255	2,34	0,02582	3,34	0,00151
0,35	0,37523	1,35	0,16038	2,35	0,02522	3,35	0,00146
0,36	0,37390	1,36	0,15822	2,36	0,02463	3,36	0,00141
0,37	0,37254	1,37	0,15607	2,37	0,02405	3,37	0,00136
0,38	0,37114	1,38	0,15394	2,38	0,02349	3,38	0,00132
0,39	0,36972	1,39	0,15183	2,39	0,02294	3,39	0,00127
0,40	0,36826	1,40	0,14972	2,40	0,02239	3,40	0,00123
0,41	0,36677	1,41	0,14763	2,41	0,02186	3,41	0,00119
0,42	0,36525	1,42	0,14556	2,42	0,02134	3,42	0,00115
0,43	0,36370	1,43	0,14350	2,43	0,02083	3,43	0,00111

Продолжение табл. 2

t	$f(t)$	t	$f(t)$	t	$f(t)$	t	$f(t)$
0,44	0,36212	1,44	0,14146	2,44	0,02033	3,44	0,00107
0,45	0,36052	1,45	0,13943	2,45	0,01984	3,45	0,00104
0,46	0,35888	1,46	0,13741	2,46	0,01936	3,46	0,00100
0,47	0,35721	1,47	0,13541	2,47	0,01888	3,47	0,00097
0,48	0,35552	1,48	0,13343	2,48	0,01842	3,48	0,00094
0,49	0,35380	1,49	0,13146	2,49	0,01797	3,49	0,00090
0,50	0,35205	1,50	0,12951	2,50	0,01753	3,50	0,00087
0,51	0,35028	1,51	0,12758	2,51	0,01709	3,51	0,00084
0,52	0,34848	1,52	0,12566	2,52	0,01667	3,52	0,00081
0,53	0,34666	1,53	0,12376	2,53	0,01625	3,53	0,00079
0,54	0,34481	1,54	0,12187	2,54	0,01585	3,54	0,00076
0,55	0,34293	1,55	0,12001	2,55	0,01545	3,55	0,00073
0,56	0,34103	1,56	0,11815	2,56	0,01506	3,56	0,00071
0,57	0,33911	1,57	0,11632	2,57	0,01468	3,57	0,00068
0,58	0,33717	1,58	0,11450	2,58	0,01430	3,58	0,00066
0,59	0,33520	1,59	0,11270	2,59	0,01394	3,59	0,00063
0,60	0,33321	1,60	0,11092	2,60	0,01358	3,60	0,00061
0,61	0,33120	1,61	0,10915	2,61	0,01323	3,61	0,00059
0,62	0,32917	1,62	0,10740	2,62	0,01289	3,62	0,00057
0,63	0,32712	1,63	0,10567	2,63	0,01256	3,63	0,00055
0,64	0,32505	1,64	0,10396	2,64	0,01223	3,64	0,00053
0,65	0,32296	1,65	0,10226	2,65	0,01191	3,65	0,00051
0,66	0,32085	1,66	0,10058	2,66	0,01160	3,66	0,00049
0,67	0,31873	1,67	0,09892	2,67	0,01129	3,67	0,00047
0,68	0,31658	1,68	0,09728	2,68	0,01100	3,68	0,00046
0,69	0,31442	1,69	0,09565	2,69	0,01071	3,69	0,00044
0,70	0,31224	1,70	0,09405	2,70	0,01042	3,70	0,00042
0,71	0,31005	1,71	0,09246	2,71	0,01014	3,71	0,00041
0,72	0,30784	1,72	0,09088	2,72	0,00987	3,72	0,00039

t	$f(t)$	t	$f(t)$	t	$f(t)$	t	$f(t)$
0,73	0,30562	1,73	0,08933	2,73	0,00961	3,73	0,00038
0,74	0,30338	1,74	0,08779	2,74	0,00935	3,74	0,00037
0,75	0,30113	1,75	0,08627	2,75	0,00909	3,75	0,00035
0,76	0,29886	1,76	0,08477	2,76	0,00885	3,76	0,00034
0,77	0,29658	1,77	0,08329	2,77	0,00860	3,77	0,00033
0,78	0,29430	1,78	0,08183	2,78	0,00837	3,78	0,00031
0,79	0,29199	1,79	0,08038	2,79	0,00814	3,79	0,00030
0,80	0,28968	1,80	0,07895	2,80	0,00792	3,80	0,00029
0,81	0,28736	1,81	0,07754	2,81	0,00770	3,81	0,00028
0,82	0,28503	1,82	0,07614	2,82	0,00748	3,82	0,00027
0,83	0,28269	1,83	0,07476	2,83	0,00727	3,83	0,00026
0,84	0,28033	1,84	0,07340	2,84	0,00707	3,84	0,00025
0,85	0,27798	1,85	0,07206	2,85	0,00687	3,85	0,00024
0,86	0,27561	1,86	0,07074	2,86	0,00668	3,86	0,00023
0,87	0,27324	1,87	0,06943	2,87	0,00649	3,87	0,00022
0,88	0,27086	1,88	0,06814	2,88	0,00631	3,88	0,00021
0,89	0,26847	1,89	0,06687	2,89	0,00613	3,89	0,00021
0,90	0,26608	1,90	0,06561	2,90	0,00595	3,90	0,00020
0,91	0,26368	1,91	0,06438	2,91	0,00578	3,91	0,00019
0,92	0,26128	1,92	0,06315	2,92	0,00562	3,92	0,00018
0,93	0,25887	1,93	0,06195	2,93	0,00545	3,93	0,00018
0,94	0,25646	1,94	0,06076	2,94	0,00530	3,94	0,00017
0,95	0,25405	1,95	0,05959	2,95	0,00514	3,95	0,00016
0,96	0,25164	1,96	0,05844	2,96	0,00499	3,96	0,00016
0,97	0,24922	1,97	0,05730	2,97	0,00485	3,97	0,00015
0,98	0,24680	1,98	0,05618	2,98	0,00470	3,98	0,00014
0,99	0,24438	1,99	0,05508	2,99	0,00457	3,99	0,00014
1,00	0,24196	2,00	0,05399	3,00	0,00443	4,00	0,00013

Таблица 3

Значения коэффициентов V , K_V и b распределения Вейбулла

V	K_V	b	V	K_V	b
2,24	2,00	0,5	0,605	0,892	1,7
1,74	1,50	0,6	0,575	0,889	1,8
1,46	1,27	0,7	0,547	0,887	1,9
1,26	1,13	0,8	0,523	0,886	2,0
1,11	1,05	0,9	0,498	0,886	2,1
1,00	1,00	1,0	0,480	0,886	2,2
0,910	0,965	1,1	0,461	0,886	2,3
0,837	0,941	1,2	0,444	0,887	2,4
0,775	0,924	1,3	0,428	0,887	2,5
0,723	0,911	1,4	0,365	0,893	3,0
0,678	0,903	1,5	0,315	0,900	3,5
0,640	0,897	1,6	0,281	0,906	4,0

Таблица 4

Плотность распределения Вейбулла
в зависимости от параметра формы и соотношения L/a ,
умноженная на параметр a

L/a	Параметр формы						
	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4
0,1	0,6714	1,0695	1,1724	1,0821	0,9048	0,7109	0,5356
0,2	0,3511	0,6213	0,7805	0,8376	0,8187	0,7524	0,6621
0,3	0,4441	0,2388	0,5976	0,6949	0,7408	0,7451	0,7186
0,4	0,1811	0,3466	0,4861	0,5943	0,6703	0,7161	0,7354
0,5	0,1458	0,2841	0,4093	0,5174	0,6065	0,6760	0,7264
0,6	0,1220	0,2405	0,3526	0,4559	0,5488	0,6303	0,6998
0,7	0,1048	0,2082	0,3087	0,4051	0,4966	0,5823-	0,6616
0,8	0,0919	0,1832	0,2736	0,3624	0,4493	0,5340	0,6160
0,9	0,0817	0,1634	0,2448	0,3259	0,4066	0,4868	0,5664
1,0	0,0736	0,1472	0,2207	0,2943	0,3679	0,4415	0,5150
1,1	0,0669	0,1337	0,2003	0,2668	0,3329	0,3986	0,4639
1,2	0,0613	0,1223	0,1828	0,2425	0,3012	0,3585	0,4142
1,3	0,0565	0,1125	0,1676	0,2211	0,2725	0,3213	0,3670

L/a	Параметр формы						
	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4
1,4	0,0524	0,1041	0,1543	0,2020	0,2466	0,2871	0,3228
1,5	0,2231	0,0489	0,0967	0,1425	0,1850	0,2558	0,2821
1,6	0,0458	0,0903	0,1320	0,1697	0,2019	0,2273	0,2450
1,7	0,4300	0,0845	0,1227	0,1560	0,1827	0,2015	0,2116
1,8	0,0406	0,0793	0,1143	0,1436	0,1653	0,1782	0,1817
1,9	0,0384	0,0747	0,1067	0,1323	0,1496	0,1573	0,1552
2,0	0,0364	0,0705	0,0999	0,1221	0,1353	0,1386	0,1320
2,1	0,0346	0,0667	0,0936	0,1128	0,1225	0,1218	0,1117
2,2	0,0330	0,0633	0,0879	0,1044	0,1108	0,1069	0,0941
2,3	0,0315	0,0601	0,0827	0,0966	0,1003	0,0937	0,0789
2,4	0,0302	0,0572	0,0779	0,0896	0,0907	0,0819	0,0659
2,5	0,0289	0,0545	0,0735	0,0831	0,0821	0,0716	0,0548
0,1	0,3919	0,2808	0,1980	0,1379	0,0952	0,0651	0,0443
0,2	0,5645	0,4700	0,3843	0,3098	0,2469	0,1950	0,1528
0,3	0,6716	0,6127	0,5484	0,4833	0,4208	0,3626	0,3098
0,4	0,7330	0,7136	0,6817	0,6413	0,5956	0,5472	0,4983
0,5	0,7590	0,7758	0,7788	0,7703	0,7525	0,7273	0,6965
0,6	0,7572	0,8028	0,8372	0,8611	0,8753	0,8809	0,8789
0,7	0,7341	0,7995	0,8577	0,9086	0,9524	0,9893	1,0194
0,8	0,6951	0,7711	0,8437	0,9127	0,9780	1,0394	1,0970
0,9	0,6453	0,7234	0,8007	0,8771	0,9526	1,0269	1,1001
1,0	0,5886	0,6622	0,7358	0,8093	0,8829	0,9565	1,0301
1,1	0,5286	0,5927	0,6560	0,7186	0,7803	0,8410	0,9006
1,2	0,4680	0,5195	0,5686	0,6149	0,6582	0,6982	0,7347
1,3	0,4089	0,4467	0,4798	0,5078	0,5303	0,5473	0,5583
1,4	0,3530	0,3770	0,3944	0,4049	0,4083	0,4047	0,3945
1,5	0,3012	0,3127	0,3162	0,3119	0,3003	0,2821	0,2586
1,6	0,2543	0,2550	0,2474	0,2323	0,2110	0,1852	0,1568
1,7	0,2125	0,2046	0,1890	0,1672	0,1416	0,1143	0,0877
1,8	0,1758	0,1616	0,1410	0,1164	0,0907	0,0663	0,0452

<i>L/a</i>	Параметр формы						
	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4
1,9	0,1441	0,1257	0,1028	0,0784	0,0554	0,0360	0,0213
2,0	0,1170	0,0963	0,0733	0,0511	0,0323	0,0183	0,0092
2,1	0,0942	0,0728	0,0511	0,0322	0,0180	0,0087	0,0036
2,2	0,0752	0,0542	0,0348	0,0196	0,0095	0,0039	0,0013
2,3	0,0595	0,0398	0,0232	0,0116	0,0048	0,0016	0,0004
2,4	0,0467	0,0288	0,0151	0,0066	0,0023	0,0006	0,0001
2,5	0,0364	0,0206	0,0097	0,0036	0,0011	0,0002	0,0000
0,1	0,0300	0,0202	0,0135	0,0090	0,0060	0,0040	0,0026
0,2	0,1190	0,0922	0,0711	0,0547	0,0419	0,0319	0,0243
0,3	0,2628	0,2216	0,1859	0,1553	0,1292	0,1071	0,0886
0,4	0,4502	0,4041	0,3607	0,3203	0,2833	0,2495	0,2191
0,5	0,6619	0,6246	0,5860	0,5468	0,5078	0,4697	0,4328
0,6	0,8702	0,8558	0,8367	0,8137	0,7875	0,7590	0,7286
0,7	1,0432	1,0609	1,0729	1,0797	1,0816	1,0791	1,0727
0,8	1,1506	1,2003	1,2460	1,2878	1,3257	1,3597	1,3900
0,9	1,1722	1,2430	1,3126	1,3808	1,4476	1,5130	1,5770
1,0	1,1036	1,1772	1,2508	1,3244	1,3979	1,4715	1,5451
1,1	0,9591	1,0164	1,0723	1,1268	1,1799	1,2314	1,2812
1,2	0,7674	0,7962	0,8209	0,8413	0,8574	0,8691	0,8763
1,3	0,5635	0,5627	0,5562	0,5442	0,5270	0,5052	0,4794
1,4	0,3782	0,3564	0,3302	0,3006	0,2686	0,2355	0,2025
1,5	0,2310	0,2009	0,1699	0,1395	0,1110	0,0855	0,0634
1,6	0,1278	0,1000	0,0749	0,0535	0,0363	0,0233	0,0141
1,7	0,0637	0,0436	0,0279	0,0167	0,0092	0,0046	0,0021
1,8	0,0285	0,0165	0,0087	0,0041	0,0017	0,0006	0,0002
1,9	0,0114	0,0054	0,0022	0,0008	0,0002	0,0001	0,0000
2,0	0,0040	0,0015	0,0005	0,0001	0,0000	0,0000	0,0000
2,1	0,0013	0,0004	0,0001	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
2,2	0,0003	0,0001	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
2,3	0,0001	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000

Квантили функции распределения Стьюдента

Число наблюдений	Доверительная вероятность		
	0,9	0,95	0,99
4	2,132	2,776	4,604
5	2,015	2,571	4,032
6	1,943	2,447	3,707
7	1,895	2,365	3,499
8	1,860	2,306	3,355
9	1,833	2,262	3,250
10	1,812	2,228	3,169
11	1,796	2,201	3,106
12	1,782	2,179	3,055
13	1,771	2,160	3,012
14	1,761	2,145	2,977
15	1,753	2,131	2,947
16	1,746	2,120	2,921
17	1,734	2,103	2,878
20	1,725	2,086	2,845
25	1,708	2,060	2,787
30	1,697	2,042	2,750
35	1,689	2,030	2,724
40	1,684	2,021	2,074
45	1,679	2,014	2,689
50	1,676	2,008	2,677
60	1,671	2,000	2,660
70	1,667	1,995	2,648
80	1,664	1,990	2,639
90	1,662	1,987	2,632
100	1,660	1,984	2,626

Значения коэффициентов r_1 , r_2 , r_3

Число наблюдений	r_1	r_3	r_2
1	9,50	0,26	0,43
2	3,77	0,38	0,51
3	2,73	0,45	0,57
4	2,29	0,50	0,60
5	2,05	0,54	0,62
6	1,90	0,57	0,65
8	1,72	0,62	0,68
10	1,61	0,65	0,70
15	1,46	0,70	0,74
20	1,37	0,74	0,77
25	1,33	0,76	0,79
30	1,29	0,78	0,80
40	1,24	0,81	0,83
50	1,21	0,83	0,84
60	1,19	0,84	0,86
80	1,16	0,86	0,87
100	1,14	0,88	0,88
150	1,12	0,90	0,90
200	1,10	0,91	0,92
300	1,08	0,93	0,93
400	1,07	0,94	0,94

**Значения интегральной функции интенсивности замен,
функции распределения и квантилей функции
нормального распределения**

$W(L)$	$F(L)$	U	$W(L)$	$F(L)$	U	$W(L)$	$F(L)$	U
1	2	3	4	5	6	7	8	9
0,01	0,00995	-2,326	0,53	0,41140	-0,225	1,25	0,71350	0,565
0,02	0,01980	-2,054	0,54	0,41725	-0,210	1,30	0,72747	0,607
0,03	0,02955	-1,896	0,55	0,42305	-0,194	1,35	0,74076	0,643
0,04	0,03921	-1,762	0,56	0,42879	-0,182	1,40	0,75340	0,687
0,05	0,04877	-1,665	0,57	0,43447	-0,164	1,45	0,76543	0,726
0,06	0,05824	-1,572	0,58	0,44010	-0,151	1,50	0,77687	0,762
0,07	0,06761	-1,499	0,59	0,44567	-0,136	1,55	0,78775	0,800
0,08	0,07688	-1,426	0,60	0,45119	-0,123	1,60	0,79810	0,834
0,09	0,08607	-1,366	0,61	0,45665	-0,108	1,65	0,80795	0,871
0,10	0,09516	-1,311	0,62	0,46206	-0,095	1,70	0,81732	0,908
0,11	0,10417	-1,259	0,63	0,46741	-0,083	1,75	0,82623	0,938
0,12	0,11308	-1,211	0,64	0,47271	-0,070	1,80	0,83470	0,974
0,13	0,12190	-1,165	0,65	0,47795	-0,055	1,85	0,84276	1,007
0,14	0,13064	-1,122	0,66	0,48315	-0,043	1,90	0,85043	1,036
0,15	0,13929	-1,085	0,67	0,48829	-0,030	1,95	0,85773	1,071
0,16	0,14786	-1,045	0,68	0,49338	-0,018	2,00	0,86466	1,103
0,17	0,15634	-1,011	0,69	0,49842	-0,005	2,05	0,87127	1,136
0,18	0,16473	-0,974	0,70	0,50341	-0,001	2,10	0,87754	1,165
0,19	0,17304	-0,942	0,71	0,50836	0,020	2,15	0,88352	1,195
0,20	0,18127	-0,912	0,72	0,51325	0,033	2,20	0,88920	1,221
0,21	0,18942	-0,882	0,73	0,51809	0,045	2,25	0,89460	1,254
0,22	0,19748	-0,852	0,74	0,52289	0,058	2,30	0,89974	1,282
0,23	0,20547	-0,824	0,75	0,52763	0,068	2,35	0,90463	1,311
0,24	0,21337	-0,796	0,76	0,53233	0,080	2,40	0,90928	1,335
0,25	0,22120	-0,769	0,77	0,53699	0,093	2,45	0,91371	1,366

<i>W(L)</i>	<i>F(L)</i>	<i>U</i>	<i>W(L)</i>	<i>F(L)</i>	<i>U</i>	<i>W(L)</i>	<i>F(L)</i>	<i>U</i>
1	2	3	4	5	6	7	8	9
0,26	0,22895	-0,745	0,78	0,54159	0,106	2,50	0,91791	1,392
0,27	0,23662	-0,719	0,79	0,54616	0,116	2,55	0,92192	1,419
0,28	0,24422	-0,694	0,80	0,55067	0,128	2,60	0,92573	1,447
0,29	0,25174	-0,671	0,81	0,55514	0,138	2,65	0,92935	1,468
0,30	0,25918	-0,646	0,82	0,55957	0,148	2,70	0,93279	1,499
0,31	0,26655	-0,625	0,83	0,56395	0,161	2,75	0,93607	1,522
0,32	0,27385	-0,604	0,84	0,56829	0,171	2,80	0,93919	1,546
0,33	0,28108	-0,580	0,84	0,57259	0,184	2,85	0,94216	1,580
0,34	0,28823	-0,559	0,86	0,57684	0,192	2,90	0,94498	1,598
0,35	0,29531	-0,539	0,87	0,58105	0,204	2,95	0,94766	1,616
0,36	0,30232	-0,519	0,88	0,58522	0,215	3,00	0,95021	1,655
0,37	0,30927	-0,499	0,89	0,58934	0,225	3,10	0,95495	1,695
0,38	0,31614	-0,479	0,90	0,59343	0,235	3,20	0,95924	1,728
0,39	0,32294	-0,462	0,91	0,59748	0,246	3,30	0,96312	1,799
0,40	0,32968	-0,443	0,92	0,60148	0,256	3,40	0,96663	1,838
0,41	0,33635	-0,423	0,93	0,60545	0,266	3,50	0,96980	1,881
0,42	0,34295	-0,404	0,94	0,60937	0,277	3,60	0,97268	1,927
0,43	0,34949	-0,388	0,95	0,61326	0,287	3,70	0,97528	1,977
0,44	0,35596	-0,372	0,96	0,61711	0,295	3,80	0,97763	2,014
0,45	0,36237	-0,353	0,97	0,62092	0,308	3,90	0,97976	2,054
0,46	0,36872	-0,337	0,98	0,62469	0,319	4,00	0,98168	2,097
0,47	0,37500	-0,319	0,99	0,62842	0,327	4,10	0,98343	2,144
0,48	0,38122	-0,303	1,00	0,63212	0,337	4,20	0,98500	2,197
0,49	0,38737	-0,287	1,05	0,65006	0,385	4,30	0,98643	2,226
0,50	0,39347	-0,272	1,10	0,66713	0,440	4,40	0,98772	2,257
0,51	0,39950	-0,256	1,15	0,68336	0,479	4,50	0,98889	2,290
0,52	0,40548	-0,240	1,20	0,69881	0,524	4,60	0,98995	2,326

Квантили функции распределения Вейбулла

b	γ						
	0,80	0,90	0,93	0,95	0,97	0,99	0,995
1	2	3	4	5	6	7	8
0,9	0,1890	0,0821	0,0542	0,0369	0,0207	0,0060	0,0028
1,0	0,2230	0,1050	0,0726	0,0513	0,0305	0,0100	0,0058
1,1	0,2560	0,1290	0,0921	0,0672	0,0418	0,0153	0,0081
1,2	0,2870	0,1530	0,1120	0,0842	0,0545	0,0216	0,0121
1,3	0,3150	0,1770	0,1330	0,1020	0,0682	0,0290	0,0170
1,4	0,3430	0,2000	0,1540	0,1200	0,0826	0,0374	0,0228
1,5	0,3680	0,2230	0,1740	0,1380	0,0975	0,0465	0,0293
1,6	0,3920	0,2450	0,1940	0,1560	0,1130	0,0564	0,0365
1,7	0,4140	0,2660	0,2140	0,1740	0,1280	0,0668	0,0444
1,8	0,4350	0,2860	0,2330	0,1920	0,1440	0,0776	0,0528
1,9	0,4540	0,3060	0,2510	0,2090	0,1590	0,0888	0,0618
2,0	0,4720	0,3250	0,2690	0,2260	0,1750	0,1000	0,0708
2,5	0,5490	0,4070	0,3500	0,3050	0,2470	0,1590	0,1200
3,0	0,6070	0,4720	0,4170	0,3820	0,3120	0,2160	0,1710
3,5	0,6510	0,5260	0,4730	0,4280	0,3690	0,2690	0,2200
4,0	0,6870	0,5700	0,5190	0,4760	0,4180	0,3170	0,2660

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. *Андреев, В. Н.* Надежность машин и оборудования : учеб. пособие / В. Н. Андреев. — Л. : ЛТА, 1988.
2. *Амалицкий, В. В.* Надежность машин и оборудования лесного комплекса : учеб. для студентов / В. В. Амалицкий, В. Г. Бондарь, А. М. Волобаев [и др.]. — М. : МГУЛ, 2002. — 279 с. : ил.
3. Вероятностно-статистические методы механики разрушения и теории катастроф в инженерном проектировании / А. В. Питухин. Петрозаводск : Изд-во ПетрГУ, 1998. — 304 с.
4. ГОСТ 27.001-95. Система стандартов. Надежность в технике. Основные положения. — М. : Госстандарт, 1997.
5. ГОСТ 27.301-95. Надежность в технике. Расчет надежности. Основные положения. — М. : Госстандарт, 1997.
6. ГОСТ 27.310-95. Надежность в технике. Анализ видов, последствий и критичности отказов. М. : Госстандарт, 1997.
7. ГОСТ 27.402-95. Надежность в технике. Планы испытаний для контроля средней наработки до отказа (на отказ). — М. : Госстандарт, 1978.
8. ГОСТ 27.502-83 (СТ СЭВ 3944-82). Надежность в технике. Система сбора и обработки информации. Планирование наблюдений. Введ. 01.07.84. М. : Изд-во стандартов, 1984.

9. ГОСТ 28.002-89. Надежность в технике. Основные понятия, термины, определения. — М. : Госстандарт, 1990.
10. Елизаветин, М. А. Повышение надежности машин / М. А. Елизаветин. — М. : Машиностроение, 1973.
11. Ермолов, Л. С. Основы надежности сельскохозяйственной техники / Л. С. Ермолов, В. М. Кряжков, В. Е. Черкун. — М. : Колос, 1982.
12. Ермолов, Л. С. Повышение надежности сельскохозяйственной техники / Л. С. Ермолов. — М. : Колос, 1979.
13. Капур, К. Надежность и проектирование систем : пер. с англ. / К. Капур, Л. Ламберсон. — М. : Мир, 1980. — 608 с.
14. Методические указания для определения показателей долговечности изделий по результатам незавершенных испытаний или наблюдений. — М. : ОНТИ-НАТИ, 1980.
15. Методические указания определения причин возникновения отказов деталей лесозаготовительных машин / Минлесбумпром СССР. Утв. 15.04.86. — Химки, 1986. — 124 с.
16. Надежность машин : метод. указания по расчету надежности на стадии проект. машин и оборуд. / А. В. Питухин, В. Н. Шиловский. — Петрозаводск : Изд-во ПетрГУ, 1994. — 40 с.
17. Обоснование номенклатуры запасных частей для машин и оборудования : метод. указания по курсу «Надежность машин и оборудования» / В. Н. Шиловский. — Петрозаводск : Изд-во ПетрГУ, 1999. — 28 с.
18. Питухин, А. В. Расчет на ЭВМ показателей долговечности лесных машин по результатам их незавершенных испытаний / А. В. Питухин, В. Н. Шиловский, Н. И. Серебрянский // Тр. лесоинженерного факультета ПетрГУ. — Петрозаводск : Изд-во ПетрГУ, 1997. — Вып. 1. — С. 70–71.
19. Применение вероятностно-статистических методов для решения задач по надежности и ремонту машин и оборудования : учеб. пособие / А. В. Питухин, В. Н. Шиловский, Н. И. Серебрянский. — Петрозаводск : Изд-во ПетрГУ, 1999. — 148 с.

20. Половко, А. М. Основы теории надежности: практикум : Учеб. пособие для студентов вузов / А. М. Половко, С. В. Гуров. — СПб. : БХВ-Петербург, 2006. — 559 с.
21. Половко, А. М. Основы теории надежности : Учеб. пособие / А. М. Половко, С. В. Гуров. — Изд. 2-е, перераб. и доп. — СПб. : БХВ-Петербург, 2006. — 702 с.
22. Проников, А. С. Надежность машин / А. С. Пронников. — М. : Машиностроение, 1978.
23. Решетов, Д. Н. Надежность машин / Д. Н. Решетов, А. С. Иванов, В. З. Фадеев. — М. : Высшая школа, 1988. — 238 с.
24. РТМ 37.001.006-74. Обработка результатов незавершенных испытаний на долговечность изделий автомобилестроения / Мин-во автомоб. пром-сти, НАМИ. — М., 1976.— 40 с.
25. Сбор и обработка информации о надежности лесных машин : учеб. пособие / А. В. Питухин, В. Н. Шиловский, Н. И. Себрянский. — Петрозаводск : Изд-во ПетрГУ, 1995. — 84 с.
26. Сквородин, В. Я. Справочная книга по надежности сельскохозяйственной техники / В. Я. Сквородин, Л. В. Тишкян. — Л. : Лениздат, 1985. — 203 с.
27. Шиловский, В. Н. Надежность машин и оборудования : учеб. пособие / В. Н. Шиловский, А. В. Питухин. — Петрозаводск : ПетрГУ, 2004. — 128 с.
28. Шиловский, В. Н. Теоретические основы и стратегии организации маркетинга и менеджмента технического сервиса территориально распределенных машин и оборудования : монография / В. Н. Шиловский. — Петрозаводск : ПетрГУ, 2001. — 324 с.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	5
1. Основные понятия и термины.	
Свойства и показатели надежности	6
1.1. Общие понятия	6
1.2. Состояние объекта	7
1.3. Дефекты, повреждения, отказы	8
1.4. Временные понятия	9
1.5. Техническое обслуживание, ремонт	10
1.6. Показатели надежности	11
1.6.1. Единичные показатели надежности	11
1.6.2. Комплексные показатели надежности	17
2. Физические основы надежности.	
Причины возникновения отказов	19
2.1. Объективные и субъективные причины отказов	19
2.2. Природа внешнего трения твердых тел	23
2.3. Виды и закономерности изнашивания деталей машин	26
2.4. Основные направления формирования износостойких структур деталей машин	34
2.5. Разрушение при действии однократной нагрузки	35
2.6. Усталостное разрушение	36
2.7. Коррозионное разрушение	39
2.7.1. Классификация коррозии	40
2.7.2. Показатели коррозионных повреждений	41
2.7.3. Показатели коррозии и коррозионной стойкости	43
2.8. Другие виды разрушения	44
2.9. Критерии предельного состояния деталей, сопряжений, сборочных единиц	47

3. Математические методы определения показателей надежности	55
3.1. Общие положения	55
3.2. Характеристики распределения случайных величин	60
3.3. Основные цели и задачи сбора и обработки информации о надежности объектов	65
3.4. Законы распределения случайных величин	68
3.5. Критерии согласия	77
3.6. Примеры определения показателей надежности объектов	79
3.7. Применение распределения экстремальных значений для оценки показателей надежности	87
3.8. Оценка вероятности безотказной работы при действии однократной нагрузки	90
4. Испытания на надежность	93
4.1. Методы испытаний и контроля надежности.	
Планы испытаний	93
4.2. Контрольные испытания объектов на надежность	98
4.3. Ускоренные испытания объектов на надежность	108
4.4. Выбор режимов ускоренных испытаний лесозаготовительных машин	113
4.4.1. Подготовка и условия проведения испытаний	113
4.4.2. Объем испытаний	115
4.4.3. Регистрация процессов нагружения и применяемая аппаратура	116
4.4.4. Обработка результатов эксперимента и применяемая аппаратура	117
4.4.5. Определение нагрузочных режимов лесозаготовительных машин	119
4.4.6. Использование результатов режимометрических испытаний	123
4.5. Исследование безотказности деталей лесозаготовительных машин при эксплуатации	126
4.5.1. Условия эксплуатации и методика обработки результатов	126
4.5.2. Балансиры	130
4.5.3. Пружины подвески	132
4.5.4. Ведомое зубчатое колесо бортовой передачи	133
5. Повышение надежности машин и оборудования	137
5.1. Мероприятия по повышению надежности	137
5.2. Комплексная система управления качеством ремонта	143

5.3. Технико-экономическая эффективность		
повышения надежности машин		147
5.4. Цели и задачи исследования надежности		
машин на объектах их технического сервиса		148
5.5. Организация исследований по определению		
причин отказов элементов машин		150
5.5.1. Обследование условий		
эксплуатации машин		152
5.5.2. Объект исследований		154
5.5.3. Порядок проведения		
технической экспертизы отказов		154
5.5.4. Определение величины износа		
измерительными средствами		157
5.5.5. Применение фрактографии при анализе		
причин и характера разрушений		160
5.5.6. Исследование изломов		166
5.5.7. Оценка кристалличности изломов		170
5.5.8. Некоторые термины, применяемые		
для описания изломов		175
5.5.9. Особенности усталостных изломов		177
5.5.10. Количественные методы оценки		
кристалличности изломов		178
5.5.11. Общая схема фрактографического		
исследования		179
5.5.12. Организация исследований причин отказов . . .		180
5.6. Резервирование надежности		186
6. Оценка показателей надежности техники		
на этапах создания и производства		193
6.1. Расчет показателей надежности машин		
и оборудования на стадии технического задания . . .		193
6.2. Расчет показателей надежности машин		
и оборудования на стадии технического проекта . . .		201
6.3. Пример расчета показателей (норм) надежности . . .		203
6.3.1. Стадия технического задания		203
6.3.2. Стадия технического проекта		208
6.3.3. Расчет показателей, характеризующих		
техническое обслуживание транспортера		213
6.4. Определение показателей долговечности		
по результатам завершенных испытаний		216
6.4.1. Исходные данные и постановка задачи		216
6.4.2. Расчет числовых характеристик		
интервального вариационного ряда		217
6.4.3. Статистическая оценка гипотез		
о принадлежности опытных наработок		
к вероятностным законам распределения		221

6.4.4. Определение границ интервального разброса средней наработки	227
6.4.5. Определение точечных оценок гамма-процентного ресурса коробки передач	229
6.4.6. Результаты применения методики по расчету ресурсных показателей для импортной техники	230
6.5. Определение показателей надежности по результатам незавершенных испытаний	231
6.5.1. Исходные данные и постановка задачи	231
6.5.2. Определение параметров, имеющих линейную зависимость	234
6.5.3. Расчет опытной функции распределения наработки	237
6.5.4. Расчет опытной функции интенсивности замен	238
6.5.5. Уравнение однофакторной линейной регрессии по данным распределения	239
6.5.6. Точечные оценки параметров распределений и показателей долговечности	247
6.5.7. Определение границ интервала разброса ресурса	250
6.5.8. Определение точечных оценок гамма-процентного ресурса	252
6.5.9. Выводы	253
6.6. Планирование эксперимента при исследовании долговечности узлов машин	254
6.6.1. Постановка задачи и определение функции отклика	254
6.6.2. Планирование эксперимента	255
6.6.3. Проверка однородности дисперсий	258
6.6.4. Расчет дисперсии воспроизводимости	259
Приложение	261
Список использованных источников	274

*Александр Васильевич ПИТУХИН
Вениамин Николаевич ШИЛОВСКИЙ
Вадим Михайлович КОСТЮКЕВИЧ*

**НАДЕЖНОСТЬ
ЛЕСОЗАГОТОВИТЕЛЬНЫХ
МАШИН И ОБОРУДОВАНИЯ**

Учебное пособие

Зав. редакцией лесохозяйственной
и лесоинженерной литературы *А. Е. Майорова*
Художественный редактор *С. Ю. Малахов*
Редактор *О. А. Шаповалова*
Технический редактор *Е. С. Жукович*
Корректоры *Т. А. Кошелева, А. М. Плетнева*
Подготовка иллюстраций *Е. М. Николаева*
Выпускающие *Е. А. Антипова, О. В. Шилкова*

ЛР № 065466 от 21.10.97
Гигиенический сертификат 78.01.07.953.П.004173.04.07
от 26.04.2007 г., выдан ЦГСЭН в СПб

Издательство «ЛАНЬ»
lan@lpbl.spb.ru; www.lanbook.com
192029, Санкт-Петербург, Общественный пер., 5.
Тел./факс: (812)412-29-35, 412-05-97, 412-92-72.
Бесплатный звонок по России: 8-800-700-40-71

Подписано в печать 20.02.10.
Бумага офсетная. Гарнитура Школьная. Формат 84×108^{1/32}.
Печать офсетная. Усл. печ. л. 15,12. Тираж 1000 экз.

Заказ № 616

Отпечатано в полном соответствии
с качеством предоставленных диапозитивов
в ОАО «Издательско-полиграфическое предприятие «Правда Севера».
163002, г. Архангельск, пр. Новгородский, 32.
Тел./факс (8182) 64-14-54, тел.: (8182) 65-37-65, 65-38-78, 20-50-52
www.ippps.ru, e-mail: zakaz@ippps.ru

ГДЕ КУПИТЬ

ДЛЯ ОРГАНИЗАЦИЙ:

Для того, чтобы заказать необходимые Вам книги, достаточно обратиться в любую из торговых компаний Издательского Дома «ЛАНЬ»:

по России и зарубежью

«ЛАНЬ-ТРЕЙД»

192029, Санкт-Петербург, ул. Крупской, 13

тел.: (812) 412-85-78, 412-14-45, 412-85-82

тел./факс: (812) 412-54-93

е-mail: trade@lanpbl.spb.ru

ICQ: 446-869-967

www.lanpbl.spb.ru/price.htm

в Москве и в Московской области

«ЛАНЬ-ПРЕСС»

109263, Москва, 7-ая ул. Текстильщиков, д. 6/19

тел.: (499) 178-65-85

е-mail: lanpress@ultimanet.ru

в Краснодаре и в Краснодарском крае

«ЛАНЬ-ЮГ»

350072, Краснодар, ул. Жлобы, д. 1/1

тел.: (861) 274-10-35

е-mail: lankrd98@mail.ru

ДЛЯ РОЗНИЧНЫХ ПОКУПАТЕЛЕЙ:

интернет-магазины:

«Сова»: <http://www.symplex.ru>

«Ozon.ru»: <http://www.ozon.ru>

«Библион»: <http://www.biblion.ru>

также Вы можете отправить заявку

на покупку книги по адресу:

192029, Санкт-Петербург, ул. Крупской, 13

**Издательство
«ЛАНЬ» ЛАНЬ®**



предлагает
учебную литературу
для высшей школы
по направлениям

**ВЕТЕРИНАРИЯ, ЗООТЕХНИЯ,
СЕЛЬСКОЕ, ЛЕСНОЕ ХОЗЯЙСТВО
И ЛЕСОИНЖЕНЕРНОЕ ДЕЛО.**

Большинство наших книг
рекомендовано Министерством
сельского хозяйства РФ,
Министерством образования и науки РФ
и соответствующими
учебно-методическими
объединениями.

Наши адреса и телефоны:

РФ, 192029, Санкт-Петербург, Общественный пер., 5
(812) 412-29-35, 412-05-97, 412-92-72, 336-25-09

www.lanbook.com

**Издательство
«ЛАНЬ»** 

Мы будем благодарны Вам
за пожелания по издаваемой нами литературе,
а также за предложения по изданию книг
новых авторов или переизданию
уже существующих трудов.

Рукописи не рецензируются и не возвращаются.

Мы заинтересованы в сотрудничестве
с высшими учебными заведениями
и открыты для Ваших предложений
по улучшению нашего взаимодействия.

Теперь вы можете звонить нам бесплатно
из любых городов России по телефону

8-800-700-40-71

Дополнительную информацию
и ответы на вопросы Вы также можете получить,
обратившись по электронной почте:

mae@lpbl.spb.ru

**Издательство
«ЛАНЬ» ЛАНЬ®**



**ПРЕДСТАВЛЯЕМ
НОВЫЕ УЧЕБНИКИ И УЧЕБНЫЕ ПОСОБИЯ**

Г. М. АНИСИМОВ, А. М. КОЧНЕВ

ЛЕСОТРАНСПОРТНЫЕ МАШИНЫ

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ

Приведены основы теории двигателя и движения лесотранспортных машин, их конструктивные особенности и технические решения, применяемые в узлах, механизмах, агрегатах и системах. Описаны методы повышения топливной экономичности и снижения токсичности отработанных газов двигателя. Рассмотрены свойства перспективных и альтернативных видов топлива, включая отходы лесозаготовительного производства для двигателей лесотранспортных машин. Даны основы теории и расчета газогенераторных установок транспортного типа и пути повышения эффективности работы газогенераторных двигателей.

Пособие предназначено для студентов лесоинженерного и лесомеханического факультетов, бакалавров различных направлений, инженеров лесозаготовительной промышленности и лесного хозяйства.

**Издательство
«ЛАНЬ» ЛАНЬ®**



**ПРЕДСТАВЛЯЕМ
НОВЫЕ УЧЕБНИКИ И УЧЕБНЫЕ ПОСОБИЯ**

Г. М. АНИСИМОВ, А. М. КОЧНЕВ

**ОСНОВЫ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
ЛЕСНЫХ МАШИН**

УЧЕБНИК

В учебнике освещены вопросы моделирования рабочих процессов и обслуживания лесных машин. Рассмотрены основные принципы приведения и составления расчетных схем эквивалентных динамической системе. В большом объеме приведены математические модели динамики лесных машин и системы «лесная машина—предмет труда» и результаты их исследования, а также некоторых показателей производственной и технической эксплуатации лесных машин.

Предназначен для студентов лесомеханического и лесоинженерного факультетов, научных работников, инженеров лесозаготовительной промышленности и лесного хозяйства.



ПРЕДСТАВЛЯЕМ
НОВЫЕ УЧЕБНИКИ И УЧЕБНЫЕ ПОСОБИЯ

А. Н. ДОРОХОВ, А. Н. МИРОНОВ,
В. С. СОЛДАТЕНКО, О. Л. ШЕСТОПАЛОВА

**ОБЕСПЕЧЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ СИСТЕМ
УПРАВЛЕНИЯ ОБЪЕКТАМИ**

УЧЕБНИК

Рассматриваются комплексные характеристики технических систем, используемые на различных этапах их жизненного цикла. Показываются подходы к определению и оценке технического состояния, приводятся некоторые методы его контроля, диагностирования и прогнозирования, получения информации о техническом состоянии и испытаниях систем. Рассматриваются вопросы обеспечения надежности технических систем на этапе эксплуатации.

Предназначен для студентов, обучающихся по специальности «Приборы и системы лучевой энергетики». Будет полезен специалистам, аспирантам и научным работникам в области надежности сложных технических систем.

**Издательство
«ЛАНЬ» ЛАНЬ®**



**ПРЕДСТАВЛЯЕМ
НОВЫЕ УЧЕБНИКИ И УЧЕБНЫЕ ПОСОБИЯ**

Н. И. ПРОКОПЕНКО

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ**

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ

В пособии отражены вопросы теории ДВС, организации и проведения измерительного эксперимента и обработка экспериментальных данных. Раскрываются принципы измерения физических величин. Даны описания стендов для испытания двигателей внутреннего сгорания и применяемой измерительной техники. Подробно рассмотрены вопросы испытания современных транспортных газотурбинных двигателей, применяемых в специальной военной и гражданской технике, и их характеристики. Приведены некоторые направления совершенствования быстроходных транспортных ДВС и показано их влияние на тяговые свойства гусеничных машин.

Учебное пособие предназначено для студентов вузов, изучающих курсы «Теория двигателей», «Конструкция силовых установок многоцелевых гусеничных и колесных машин» и «Испытания многоцелевых гусеничных и колесных машин», и может использоваться преподавателями и аспирантами вузов, а также сотрудниками соответствующих конструкторских бюро в качестве справочного пособия.



Питухин Александр Васильевич (1948, Архангельская область). Закончил Ленинградский политехнический институт (1972). Доктор технических наук (1992), профессор. Место работы: ПетрГУ, заведующий кафедрой технологии металлов и ремонта, декан лесоинженерного факультета. Действительный член Российской академии естественных наук, заслуженный работник высшей школы РФ, почетный работник высшего профессионального образования, заслуженный деятель науки Республики Карелия. Член совета УМО по образованию в области лесного дела. Заместитель председателя докторского диссертационного совета по специальности 05.21.01 при Петрозаводском государственном университете, член докторского диссертационного совета по специальности 05.21.01 при ЛТА им. С. М. Кирова.



Шиловский Вениамин Николаевич (1945, Вологодская область). Закончил Петрозаводский государственный университет (1970). Доктор технических наук (2002), профессор. Место работы: ПетрГУ, профессор кафедры технологии металлов и ремонта, заместитель декана по научной работе. Заслуженный деятель науки Республики Карелия. Член докторского диссертационного совета по специальности 05.21.01 при Петрозаводском государственном университете.



Костюкович Вадим Михайлович (1966, г. Петрозаводск). Закончил Петрозаводский государственный университет (1990). Кандидат технических наук (1995), доцент. Место работы: ПетрГУ, доцент кафедры технологии металлов и ремонта, заместитель декана по международной работе.

ISBN 978-5-8114-0990-7

9 785811 409907



ИЗДАТЕЛЬСТВО «ЛАНЬ»
победитель конкурса по качеству
«Сделано в Санкт-Петербурге»

