

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

---

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Пензенский государственный университет  
архитектуры и строительства»  
(ПГУАС)

**В.В. Лянденбургский, А.С. Иванов, А.С. Ширшиков**

## **ОСНОВЫ ТЕОРИИ НАДЕЖНОСТИ**

Допущено УМО вузов РФ по образованию  
в области транспортных машин и транспортно-технологических  
комплексов в качестве учебного пособия для студентов вузов,  
обучающихся по направлению подготовки бакалавров  
«Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов»  
(профили подготовки: «Автомобили и автомобильное хозяйство»,  
«Автомобильный сервис»)

Пенза 2014

УДК 629.113.003.5.002 (076.9)

ББК 39.33-08

Л97

Рецензенты: кафедра «Эксплуатация машинно-тракторного парка» Пензенской государственной сельскохозяйственной академии (зав.каф. доктор технических наук, профессор К.З. Кухмазов); кандидат технических наук, доцент А.А. Грабовский (ПГУ)

**Лянденбургский В.В.**

Л97

Основы теории надежности: учеб. пособие / В.В. Лянденбургский, А.С. Иванов, А.С. Ширшиков. – Пенза: ПГУАС, 2014. – 228 с.

**ISBN 978-5-9282-1047-2**

Изложены основные положения теории надёжности применительно к автомобильному транспорту. Рассматриваются основные понятия и определения теории надежности, физическая сущность и закономерности изменения технического состояния машин.

Учебное пособие подготовлено на кафедре «Эксплуатация автомобильного транспорта» и предназначено для студентов, обучающихся по направлению подготовки 23.03.03 «Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов».

**ISBN 978-5-9282-1047-2**

© Пензенский государственный университет архитектуры и строительства, 2014

© Лянденбургский В.В., Иванов А.С., Ширшиков А.С., 2014

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Для повышения качества работы технических средств, в частности автомобилей, снижения стоимости их обслуживания необходимо добиться обеспечения оптимальной надежности этих средств. На решение этих задач направлены развитие и совершенствование теории и практики расчета и экспериментального определения надежности, эффективное применение диагностики.

Учебное пособие подготовлено в соответствии с программой дисциплины «Основы теории надежности», изучаемой студентами, обучающимися по направлению «Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов» (профили подготовки: «Автомобили и автомобильное хозяйство», «Автомобильный сервис»). В учебном пособии изложены основы теории надежности и диагностики. В отличие от учебников по этому курсу данное учебное пособие содержит только необходимый материал в рамках указанных выше программ. Для оценки полученных знаний в пособии имеются контрольные вопросы и задачи.

Изучение теории надежности и диагностики базируется на знании теории вероятностей и математической статистики. Знания, полученные при изучении курса, используются при усвоении дисциплины «Техническая диагностика на транспорте».

Пособие подготовлено кандидатами технических наук, доцентами: А.С. Ивановым (Пензенская ГСХА), В.В. Лянденбургским и А.С. Ширшиковым (Пензенский ГУАС).

Авторы выражают благодарность за ценные замечания и советы Г.В. Фролову.

## ВВЕДЕНИЕ

*Теория надежности* как научная дисциплина изучает закономерности возникновения и устранения отказов объектов. Теория надежности изучает:

- критерии и характеристики надежности;
- методы анализа надежности;
- методы синтеза сложных систем по критериям надежности;
- методы повышения надежности;
- методы испытаний объектов на надежность;
- методы эксплуатации объектов с учетом их надежности.

Теория надежности является прикладной технической наукой. Она изучает общие закономерности, которых следует придерживаться при проектировании, изготовлении, испытаниях и эксплуатации объектов для получения максимальной эффективности и безопасности их использования.

В теории надежности исследуются закономерности возникновения отказов объектов, восстановления их работоспособности, рассматривается влияние внешних и внутренних воздействий на процессы, происходящие в объектах, разрабатываются методы расчета систем на надежность, прогнозирования отказов, изыскиваются способы повышения надежности при проектировании и эксплуатации объектов, а также способы сохранения надежности при эксплуатации, определяются методы сбора, учета и анализа статистических данных, характеризующих надежность.

В теории надежности вводятся показатели надежности объектов, устанавливается связь между ними и их экономической эффективностью и безопасностью, обосновываются требования к надежности с учетом различных факторов, разрабатываются рекомендации по обеспечению заданных требований к техническим объектам на этапах их проектирования, изготовления, испытаний, хранения и эксплуатации, решаются эксплуатационные задачи надежности (обоснование сроков и объема профилактических мероприятий и ремонтов, обеспечение запасными элементами, узлами, инструментом и материалами, диагностический контроль и отыскание неисправностей и т.д.).

# 1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ И ПОНЯТИЯ

## 1.1. Качество машин

*Качество машин* – это совокупность их свойств, обуславливающих удовлетворение определенных потребностей в соответствии с целевым назначением.

Качество складывается из свойств. Каждое свойство характеризуется одним или несколькими параметрами, которые могут принимать при эксплуатации различные количественные значения, называемые показателями.

Различают технико-эксплуатационные, производственно-технологические, экономические, эстетические, эргономические, патентно-правовые и свойства безопасности технических изделий (рис. 1.1).



Рис. 1.1. Структура свойств качества машины

Технико-эксплуатационные свойства включают свойства назначения, характеризующие технические и эксплуатационные возможности машины и свойства надежности изделия: безотказность, долговечность, ремонтпригодность и сохраняемость, оценивающие возможность реализации свойств назначения машины в течение срока службы, т.е. надежность можно рассматривать как качество, развернутое во времени.

Главными технико-эксплуатационными свойствами, например, для автомобилей являются масса и габариты; топливная экономичность; грузо-

подъемность; динамичность; маневренность; производительность; проходимость; экономичность.

Технико-эксплуатационные свойства закладываются при проектировании и производстве; реализуются при производстве и в эксплуатации.

Качество изделия (автомобиля, агрегата, детали) или материала (топлива, масла и пр.), как правило, изменяется в процессе эксплуатации в результате изменения самого изделия или материала и его составных элементов. Например, расход топлива при перевозке зависит не только от условий эксплуатации или конструкции автомобиля, но и от текущего состояния системы питания и зажигания автомобиля, износа цилиндропоршневой группы, изменения углов установки передних колес и т.д. При этом потребителя интересуют два главных показателя технико-эксплуатационных свойств: начальный уровень и стабильность в процессе эксплуатации, т.е. изменение свойств, описываемое функцией наработки с начала эксплуатации.

*Наработка изделия* – это продолжительность или объем работы изделия.

Стабильные технико-эксплуатационные свойства практически не изменяются в течение всего ресурса или срока службы изделия, например габаритные размеры, вес, пассажироместимость, грузоподъемность.

*Ресурс* – наработка изделия от начала его применения до наступления предельного состояния или списания машины.

*Срок службы* – календарная продолжительность эксплуатации изделия от начала его применения до наступления предельного состояния или списания машины.

Нестабильные технико-эксплуатационные свойства ухудшаются в процессе работы и по мере старения автомобиля или агрегата. Это, например, производительность (табл. 1.1), затраты на обеспечение работоспособности, интенсивность использования автомобиля и др.

В значительной степени стабильность ТЭС автомобилей определяется их надежностью, а также качеством эксплуатации изделия.

Т а б л и ц а 1 . 1

Изменение некоторых показателей качества грузового автомобиля

Время эксплуатации, лет	Годовая производительность, %	Годовые затраты на ТО и ремонт, %
1	100	100
4	75–80	160–170
8	55–60	200–215
12	45–50	280–300
В среднем	68–73	185–196

*Качество эксплуатации изделия* – это совокупность свойств процесса эксплуатации изделия, от которых зависит соответствие этого процесса и его результатов установленным требованиям. Оно зависит от качества эксплуатационной документации, эксплуатационного оборудования и приспособлений, запасных частей и принадлежностей (в том числе материалов), а также от качества труда эксплуатационников.

Надежность и свойства назначения связаны и в значительной степени определяют показатели использования и затраты денежных средств на выполнение работ. Так, увеличение долговечности машин ведет к уменьшению количества капитальных ремонтов машины и, соответственно, к снижению затрат на их выполнение. С повышением безотказности машин уменьшаются число отказов и затраты на устранение их последствий, увеличивается сменная выработка. Обеспечение требуемой вероятности безотказной работы позволяет выполнять операции, например транспортные, в оптимальные сроки. Улучшение ремонтпригодности изделий снижает затраты на ТО и ремонт, потери от простоев машин по техническим причинам.

*Производственно-технологические свойства* учитывают затраты общественного труда на производство машин и зависят от технологичности, стандартизации, унификации составных частей машины.

*Технологичность* – совокупность признаков, обеспечивающих наиболее экономичное, быстрое и производительное изготовление машин с применением прогрессивных методов обработки, сборки при одновременном повышении качества, точности и взаимозаменяемости частей.

*Стандартизация* – это установление и применение правил, норм, параметров технических и качественных характеристик, которым должно соответствовать изделие, т.е. это регламентирование конструкции и типоразмеров широко применяемых машиностроительных деталей, узлов и агрегатов.

В машиностроении стандартизованы материалы и их свойства, шероховатость, допуски посадки, крепежные детали, подшипники качения, ремни, цепи. В результате стандартизации диаметров и шагов резьб, размеров под ключ, инструменты для их изготовления можно использовать как в основном, так и в ремонтном производстве.

*Унификация* – это рациональное сокращение видов, типов и типоразмеров изделий одинакового функционального назначения, приводящая не только к повышению эксплуатационной технологичности, но и увеличению эффективности эксплуатации изделий, так как намного упрощает и удешевляет ТО и ремонт, уменьшает номенклатуру запасных частей на складах и сокращает количество видов необходимого контрольно-диагностического оборудования.

Унификация состоит в многократном применении в конструкции одних и тех же элементов, с целью сокращения номенклатуры деталей, уменьшения стоимости изготовления и упрощения эксплуатации и ремонта.

Различают внешнюю унификацию, т.е. заимствование деталей с иных машин, и внутреннюю, при которой используются одинаковые элементы в пределах определенного изделия.

По данным НИИАТ повышение уровня технологической совместимости автомобилей на 1 % за счет унификации конструкции и соответствующего совершенствования технологических средств ТО и ремонта позволяет снизить суммарные затраты на 0,2 %.

*Эргономические показатели* учитывают приспособленность автомобиля к антропометрическим, биомеханическим, физиологическим и инженерно-психологическим свойствам человека, проявляющимся в производственных процессах, которые в конечном счете оценивают затраты труда оператора на управление машиной.

*Безопасность* – это свойство изделия не создавать или минимизировать угрозу для жизни и здоровья людей, а также окружающей среды. Для автомобиля типичной является дорожная и экологическая безопасность.

*Эстетические показатели* определяются уровнем художественного конструирования, отражающим функциональность, гармоничность формы, товарный вид и влияющим на производительность труда оператора.

*Патентно-правовые показатели* характеризуют весомость новых изобретений, реализованных в машине, и возможность реализации данной машины за пределами страны-производителя.

Качество определяется также экономическими параметрами производства и эксплуатации машин: себестоимостью изготовления и единовременными затратами эксплуатационников, включающими цену машины и издержки по ее транспортированию, монтажу и наладке; себестоимостью единицы продукции или работы, выполняемой машиной.

При анализе или оценке качества последовательно рассматривают следующие цепочки: при оценке и испытании изделий: показатели – параметры – свойства – качество; при предъявлении требований к изделиям: качество – свойства – параметры – показатели.

Примеры развертывания показателей четырех свойств качества приведены на рис. 1.2.

Например, одним из параметров топливной экономичности автомобиля (свойство) является контрольный расход топлива (параметр), количественное значение которого для конкретной модели (показатель) составляет 7 л/100 км.



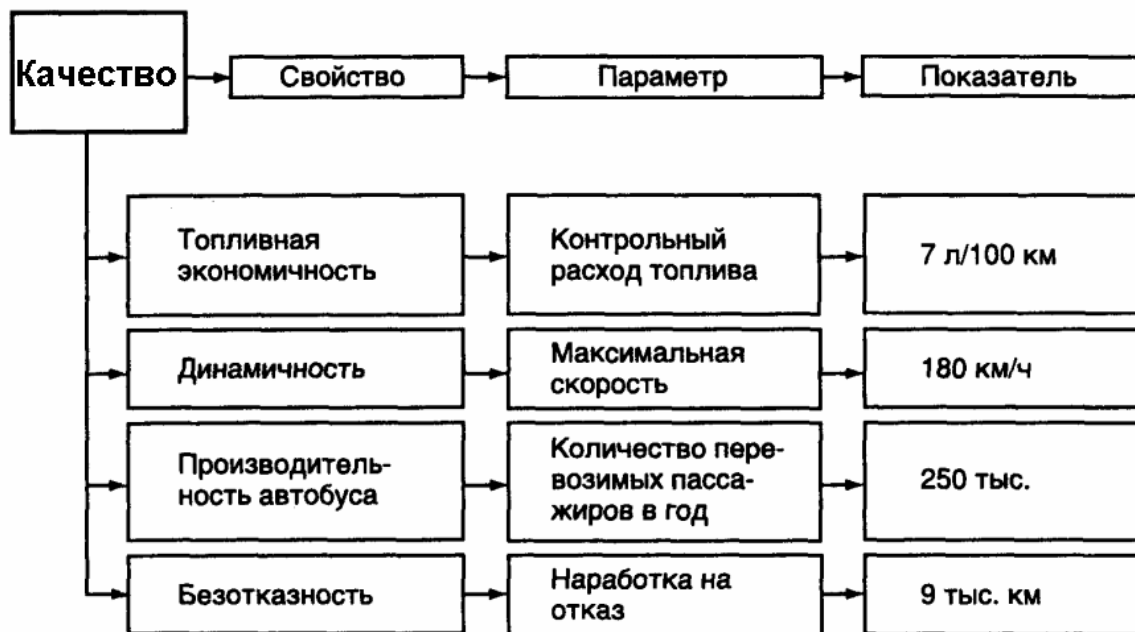


Рис. 1.2. Логическая структура понятия качества (пример)

## 1.2. Основные понятия теории надежности

К основным понятиям и терминам при расчете, анализе и обеспечении надежности машин относят термины, содержащиеся в ГОСТ 27.002–89 «Надежность в технике Основные понятия, термины и определения», ГОСТ 20911–89 «Техническая диагностика термины и определения», ГОСТ 25044–81 «Техническое диагностирование автомобильного транспорта. Основные положения», ГОСТ Р 51709–2001 «Автотранспортные средства. Требования безопасности к техническому состоянию и методы проверки».

*Технический изделие (изделие)* – это предмет, подлежащий расчету, анализу, испытанию и исследованию в процессе его проектирования, изготовления, применения, технического обслуживания, ремонтов, хранения и транспортирования в целях обеспечения эффективности его функционального назначения.

*Техническая система (система)* – это сложное изделие, представляющее собой совокупность взаимосвязанных и функционально расположенных в определенном порядке изделий. Техническими системами могут быть машины, агрегаты, сборочные единицы, которые в зависимости от целей исследования входят в более сложную систему в качестве ее подсистемы или в качестве элемента.

*Элемент технической системы* – изделие, представляющее собой часть технической системы в конкретном рассматриваемом исследовании.

Элементами технической системы могут быть не только детали, но и сборочные единицы, агрегаты и даже машины, если они в данном расчете (исследовании) представлены только своими внешними параметрами (характеристиками, признаками) без раскрытия их внутреннего содержания.

Например, автомобиль может рассматриваться как техническая система, состоящая из двигателя, ходовой части, трансмиссии, рамы и кузова. В свою очередь, каждый из перечисленных элементов представляет собой техническую систему, если его рассматривать в отдельности. Так, двигатель является базовым агрегатом автомобиля, состоящим из совокупности изделий (агрегатов, механизмов), также в отдельности являющихся техническими системами.

Таким образом, понятия «система» и «элемент системы» относительны и должны рассматриваться как целое и часть в конкретном исследовании. Что было системой при рассмотрении части, то будет элементом при рассмотрении целого.

Изделия в зависимости от возможности возобновления работоспособности различают на восстанавливаемые и невосстанавливаемые, ремонтируемые и неремонтируемые.

*Восстанавливаемое изделие* – изделие, восстановление работоспособного состояния которого предусмотрено в НТД или конструкторской документации. Абсолютное большинство машин и их сборочных единиц относят к классу восстанавливаемых изделий. Примером восстанавливаемого изделия является автомобиль, его двигатель и другие основные агрегаты.

*Невосстанавливаемое изделие* – изделие, восстановление работоспособного состояния которого не предусмотрено в НТД или конструкторской документации. Лампочки, клиновые ремни, рукава высокого давления, манжеты, уплотнения, подшипники качения являются примерами невосстанавливаемых изделий.

*Ремонтируемое изделие* – изделие, ремонт которого возможен и предусмотрен НТД или конструкторской документацией.

В отличие от термина «восстанавливаемое изделие» здесь необходимо обратить внимание на условия, в которых предполагается восстанавливать работоспособность изделия. Например, в условиях крупного АТП, имеющего необходимое оборудование и квалифицированных рабочих, коленчатый вал является ремонтируемым изделием, а в условиях автогаража этот же вал относится к неремонтируемым.

*Неремонтируемое изделие* – это изделие, ремонт которого невозможен или не предусмотрен НТД или конструкторской документацией.

Модель невосстанавливаемого (неремонтируемого) изделия представлена на рис. 1.3а, после наработки  $T_0$  эксплуатация изделия прекращается, и он заменяется новым. Если же у восстанавливаемого изделия возник

отказ после наработки  $T_{O1}$ , то в течение времени  $T_{B1}$  происходит восстановление его работоспособности, после чего он продолжает эксплуатироваться до следующей потери работоспособности и т.д.

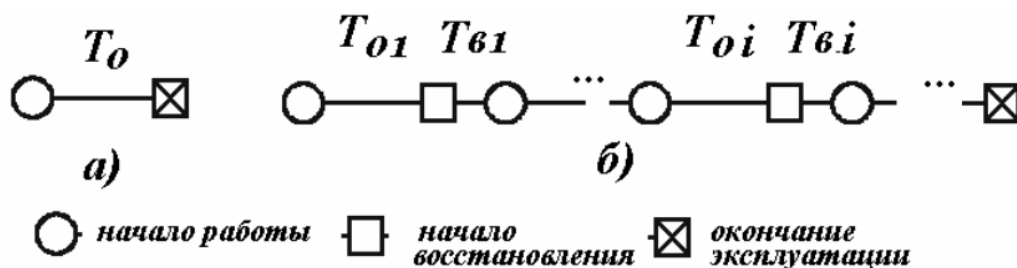


Рис. 1.3. Модели эксплуатации невосстанавливаемых (а) и восстанавливаемых (б) изделий

Таким образом, отказы невосстанавливаемых изделий приводят к полной потере ими работоспособности, отказы восстанавливаемых изделий лишь определяют перерыв в работе.

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

Из формулировки следует, что определить надежность можно, если установлено изделие, т.е. конструкция и его назначение, заданы режимы и условия его эксплуатации при применении по назначению, установлены эксплуатационные показатели для каждого режима эксплуатации, а также допустимые пределы их изменения.

Надежность является внутренним свойством изделия. Оно проявляется во взаимодействии этого изделия с другими изделиями внутри системы, а также с внешней средой, являющейся изделием, с которым взаимодействует сама система в соответствии с ее назначением. Это свойство определяет эффективность функционирования ТС во времени через его показатели.

Являясь комплексным свойством, надежность изделия (в зависимости от его назначения и условий эксплуатации) оценивается через показатели частных свойств (безотказности, долговечности, ремонтпригодности и сохраняемости) в отдельности или в определенном сочетании.

Большинство машин круглогодичного применения оценивается показателями, как правило, трех свойств – безотказности, долговечности и ремонтпригодности.

Машины сезонного применения (уборочная сельскохозяйственная техника, некоторые коммунальные машины, речные суда, эксплуатирующиеся на замерзающих реках), а также машины и оборудование, предназначенные для ликвидации критических ситуаций (противопожарное и спасательное оборудование) и имеющие по своему назначению длитель-

ный период нахождения в режиме ожидания работы, должны оцениваться показателями всех четырех свойств.

Резинотехнические изделия (манжеты, уплотнения) оцениваются показателями долговечности и сохраняемости.

*Безотказность* – это свойство изделия непрерывно сохранять работоспособное состояние в течение некоторого времени или некоторой наработки. Оно проявляется в зависимости от назначения изделия как в режиме его работы, так и в режиме ожидания работы.

*Долговечность* – это свойство изделия сохранять работоспособность до наступления предельного состояния при установленной системе ТО и ремонта, с возможными перерывами для технического обслуживания и ремонтов.

В отличие от безотказности долговечность характеризует продолжительность работы изделия по суммарной наработке, прерываемой периодами для восстановления его работоспособности в плановых и неплановых ремонтах и техническом обслуживании.

*Ремонтопригодность* – свойство изделия, заключающееся в приспособленности к поддержанию и восстановлению работоспособного состояния путем проведения технического обслуживания и ремонта.

Аналогичным понятием является *эксплуатационная технологичность* автомобиля – совокупность свойств его конструкции, характеризующих приспособленность к выполнению всех видов работ по ТО и ремонту с использованием наиболее экономичных технологических процессов.

К свойствам изделия, определяющим ремонтнопригодность, относятся: контролепригодность, доступность, легкосъемность, взаимозаменяемость, преемственность средств ТО и диагностирования, восстанавливаемость, блочность.

*Контролепригодность* – свойство изделия, характеризующее приспособленность его к определению технического состояния и обнаружению отказов. Это важный фактор проведения контроля диагностических параметров технического состояния автомобиля, агрегатов и систем различными средствами и методами технической диагностики (прежде всего методами и средствами автоматизированного и неразрушающего контроля). Он оказывает решающее влияние на внедрение в практику новых, более эффективных методов ТО и ремонта автомобилей. Контролепригодность определяется требованиями обеспечения надежности и безопасности движения автомобиля.

*Доступность* к изделию ТО и ремонта – это свойство изделия, заключающееся в обеспечении выполнения обслуживания и ремонта с минимальными объемами дополнительных работ; приспособленность изделия к удобному выполнению операций ТО и ремонта с минимальным объемом вспомогательных работ. Это главный фактор сокращения затрат на профи-

лактику и ремонт автомобиля. Им определяются условия работы по ТО и ремонту автомобиля, а также пригодность изделия для выполнения целевых операций по профилактике и ремонту с минимальными объемами дополнительных работ или вообще без них.

*Легкосъемность* – это приспособленность агрегата, сборочной единицы к замене с минимальными затратами времени и труда, а также приспособленность машины к разборочно-сборочным операциям.

Не следует смешивать легкосъемность с доступностью, так как на автомобиле имеются элементы, к которым обеспечена хорошая доступность, но замена их при эксплуатации затруднена. Легкосъемность определяется в основном применяемыми способами крепления изделий, которые заменяются в эксплуатации, конструкцией разъемов, массой и габаритными размерами съемных элементов.

*Блочность* – это приспособленность конструкции к расчленению на отдельные агрегаты и сборочные единицы. Каждая сборочная единица должна представлять собой отдельный функционально законченный элемент.

*Взаимозаменяемость* – свойство конструкции технического изделия, обеспечивающее возможность его замены при ТО и ремонте без подгоночных работ.

Различают внешнюю взаимозаменяемость, характеризуемую размерами и формой присоединительных поверхностей и основными эксплуатационными показателями (мощность, скорость, частота вращения и т.п.). Внутренняя взаимозаменяемость характеризует размеры деталей, входящих в сборочные единицы. Это означает, что из множества одноименных изделий (деталей) можно без выбора взять любую и без подготовки установить на изделие. В зависимости от объема подготовительных работ определяется соответствующая степень взаимозаменяемости: чем меньше объем подготовительных работ, тем больше степень взаимозаменяемости. Взаимозаменяемость играет большую роль в сокращении затрат труда, материалов и простоев изделий при ТО и ремонте.

*Преемственность* средств ТО и контрольно-диагностического оборудования предоставляет возможность использования имеющихся средств для обслуживания и ремонта новых моделей автомобилей. Этот фактор оказывает значительное влияние на организацию рабочего места и обеспечение удобства работы исполнителей, на сроки и стоимость ТО и ремонта.

*Восстанавливаемость* – это приспособленность конструкции к восстановлению потерянной работоспособности с минимальными затратами труда. Например, у коленчатого вала двигателя шейки при износе могут быть перешлифованы под новый ремонтный размер, в результате будет восстановлена его работоспособность.

*Сохраняемость* – свойство изделия непрерывно сохранять исправное и (или) работоспособное состояние в течение и (или) после режима ожи-

дания, хранения и (или) транспортирования. Оно характеризует способность как изделия в целом, так и его элементов противостоять отрицательному влиянию факторов длительного его хранения или транспортирования и обеспечивать его применение после режима ожидания с заданными показателями функционирования с сохранением показателей безотказности и долговечности.

### 1.3. Изменение состояния технического изделия в процессе эксплуатации

Изделие в периоды его применения, хранения, транспортирования, технического обслуживания и ремонта в течение всего срока службы всегда находится в одном из четырех состояний: исправном, неисправном, работоспособном, неработоспособном (рис. 1.4). Особым видом неработоспособного состояния является предельное состояние.



Рис. 1.4. Динамика состояния изделия

Переход изделия из одного состояния в другое фиксируется событиями – повреждением или отказом.

*Повреждение* – это событие, заключающееся в нарушении исправности изделия при сохранении его работоспособности.

*Отказ* – это событие, заключающееся в нарушении работоспособности изделия.

*Исправное состояние (исправность)* – это состояние изделия, при котором оно удовлетворяет всем требованиям нормативно-технической документации (НТД).

*Неисправное состояние (неисправность)* – это состояние изделия, при котором оно не удовлетворяет хотя бы одному из требований НТД.

*Работоспособное состояние (работоспособность)* – это состояние изделия, при котором значения всех параметров, характеризующих его способность выполнять заданные функции, соответствуют требованиям НТД.

*Неработоспособное состояние* – состояние изделия, при котором значение хотя бы одного параметра, характеризующего его способность выполнять заданные функции, не соответствует требованиям НТД.

*Предельное состояние* – это состояние изделия, при котором его дальнейшая эксплуатация должна быть прекращена:

- из-за неустранимого нарушения требований к технике безопасности (износ протектора колеса и т.п.);

- или неустранимого ухода заданных параметров на установленные пределы, например разрушение деталей, увеличение расхода картерных газов;

- или неустранимого снижения эффективности эксплуатации ниже допустимой, например: снижение мощности двигателя, повышение расхода топлива и т.п.;

т.е. это состояние изделия, при достижении которого его дальнейшее применение по назначению или недопустимо, или невозможно, или экономически нецелесообразно.

Из состояний, в которых изделие не может выполнять свои функции, возможен переход в исправное или работоспособное состояние с помощью ремонта или восстановления.

*Ремонт* – это комплекс операций, предназначенный для восстановления исправности или работоспособности изделий и восстановления технического ресурса изделий или их составных частей. Как правило, этот ремонт является капитальным, предусматривающим полное восстановление исправности изделия.

*Восстановление* – процесс обнаружения и устранения отказа с целью восстановления работоспособности изделия. Восстановление осуществляется с помощью ремонтных операций, например замены детали или технического обслуживания, регулировочных, смазочных, крепежных операций.

*Техническое обслуживание* – это комплекс операций по поддержанию работоспособности или исправности изделия при использовании его по назначению, ожидании, хранении и транспортировании.

Все виды состояний и событий, согласно ГОСТ 27.103–83, определяются критериями, установленными в соответствующей НТД. Все виды событий обнаруживаются через признаки, также оговоренные в НТД на изделие.

Критериями исправного состояния являются установленные НТД параметры технической характеристики изделия, а также параметры внешнего вида, комфортности, обзорности, удобства управления и др., определяющие качество изделия.

Критериями работоспособного состояния являются параметры технической характеристики изделия, установленные НТД для заданных условий и режимов применения.

Критерием неисправного состояния является выход за установленные пределы хотя бы одного параметра, но при этом работоспособность изделия сохраняется полностью (или частично) в заданных (или в щадящих) условиях и режимах применения, допускаемых для изделия и оговоренных в НТД.

Переход изделия в неисправное состояние фиксирует факт повреждения. К щадящим условиям и режимам применения изделия могут быть отнесены, например: работы, при выполнении которых не используется номинальная мощность силовой установки или любой другой параметр технической характеристики при его максимальном значении; применение изделия только в светлое время суток, если, например, не работают или повреждены осветительные устройства, необходимые при использовании изделия в темное время суток.

Критерием неработоспособного состояния изделия является выход за пределы установленного в НТД значения хотя бы одного из параметров технической характеристики или появление таких значений деформаций, усталостной трещины, износа, какого-либо из основных элементов изделия, которые по установленным в НТД признакам отказа фиксируют факт недопустимости или невозможности дальнейшего применения изделия без устранения причин отказа и восстановления его работоспособности путем проведения ремонта.

Критерием предельного состояния изделия является такое его неработоспособное состояние, при котором по установленным в НТД признакам фиксируется факт недопустимости или невозможности дальнейшего его применения по назначению и необходимости его замены, списания или, если это экономически целесообразно, проведения капитального ремонта.

Последствием предельного состояния деталей является их замена, а последствием предельного состояния машины или ее сборочных единиц – списание или капитальный ремонт.



## 1.4. Взаимосвязь надежности и экономичности технических систем

Современный уровень науки и технологии принципиально позволяет создать машину практически с любой сколь угодно большой надежностью, вопрос заключается только в том, какие затраты и время потребуются для достижения поставленной цели.

Однако затраты на создание машины с высокой надежностью могут быть столь велики, что эффективность от повышения надежности не возместится в процессе эксплуатации машины.

При достижении требуемого уровня надежности прежде всего нужно исходить из получения наибольшей суммарной экономической эффективности с учетом затрат на разработку, производство и эксплуатацию и того положительного эффекта, который получится при использовании машины по назначению.

Затраты на создание новой машины ( $C_H$ ) (рис. 1.5) включают затраты на проектирование, материалы, производство, опытную отработку. В процессе эксплуатации возникают затраты на эксплуатацию ( $C_Э$ ), к которым относятся оплата труда операторам, затраты на энергию, амортизация, затраты на техническое обслуживание и ремонт, т.е. затраты, связанные с поддержанием и восстановлением работоспособности машины в процессе эксплуатации.

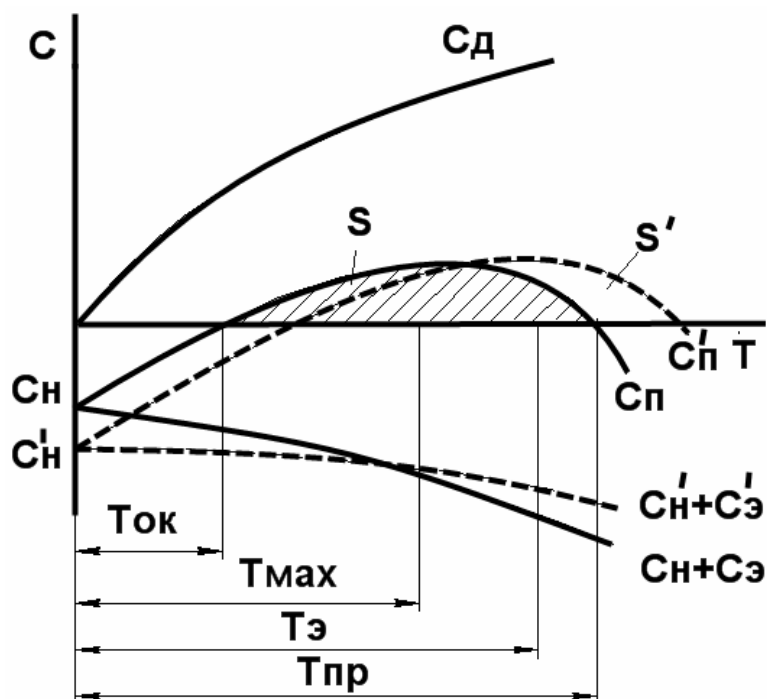


Рис. 1.5. Изменение экономической эффективности машины  
в период ее эксплуатации

Затраты  $C_3$  с изменением времени  $T$  растут, так как происходит старение, изнашивание и выработка срока службы отдельных элементов машины, что требует вложения возрастающих средств на восстановление утраченных свойств.

Сумма затрат  $C_H + C_3$  является отрицательной в балансе эффективности использования машины.

В то же время эксплуатация машины приносит доход ( $C_D$ ), т.е. положительную составляющую баланса экономической эффективности.

После определенной продолжительности эксплуатации затраты на создание машины окупаются, соответственно этот период называется сроком окупаемости машины ( $T_{OK}$ ).

С этого момента использование машины приносит прибыль предприятию

$$C_{\Pi} = C_D - (C_H + C_3) > 0.$$

Однако скорость роста прибыли постепенно снижается из-за увеличения эксплуатационных затрат и в момент времени ( $T_{\Pi P}$ ) машина перестает приносить прибыль ( $C_{\Pi} = 0$ ), так как затраты на ее эксплуатацию становятся больше дохода. Следовательно, экономически целесообразно использовать машину до момента  $T_{\Pi P}$ , который по экономическому критерию представляет собой срок службы (ресурс) рассматриваемой машины и соответствует ее предельному состоянию.

Общая прибыль от использования машины определяется площадью  $S$  под кривой на интервале  $T_{OK} \dots T_{\Pi P}$ . На нее влияют характер изменения затрат на эксплуатацию и начальные затраты на создание машины.

Если в результате реализации задачи по повышению надежности машины затраты на создание машины с большей надежностью составили  $C_H'$  (использование материалов с повышенными прочностными характеристиками, увеличение периода опытной отработки машины, дублирование элементов), что привело к снижению эксплуатационных затрат из-за уменьшения числа ремонтов, то эффективность повышения надежности будет оцениваться соотношением общей прибыли машины до модернизации ( $S$ ) и после ( $S'$ ). Повышение надежности оправдано, если  $S' > S$ .

Следовательно, при оценке разнообразных мероприятий по повышению и обеспечению надежности машины экономическая эффективность должна являться основным критерием принятия конструктивных решений.

## 2. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ НАДЕЖНОСТИ ИЗДЕЛИЙ

### 2.1. Факторы, определяющие надежность технических систем

Проектирование, производство и эксплуатация технических изделий выполняются в соответствии с нормативно-технической документацией. Несмотря на это, в процессе эксплуатации наблюдаются отказы элементов и машины в целом. Появление отказов связано с внешними и внутренними воздействиями, которые нарушают энергетическое равновесие и вызывают процессы трех видов: быстро протекающие, средней скорости и медленно протекающие.

*Быстро протекающие процессы* характеризуются большими скоростями и периодичностью изменения параметров, определяемыми долями секунд. К таким процессам относятся вибрации элементов, резонансные возбуждения, пульсации давления в рабочих полостях и трактах и др. Эти процессы влияют на взаимное расположение элементов, нарушают их взаимосвязь и изменяют рабочий процесс машины.

*Процессы средней скорости* протекают за время рабочего цикла машины, их длительность измеряется минутами и часами. К таким процессам относятся изменения температуры рабочей среды и рабочего тела, влажности, физических свойств рабочей жидкости и др. Эти процессы приводят к постепенным отказам.

*Медленно протекающие процессы* действуют в течение всего периода эксплуатации машины. К ним относятся изнашивание трущихся деталей, естественное старение и усталость материалов, сезонное изменение температуры и влажности.

При создании и эксплуатации машины на ее надежность действуют различные факторы, обусловленные объективными и субъективными причинами (рис. 2.1).

К *объективным факторам*, определяемым окружающей средой, относятся атмосферное давление, температура, влажность и запыленность воздуха, солнечная радиация.

Условия эксплуатации считаются нормальными, если температура окружающей среды  $(20 \pm 10)$  °С, относительная влажность  $(60 + 20)$  %, в воздухе отсутствуют пыль и вредные примеси. Фактические условия эксплуатации существенно отличаются от нормальных.

Температура окружающей среды является одним из наиболее активных факторов. При повышении температуры механические свойства большинства материалов ухудшаются: уменьшается модуль упругости, снижается предел прочности; ускоряется процесс старения многих пластмасс и резиновых материалов; смазочные материалы и рабочие жидкости теряют вязкость, что приводит к увеличению утечек через зазоры и уплотнения.

Низкая температура снижает механическую прочность материалов, уменьшает пластичность, повышает хрупкость (хладноломкость), увеличивает вязкость жидкости, что вызывает значительные потери давления на трение в трубопроводах, потери мощности в узлах трения. Из-за структурных внутренних изменений появляются дополнительные местные напряжения в материалах, приводящие к хрупкому разрушению. Резкие изменения температуры в течение короткого периода, например суток, приводят к ухудшению прочностных характеристик, к изменению линейных размеров и в конечном счете к разрушению паяных и сварных соединений, деформации деталей.

Влажность воздуха также существенно влияет на работоспособность машины. Свойство материалов поглощать водяные пары из воздуха называют гигроскопичностью. На поверхности материала уже при относительной влажности 60–70 % появляется молекулярный слой воды, который при дальнейшем повышении влажности переходит в полимолекулярный, и пленка воды достигает толщины нескольких десятков микрометров. Влага, находящаяся на поверхности, проникает по порам внутрь материала вследствие абсорбции или нарушения герметичности. Влага вызывает электрохимическую коррозию, изменяет механические и электрические свойства проводников и изоляции.

Запыленность воздуха является результатом работы машин с сыпучими материалами. Воздух наполняется пылью, состоящей из частиц кварца, двуокиси кремния, окиси железа и др. Твердость этих частиц часто превышает твердость материала, из которого изготовлены элементы машины.

Пыль ускоряет изнашивание трущихся пар, загрязняет рабочую жидкость. Кроме того, пыль вызывает потерю глянца покрытий и их растрескивание, тем самым увеличивает чувствительность поверхностей к коррозии.

К объективным факторам также относятся эксплуатационные, включающие механические и временные факторы.

Вследствие силового взаимодействия технического изделия с окружающей средой возникают удары, нагрузки и вибрация.

*Удар* характеризуется преобразованием кинетической энергии внешних сил в потенциальную энергию деформации элементов конструкции и обратное преобразование упругой деформации в кинетическую энергию. Для неупругих конструкций удар вызывает затухающие колебания на собственной частоте. В результате этого в хрупких материалах появляются трещины и изломы. Возможный диапазон перегрузок, вызываемых ударами, чрезвычайно велик – от нуля для стационарных систем до 2...10 g для строительно-дорожных машин.

Нагрузки, возникающие в результате силового взаимодействия машины с окружающей средой, разделяют на позиционные и инерционные.

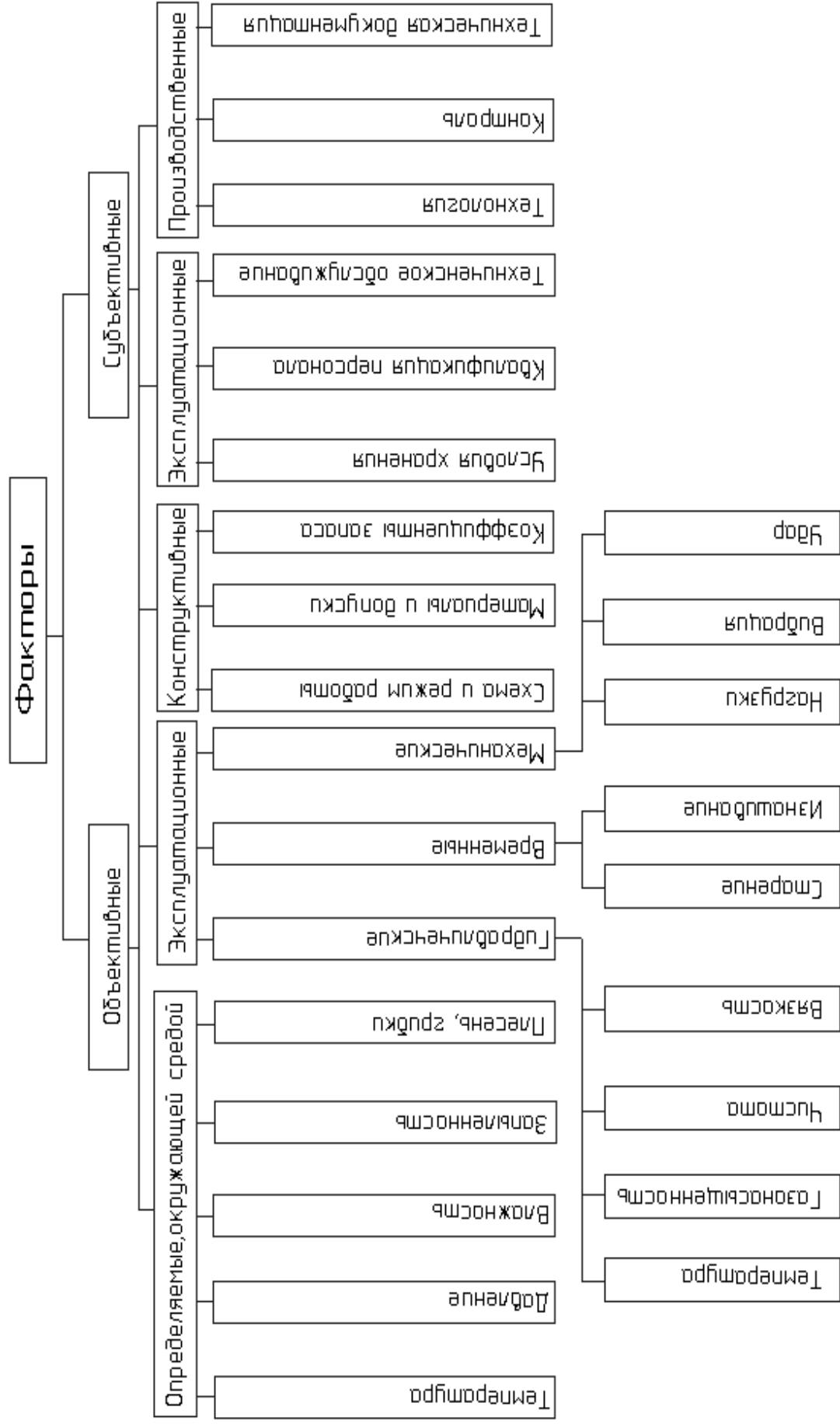


Рис. 2.1. Факторы, влияющие на надежность технических изделий

*Позиционная* нагрузка влияет в основном на статические характеристики. Постоянная противодействующая или сопутствующая сила на выходном звене машины приводит соответственно к уменьшению или увеличению скорости выходного звена. Позиционная нагрузка на выходном звене деформирует амплитудно-частотную характеристику и увеличивает фазовые сдвиги, что изменяет запасы устойчивости и быстродействие привода машины.

*Инерционная* нагрузка влияет на динамические свойства машины. Она обуславливает появление резонансных режимов и колебательных процессов.

*Вибрация* – это механические колебания в элементах машины, не являющиеся неотъемлемым условием выполнения ими своих функций, а возникающие вследствие несовершенства конструкции, дефектов и особых условий эксплуатации. Основным источником вибраций всех машин является ротор. Его статическая и динамическая неуравновешенность приводит к возникновению сил и моментов, вызывающих вибрацию как самого ротора, так и машины в целом.

Неуравновешенность и несбалансированность вращающихся частей машин являются следствием неточности изготовления деталей и узлов, неоднородности материала, упругих и остаточных деформаций и т.д. В процессе эксплуатации неуравновешенность ротора увеличивается под действием силового возмущения, температурных деформаций и износа.

Таким образом, изменение технического состояния обусловлено работой узлов механизмов, случайными причинами, а также воздействием внешних условий работы и хранения технических изделий.

*К субъективным факторам* относятся конструктивные, технологические и эксплуатационные факторы, которые во многом зависят от конструктора, изготовителя и эксплуатационника, т.е. от человека.

*Конструктивные факторы* определяются схемой и режимом работы машины, формами и размерами деталей (от данных факторов зависит давление на поверхность детали, концентрация напряжений, ударная и усталостная прочность металла); качеством материалов, используемых для изготовления деталей; жесткостью конструкции, т.е. способностью деталей, особенно базовых и основных, незначительно деформироваться под воздействием воспринимаемых нагрузок; точностью взаимного расположения поверхностей и осей совместно работающих деталей; правильным выбором посадок, обеспечивающих надежную работу соединений.

*Технологические факторы* определяются технологией выполнения операций, применением соответствующей термической обработки и качеством сборочных работ: центровкой, обеспечением соосности, регулировкой зазоров, креплением.

*Субъективные эксплуатационные факторы* зависят от воздействия персонала предприятия на техническое изделие при его эксплуатации.

В процессе работы и хранения технического изделия некоторые его агрегаты и детали находятся в постоянном взаимодействии с эксплуатационными материалами. Свойства этих материалов и условия их применения сказываются на процессе изнашивания и коррозии деталей, расходе смазочных материалов, производительности машины. Используемые эксплуатационные материалы должны соответствовать конструктивным и технологическим особенностям агрегатов машины, их техническому состоянию и условиям эксплуатации.

Значительно влияет на надежность машины качество ее использования оператором, от которого зависят динамические нагрузки в деталях. Например, при резком включении сцепления крутящий момент, прикладываемый к трансмиссии, может значительно превысить максимальный крутящий момент двигателя с учетом коэффициента запаса и привести к отказу трансмиссии автомобиля.

Правильное и своевременное техническое обслуживание узлов и агрегатов машины определяет ее безотказность и долговечность, во многом зависит от качества труда ремонтных рабочих и их квалификации.

Наличие на рабочих местах грамотной технологической документации (технологические карты, ремонтные чертежи, технические требования) способствует технологической дисциплине, направленной на обеспечение работоспособности автомобилей, а следовательно, и на повышение их надежности.

## 2.2. Причины нарушения работоспособности машин

Причинами нарушения работоспособности могут быть: *явления*, например пластические деформации, разупрочнение поверхностей; *процессы*, например изнашивание, рост трещин, коррозия, старение материалов; *события*, например появление перегрузок, попадание абразива в зону трения, схватывание сопряженных поверхностей, нарушение режимов и правил эксплуатации; *состояния изделия*, например отсутствие защиты от попадания влаги, пыли, наличие остаточных напряжений, дефекты сборки, наличие концентраторов напряжений.

Знание основных причин изменения технического состояния автомобилей важно для совершенствования их конструкции (рис. 2.2), для выбора наиболее эффективных мероприятий по предупреждению неисправностей в эксплуатации.

### 2.2.1. Остаточные деформации

*Остаточные деформации* – это процессы потери работоспособности под воздействием нагрузок, превышающих предел (упругости) текучести у вязких материалов и прочности – у хрупких материалов, происходят

вследствие либо ошибок при расчетах, либо нарушений правил эксплуатации.

Иногда остаточным деформациям предшествует механическое изнашивание, приводящее к изменению геометрических размеров и сокращению запасов прочности детали.

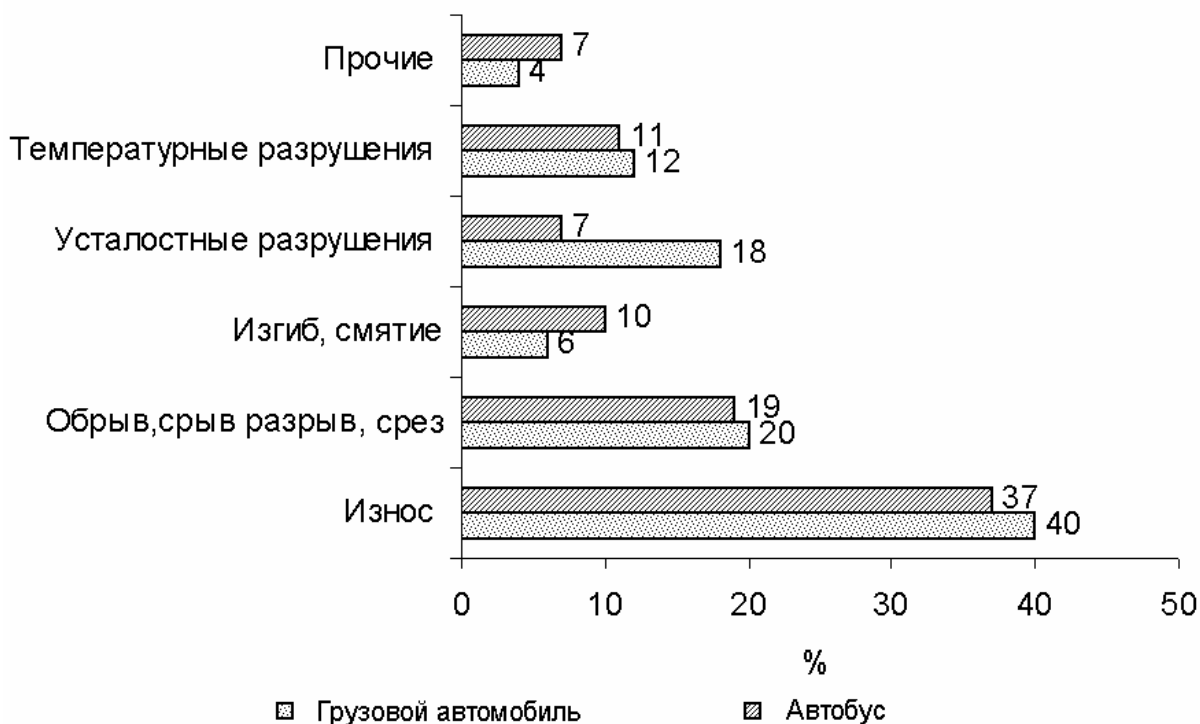


Рис. 2.2. Удельный вес причин нарушения работоспособности автомобилей

Остаточные деформации наблюдаются в виде пластической деформации, пластического разрушения, хрупкого разрушения и коробления деталей.

*Пластическое деформирование* деталей проявляется в виде изгиба, скрученности, растяжения или смятия отдельных поверхностей. Происходит это под действием силовых (статических и динамических) нагрузок, вызывающих увеличение напряжений в материале, превышающих предел текучести.

*Текучесть* – это свойство металлов и их сплавов деформироваться в упругопластической зоне с нарастающей остаточной деформацией после достижения напряжения в материале свыше определенного значения.

На диаграммах растяжения (рис. 2.3) наступление текучести часто выражается в виде площадки, которая возникает при напряжениях, соответствующих пределу текучести (рис. 2.3, а). У металлов с большим количеством примесей, например малоуглеродистых сталей, из которых изготавливают большинство деталей машин, наступление текучести связано с образованием зуба текучести (рис. 2.3, б). В данном случае при повышении напряжений вплоть до верхнего предела текучести пластическая деформа-



ция очень мала, затем наступает срыв напряжения до нижнего предела текучести, и наблюдается последующее нарастание пластической деформации без прироста напряжения.

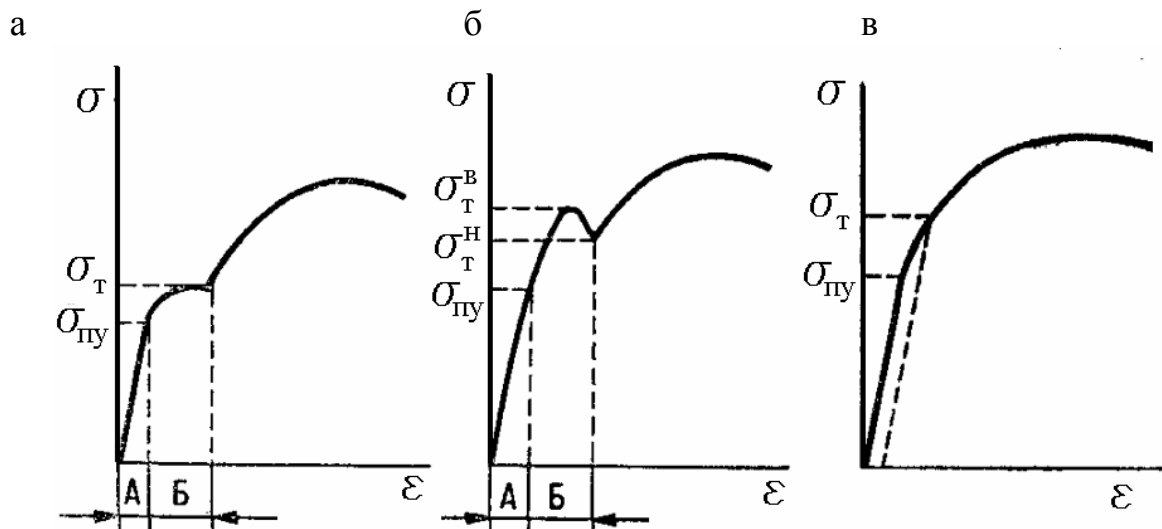


Рис. 2.3. Диаграммы растяжения металлов:  
 а – появление текучести в виде площадки; б – образование текучести в виде  
 зуба; в – постепенное нарастание пластической деформации.  
 А – зона упругости; Б – упругопластическая зона

Большинство качественных поликристаллических металлов и сплавов не обнаруживает резко выраженного предела текучести: у них после достижения предела пропорциональности происходит постепенное нарастание пластической деформации (рис. 2.3, в). В этом случае определяют условный предел текучести по значению заданной пластической деформации (обычно 0,2...0,3 %).

Пластическое разрушение сопровождается значительной предварительной деформацией, вызываемой касательными напряжениями (рис. 2.4, а). Этому виду разрушения подвергаются детали из вязких металлов (сталь), в результате возникают разрывы, срезы, срывы.

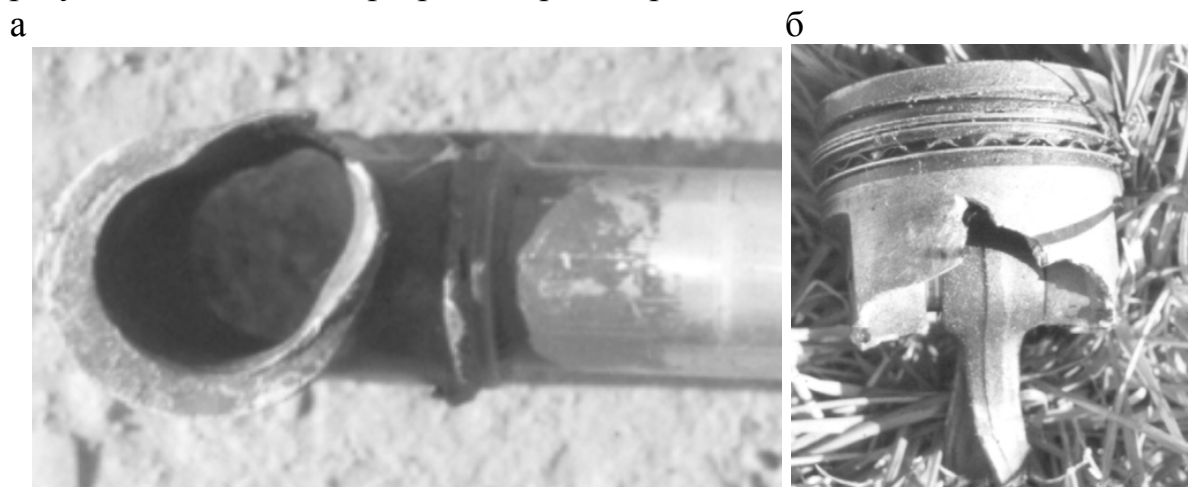


Рис. 2.4. Пластическое разрушение (разрыв) проушины штока поршня гидроцилиндра (а) и хрупкое разрушение поршня двигателя (б)

*Хрупкое разрушение* наступает без макроскопической деформации под действием нормальных напряжений, превышающих предел прочности. Хрупкое разрушение распространяется с большой скоростью, сопоставимой со скоростью распространения звука в данном материале. Оно характерно для деталей, изготовленных из хрупких материалов, например из чугуна, и проявляется в виде излома (рис. 2.4, б).

*Прочность* – это свойство материала сопротивляться разрушению под воздействием нагрузок, не превышающих предела прочности. Оно определяется значением напряжения, скоростью его изменения, видом деформации и характером напряженного состояния.

Прочность деталей во многом зависит от материала, а также от состояния тонкого, поверхностного слоя, в котором обычно образуются трещины.

В корпусных деталях (блоки, корпуса коробок передач и задних мостов, головки цилиндров, корпуса редукторов и др.) при воздействии на них внешних силовых нагрузок, вибрации, нагрева протекают процессы старения, внутренние напряжения в связи с этим перераспределяются, происходит релаксация напряжений, приводящая к *короблению деталей*.

### 2.2.2. Усталостные разрушения

*Усталостные разрушения* – это вид разрушений, возникающий при циклическом приложении нагрузок, превышающих предел выносливости металла детали. При этом происходит постепенное накопление и рост усталостных трещин, приводящие, при определенном числе циклов нагружения, к усталостному разрушению деталей. Многократное приложение нагрузки вызывает разрушение деталей при напряжениях, значительно меньших, чем в случае однократного их приложения.

Явление, при котором напряжения разрушения из-за большого числа повторных нагружений могут быть ниже не только предела прочности и предела текучести ( $\sigma_T$ ), но и предела упругости ( $\sigma_{ПУ}$ ), называется *усталостью металлов*.

Детали, несущие статические и циклические силовые нагрузки (элементы рам машины, коленчатые и торсионные валы, листы рессор, пружины, шатуны и др.), разрушаются вследствие усталости.

Разрушение может происходить за счет нагружения растяжением, сдвигом. Оно всегда заканчивается образованием трещин вплоть до разрушения.

Характер повторно-переменных нагружений деталей может быть различным (рис. 2.5). Цикл напряжений характеризуется максимальным  $\sigma_{\max}$ , минимальным  $\sigma_{\min}$  напряжениями, амплитудой  $\sigma_a = (\sigma_{\max} - \sigma_{\min})/2$ , средним напряжением  $\sigma_{cp} = (\sigma_{\max} + \sigma_{\min})/2$  и коэффициентом асимметрии цикла  $K_A = \sigma_{\min}/\sigma_{\max}$ . Используя эти основные параметры, можно описать каждый

из показанных на рисунке циклов напряжений, принимая, что напряжения растяжения положительны, а напряжения сжатия отрицательны.

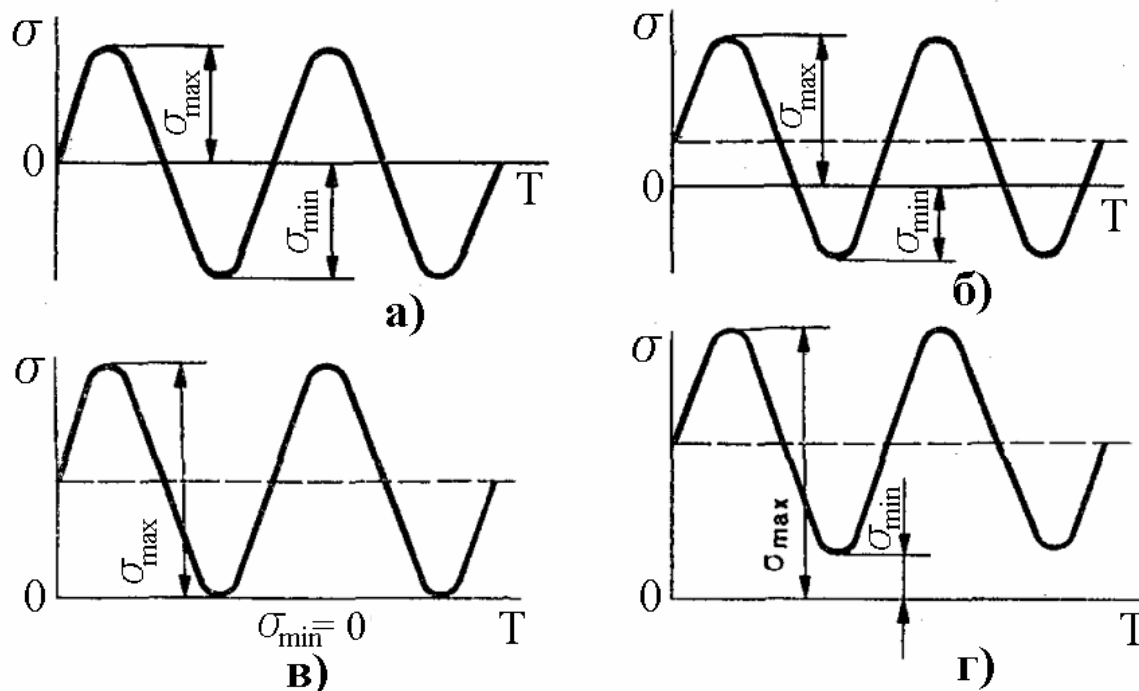


Рис. 2.5. Характер повторно-переменных напряжений:  
 а – знакопеременный симметричный цикл; б – знакопеременный асимметричный цикл; в – пульсирующий цикл; г – знакопеременный цикл

Способность материала сопротивляться усталостному разрушению называется *выносливостью*, которая характеризуется двумя критериями. Основной ее критерий – это *предел выносливости*, представляющий собой наибольшее напряжение цикла, которое может выдержать материал образца без разрушения от усталости.

Вторым критерием выносливости является число циклов, при котором происходит усталостное разрушение в заданных условиях испытаний, называемое *долговечностью*.

Усталостное разрушение происходит в три стадии: накопление локальных микродеформаций в опасном сечении, развитие трещины (подростание), которую трудно установить в эксплуатационных условиях, и разрушение – хрупкий излом без признаков пластической деформации.

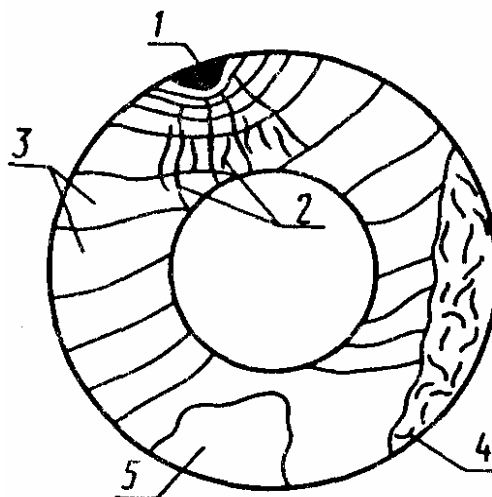


Рис. 2.6. Схема усталостного излома деталей:  
 1 – фокус излома и очаг разрушения; 2 – вторичные ступеньки и рубцы; 3 – усталостные линии; 4 – зона ускоренного развития трещин; 5 – зона доламывания от очага разрушения

Усталостные разрушения имеют характерные признаки, позволяющие отличить их от других разрушений. На поверхности излома можно различить пять зон (рис. 2.6).

1. Фокус излома – малая локальная зона, близкая к точке возникновения начальной макроскопической трещины усталости. Обычно фокус излома располагается на поверхности детали в местах концентрации напряжений или поверхностных дефектов. Если в теле деталей были внутренние дефекты или детали подвергались поверхностному упрочнению, фокус излома может располагаться внутри детали.

2. Очаг разрушения – небольшая зона, прилегающая к фокусу излома. При больших напряжениях может быть несколько очагов разрушения. На поверхности излома эта зона имеет наибольший блеск и гладкость. Усталостные линии на очаге разрушения обычно отсутствуют.

3. Участок избирательного развития соответствует зоне развившейся трещины усталости. В этой зоне видны характерные усталостные линии, волнообразно расходящиеся. Форма усталостных линий зависит от формы детали и характера нагружения. Направления развития трещины могут отклоняться от первоначального.

4. Участок ускоренного развития трещины является переходной зоной между участками усталостного развития трещины и зоной долома. Эта зона образуется в течение нескольких циклов, предшествующих окончательному разрушению.

5. Зона долома характеризуется признаками макрорупкого разрушения.

Характерные признаки разрушения деталей от усталости – отсутствие заметных остаточных деформаций и наличие на поверхности излома зоны развития трещины с гладкой поверхностью и зоны поломки (долома) с шероховатой поверхностью.



Рис. 2.7. Усталостное разрушение коленчатого вала двигателя

На рис. 2.8 показана качественная картина влияния вида нагружения, величины нагрузки и концентрации напряжения на вид излома в стальных деталях.

Усталостные изломы при изгибе подразделяют на односторонние, двусторонние и изломы при круговом изгибе (см. рис. 2.8). Круговой усталостный излом возникает на вращающихся деталях, работающих на изгиб (см. рис. 2.7). В этом случае несколько трещин, расположенных по диаметру,

объединяются, вследствие чего зона окончательного излома располагается близко к центру круглой детали.


Вид нагрузки	Напряжение	
	низкое	высокое
Одно-сторонний изгиб		
Двух-сторонний изгиб		
Изгиб с кручением		

Рис. 2.8. Виды изломов при усталостных разрушениях от изгиба (зоны мгновенного разрушения заштрихованы накрест, зоны развития трещины показаны продольными линиями)

Зона долома у деталей, работающих при высоких нагрузках, меньше, чем при более низких нагрузках.

Совершенствование методов расчета и технологии изготовления автомобилей, повышение качества металла и точности изготовления, исключение концентраторов напряжения привело к значительному сокращению случаев усталостного разрушения деталей.

### 2.2.3. Коррозия

*Коррозия* – это процесс разрушения металла, происходящий вследствие агрессивного химического или электрохимического взаимодействия среды с деталью, приводящего к окислению металла и, как следствие, к уменьшению прочности и ухудшению внешнего вида.

Основными активными агентами внешней среды, вызывающими коррозию, являются соль, которой посыпают дороги зимой, кислоты, содержащиеся в воде и почве, компоненты, входящие в состав отработавших газов автомобилей, и их химические соединения.

Коррозия главным образом поражает детали кузова, кабины, рамы. Для деталей кузова, расположенных снизу, коррозия сопровождается абразивным изнашиванием в результате воздействия на поверхность при движении автомобиля абразивных частиц: песка, гравия. Сильно способствует коррозии сохранение влаги на металлических поверхностях, в том числе

под слоем дорожной грязи, что особенно характерно для всякого рода скрытых полостей и ниш.

Коррозия приводит к усталостному изнашиванию и разрушению, так как создает на поверхности металла концентраторы напряжения в виде коррозионных язв. Такой вид разрушений наблюдается, например, в местах сварки, крепления кронштейнов рессор.

Коррозию подразделяют:

➤ *по геометрическому характеру разрушения* – на сплошную (общую) и местную (локальную);

➤ *по характеру взаимодействия металла со средой* – на химическую и электрохимическую;

➤ *по типу коррозионной среды* – на газовую, атмосферную, жидкостную, подземную;

➤ *по характеру дополнительных воздействий, которым подвергается металл одновременно с коррозией*, – коррозия под напряжением, контактная коррозия.

*Сплошная (общая) коррозия*, охватывающая всю поверхность металла, бывает: равномерной, которая протекает с одинаковой скоростью по всей поверхности металла; неравномерной, когда скорость коррозии на разных участках поверхности неодинакова; избирательной, при которой разрушается одна структурная составляющая или один компонент сплава.

Общая коррозия возникает на больших незащищенных поверхностях кузова автомобиля под действием солевых растворов влаги. Коррозия происходит с максимальной интенсивностью при концентрации солевого раствора от 2 до 5 %. Интенсивность общей коррозии для стальных деталей может достигать 30–40 мкм, а цинковых – 8 мкм в год. Интенсивность коррозии в городах и на дорогах соответственно составляет 30 и 5 мкм в год. При увеличении влажности воздуха от 60 до 90 % интенсивность коррозии возрастает в три раза.

*Локальная (местная) коррозия* возникает на ограниченных участках и проявляется в виде щелевой, питтинговой, ножевой, подслоной и межкристаллитной коррозии.

*Щелевая коррозия* образуется в щелях и зазорах между двумя металлами, а также в местах неплотного контакта металла с неметаллическим коррозионно-инертным материалом. Зазором могут быть щели между листами, зазоры в сопряжениях и стыках, зоны трещин в металле, а также щели между осевшими или прилипшими к поверхности посторонними веществами. Особенно там, где долгое время сохраняется влага или грязь, например в местах точечной сварки кузова.

Щелевая коррозия может возникать и при погружении металла в электролит, а также в атмосферных условиях.

Чувствительны к щелевой коррозии пассивирующиеся металлы (нержавеющие стали и алюминиевые сплавы). Вибрации и относительные микросмещения поверхностей повреждают образующуюся защитную пленку в щели, способствуют ее удалению и повышают интенсивность коррозии в щели.

*Питтинговая коррозия* возникает на поверхности металла под воздействием среды, содержащей активизирующие анионы. В этом случае металл корродирует на отдельных небольших участках поверхности, но процесс развивается так быстро, что за короткий период в стенках образуются сквозные отверстия. К питтинговой коррозии склонны железо, алюминий, магний, никель и сплавы на их основе. Активирующие анионы всегда присутствуют в воде. Смысл действия активирующих анионов сводится к тому, что они, адсорбируясь на участках поверхности, вытесняют пассивирующий кислород, а затем участвуют в процессе растворения металла.

Питтинговая коррозия проявляется в виде отдельных пятен (когда диаметр поражения больше глубины); раковин (когда диаметр поражения примерно равен глубине проникновения); отдельных точечных поражений (когда диаметр поражения меньше глубины проникновения); нитей, преимущественно под неметаллическими защитными покрытиями; может быть сквозной, когда металл разрушается насквозь. Эта коррозия возникает в местах механического повреждения лакокрасочного покрытия вследствие ударов щебня или гравия, на тормозных трубопроводах, изготовленных из стали с защитным слоем меди, а также на деталях, имеющих декоративные хромоникелевые покрытия.

Исключение из окружающей среды активирующих анионов; повышение чистоты металла по включениям и примесям; легирование сплавов молибденом, кремнием, ванадием снижают скорость питтинговой коррозии.

*Ножевая коррозия* возникает в зоне оплавления сварных соединений в сильноагрессивных средах.

*Подслойная коррозия* является следствием пористости и гидроскопичности неметаллических (лакокрасочных) покрытий, через которые к поверхности металла проникают коррозионно-активные вещества. Подслойная коррозия начинается с поверхности, но преимущественно распространяется под поверхностью металла и вызывает вспучивание и расслоение металла.

*Межкристаллитная коррозия* возникает по границам зерен металлической структуры из-за различий в химическом составе зерна и границы. Пластичность и прочность материала резко ухудшаются, и он может рассыпаться в порошок. Чаще всего межкристаллитной коррозии подвержена нержавеющая сталь, особенно сварные швы. Коррозионные свойства нержавеющих сталей зависят от содержания в них хрома. Введение этого

элемента в сталь в количестве 12 % и более на несколько порядков повышает ее коррозионную стойкость даже по сравнению с легированной, в которой 11 % хрома.

Для снижения интенсивности межкристаллитной коррозии целесообразно уменьшать содержание углерода в стали до 0,01 %; вводить в сталь стабилизирующие элементы (титан, тантал и др.), способствующие связям углерода в тугоплавкие карбиды; применять термическую обработку изделий, способствующую разложению карбидов хрома.

*Химическая коррозия* – процесс взаимодействия металла со средой, не проводящей электрического тока; она протекает при взаимодействии металлов с сухими газами, парами и жидкими неэлектролитами.

При химической коррозии металлы и сплавы разрушаются без электрического тока, а продукты коррозии, как правило, остаются на поверхности металла или сплава. Примером химической коррозии может служить взаимодействие металла с кислородом, особенно при высоких температурах, с галогенами, сероводородом, сернистым газом (разрушение гильз цилиндров, поршней и колец двигателей, выхлопных труб и т.д.).

По химическому признаку протекает и коррозия металла в жидкостях, способных химически взаимодействовать с металлом и не проводящих электрического тока. Например, металлы могут разрушаться в полностью обезвоженной нефти и продуктах ее переработки, если в среде находятся соединения, химически взаимодействующие с данным металлом: сероводород, серосодержащие продукты и т.д.

Чистая металлическая поверхность легко подвергается химическому воздействию среды. Однако, если в процессе начавшейся коррозии продукты ее образуют прочно связанную с металлом пленку, изолирующую поверхность от коррозионной среды, то металл приобретает пассивность по отношению к ней. Процесс искусственного образования тонких окисных пленок на поверхности металла для защиты его от коррозии и придания изделию лучшего вида называют *пассивированием*. Способностью к пассивированию обладают железо, никель, хром, алюминий и другие металлы.

*Электрохимическая коррозия* – процесс взаимодействия металлов с электролитами (водой или водными растворами кислот, щелочей и солей, а также с неводными электролитами). При электрохимической коррозии разрушение металла связано с возникновением и протеканием электрического тока с одних участков металла на другие в результате действия множества находящихся на поверхности микроскопических короткозамкнутых гальванических элементов, возникающих по причине неоднородности металлов или окружающей среды.



Электрохимическая коррозия возникает вследствие образования гальванического элемента, электродами которого являются различные металлы (сталь – алюминий, сталь – медь, сталь – цинк и пр.).

На скорость коррозии влияют температура (с повышением ее коррозия усиливается) и скорость омывания средой металлической поверхности; при значительной скорости среды коррозия усиливается под действием эрозии.

Электрохимическая коррозия сопровождается упорядоченным движением ионов, т.е. появлением электрического тока.

Силу коррозионного тока, от величины которого зависит интенсивность коррозии, определяют по закону Ома:

$$I_{\text{кор}} = (U_{\text{к}} - U_{\text{а}})/R, \quad (2.1)$$

где  $U_{\text{к}}$  и  $U_{\text{а}}$  – электродные потенциалы катода и анода;

$R$  – омическое сопротивление системы.

Появление тока коррозии имеет место при наличии разности потенциала ( $U_{\text{к}} - U_{\text{а}} > 0$ ) и электропроводящей среды, т.е. электрохимическая коррозия имеет место при наличии в системе неоднородных металлов (катода и анода) и окружающей среды в виде электролита. При этом образуется гальваническая пара, в которой один из металлов (анод) разрушается.

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

*Газовая коррозия* металла происходит в газах при высоких температурах. Это частный случай химической коррозии, который возможен только в условиях, исключающих электрохимические процессы. Особенность газовой коррозии – отсутствие на поверхности металла влаги. Этот вид коррозии металлов возникает при работе различных металлических деталей и аппаратов (двигатели внутреннего сгорания, элементы электронагревателей, газогенераторы), а также при термической обработке металла. На скорость газовой коррозии влияют температура и состав газовой среды. При повышении температуры скорость коррозии металлов и сплавов заметно возрастает, особенно в среде таких газов, как хлор, хлористый водород, сернистые соединения, окислы азота, окись углерода.

Газовой коррозии подвержены цилиндры двигателей внутреннего сгорания, выпускные клапаны, камеры сгорания газовых турбин. Среди процессов газовой коррозии наиболее часто встречается окисление металла при высоких температурах за счет кислорода воздуха или  $\text{CO}_2$  и  $\text{O}_2$  в продуктах сгорания топлива.

На поверхности углеродистой стали газовая коррозия проявляется в виде пленок окислов уже при температуре 200...300 °С. С повышением температуры примерно до 600 °С в связи с образованием под действием внутренних напряжений трещин в защитной пленке скорость коррозии возрастает. При дальнейшем подъеме температуры скорость коррозии резко увеличивается и образуется окалина. Скорость коррозии при возрастании температуры от 500 до 800 °С увеличивается в сухих газах в 11...13 раз и во влажных – в 20 раз. Скорость окисления в среде CO<sub>2</sub> выше, чем не только в воздухе (сухом и влажном), но и в O<sub>2</sub>.

Скорость коррозии зависит от скорости диффузии реагентов к поверхностям металла и продуктов реакции в обратном направлении.

*Атмосферная коррозия* – коррозия металлов в атмосфере воздуха, а также любого влажного газа. Она может быть сухой, влажной или мокрой. *Сухая атмосферная коррозия* протекает при полном отсутствии влаги на поверхности металла. Металл корродирует вследствие химического взаимодействия кислорода воздуха и других газообразных реагентов с его поверхностью. Обычно это не приводит к заметному разрушению металла, а лишь к потере его декоративных свойств.

*Влажная атмосферная коррозия* возникает при относительной влажности воздуха ниже 100 %, когда на поверхности металла появляется невидимый слой влаги, образующийся вследствие конденсации. При этом скорость коррозии зависит в значительной степени от относительной влажности окружающего воздуха и состояния поверхности металла. С увеличением относительной влажности толщина адсорбционного слоя электролита на поверхности металла возрастает, и по мере этого возрастает (неравномерно) скорость атмосферной коррозии. Влажность, при которой резко ускоряется коррозия, принято называть критической. Для железа и стали величина критической влажности находится в пределах 63...65 %. Выше нее на поверхности металла возникают адсорбционные слои влаги, служащие растворителями агрессивных компонентов атмосферы.

*Мокрая атмосферная коррозия* возникает при непосредственном попадании дождя, снега на металл или при 100 %-й относительной влажности воздуха. Толщина образующихся при этом пленок влаги зависит от ориентации металла относительно земли и может изменяться в широком диапазоне.

При атмосферной коррозии скорость зависит от слоя влаги на поверхности; если скорость сухой атмосферной коррозии принять за 100 %, то этот показатель для влажной составит 300 %, для мокрой – 400 %, в электролите – 250 %.

Большое влияние на атмосферную коррозию металлов оказывает температура. При переходе от отрицательных к положительным значениям температуры коррозионная агрессивность повышается вследствие более

интенсивного протекания электрохимических процессов. Дальнейшее же повышение температуры, как правило, замедляет коррозию, так как уменьшает относительную влажность, снижает растворимость газов в воде, способствует высыханию поверхности металла. А вот комбинированное воздействие повышенной температуры и высокой влажности резко ускоряет коррозионный процесс.

В коррозионных процессах большую роль играет состав атмосферы. При одной и той же степени увлажнения металла скорости коррозии могут быть различными. Это зависит от вида и концентрации примесей воздуха. Примеси, растворяясь, превращают чистый конденсат в раствор сильных электролитов.

По характеру химических и электрохимических свойств примеси атмосферы можно классифицировать как солевые, кислотные, окислительно-восстановительные и смешанные.

К первой группе относятся, например, основные компоненты солевого состава морской воды: хлориды, сульфаты, бромиды, йодиды. Для них характерна высокая степень диссоциации, приводящая к снижению омического сопротивления пленки электролита и образованию легкорастворимых продуктов коррозии, вследствие чего скорость разрушения металла возрастает.

Кислотные примеси характерны для атмосферы промышленных районов. Присутствующие в ней пары сернистой, серной, соляной и других кислот активно стимулируют коррозию.

Окислительно-восстановительными примесями являются сернистый газ и окислы азота. При их наличии коррозия металла протекает с большой скоростью и без кислорода.

К смешанной группе относятся соединения твердой, жидкой и газообразной фаз, широко распространенные в природе. Здесь особая роль принадлежит твердым частицам (соль, уголь, песок и др.), которые повышают электропроводность электролита, обеспечивают адсорбцию различных газов и влаги из воздуха, увеличивают конденсацию влаги.

На развитие процессов коррозии влияют сами продукты коррозии. В зависимости от природы металла и примесей в воздухе продукты коррозии, образующиеся на поверхности металла, обладают различными физико-химическими свойствами. В одних случаях они замедляют развитие коррозии (например, при формировании нерастворимых соединений типа гидроокисей), в других ускоряют (если образуются растворимые соединения). При этом существенную роль играют гигроскопичность и адсорбционная способность продуктов коррозии. Предполагают, что повышенная чувствительность продуктов коррозии к влаге и агрессивным примесям в воздухе может приводить к интенсивному течению коррозионных процес-

сов даже в условиях, где чистая поверхность металла сохраняет пассивное состояние.

*Жидкостная коррозия* металла происходит в жидкой среде: в неэлектролите (органические растворители, жидкое топливо) и в электролите (кислотная, щелочная, солевая, морская, речная коррозия, коррозия в расплавленных солях и щелочах). В зависимости от условий взаимодействия металла с жидкой средой различают коррозию при неполном погружении (металл частично погружен в жидкую коррозионную среду) и коррозию по ватерлинии (коррозия металла вблизи ватерлинии при неполном погружении его в жидкую коррозионную среду).

Коррозия металла в неэлектролитах, например в органических жидкостях, не обладающих электропроводностью, представляет собой разновидность химической коррозии. В данном случае она сводится к химической реакции между металлом и коррозионно-активными компонентами вещества, которыми могут быть сера и сернистые соединения (например, в нефти и продуктах ее переработки).

Характерной в этом отношении является коррозия стальных деталей двигателей, работающих на бензине. При этом скорость коррозии прямо пропорциональна процентному содержанию серы в бензине. При сгорании топлива продукты, содержащие серу, превращаются в сернистый газ, а тот, в свою очередь, взаимодействуя с парами воды, превращается в сернистую, а при контакте с кислородом воздуха – в серную кислоту, являющуюся сильным электролитом.

*Подземная коррозия* – это коррозия металлов в почвах и грунтах. Ее подразделяют на грунтовую, обусловленную электрохимическим взаимодействием подземных металлических сооружений с коррозионно-активным грунтом, и на коррозию, обусловленную действием подземных блуждающих токов. Скорость и характер грунтовой коррозии определяют такие факторы, как: наличие влаги, воздухопроницаемость и электропроводимость грунтов, их неоднородность по структуре, плотности, составу, влажности, кислотности, наличие микроорганизмов, температура грунта.

Различают высококоррозионные, среднекоррозионные и инертные в коррозионном отношении грунты. Грунтовая коррозия особенно велика в торфянистых, болотистых грунтах. Черноземы, содержащие органические кислоты, относительно высокоагрессивны к стали, меди, цинку, свинцу. Наиболее агрессивны подзолистые почвы. Скорость коррозии сталей в таких почвах в 5 раз выше, чем в других грунтах.

*Контактная коррозия* – электрохимическая, вызываемая контактом металлов, имеющих разные стационарные потенциалы в данном электролите. Два таких металла образуют в электролите гальванический элемент, действие которого влияет на скорость коррозии каждого из этих металлов. Более электроотрицательный металл обычно корродирует ускоренно, а

коррозия электроположительного металла ослабляется, а иногда полностью прекращается. Таким образом, для основного металла катодные контакты могут быть опасными, а анодные – защитными. Эффективность ускоряющего действия катодного контакта на коррозию основного металла зависит от природы этого металла и величины поверхности контакта.

Коррозия может возникать и при контакте металла с неметаллом. В этом случае она связана с выделением из неметалла коррозионно-активных компонентов или аккумулярованием неметаллическим материалом агрессивной среды.

*Коррозия под напряжением* образуется при одновременном воздействии коррозионной среды на металл и механических напряжений. В зависимости от характера и величины механических напряжений различают коррозионное растрескивание (при совместном действии агрессивной среды и постоянных растягивающих напряжений), коррозионную усталость (при совместном действии агрессивной среды и переменных по величине или знаку напряжений), коррозионную кавитацию (при ударном воздействии самой агрессивной среды на металлическую поверхность) и коррозионную эрозию (при одновременном воздействии агрессивной среды и истирающего действия других твердых тел на металлическую поверхность).

*Коррозионное растрескивание* (трещины) возникает в металле при одновременном воздействии агрессивной среды и механических напряжений (извне или остаточных напряжений). Особенно подвержены коррозионному растрескиванию высокопрочные стали и сплавы. Трещины могут развиваться между зернами или пересекать их. Коррозионному растрескиванию больше подвержены зоны, имеющие концентрацию растягивающих напряжений.

*Микробиологическая коррозия (биокоррозия)* – это процесс коррозионного разрушения металла в условиях воздействия микроорганизмов. Биокоррозия чаще протекает совместно с атмосферной или почвенной, в водных растворах или в неэлектролитах, инициирует и интенсифицирует их.

Биоповреждениям подвержены подземные сооружения, оборудование нефтяной промышленности, топливные системы самолетов, трубопроводы при контакте с почвой и водными средами, элементы конструкций машин, защищенные консервационными смазочными материалами и лакокрасочными покрытиями.

Биокоррозию подразделяют на *бактериальную*, протекающую в водных средах при наличии особого вида бактерий (в почве, воде, топливе) и *микологическую (грибную)* – в атмосферных условиях, при контакте с почвой, при увлажнении поверхности, при наличии загрязнений, спор, мицелия и продуктов жизнедеятельности грибов.

#### 2.2.4. Пути снижения интенсивности коррозии

Для уменьшения интенсивности коррозии черные металлы покрывают другими металлами, применяют консервационные материалы, наносят лакокрасочные покрытия (ЛКП).

*Применение ингибиторов.* Это способ торможения коррозии с помощью добавок (ингибиторов коррозии) в агрессивную среду, в технологический раствор, лакокрасочные покрытия, защитную смазку или упаковочную бумагу специальных веществ, задерживающих разрушение металла.

Этим методом можно успешно защищать практически любые металлы и почти в любых средах (воздух, агрессивные газы, морская и пресная вода, охлаждающие жидкости, нефть, нефтепродукты, щелочи, сильные окислители). Действие ингибиторов представляет собой сложный электрохимический процесс. Применение ингибиторов позволяет сохранять запасные части, на автотранспорте – продлевать срок службы ДВС.

Шампуни, предназначенные для мойки легковых автомобилей, в своем составе имеют ингибиторы коррозии, предотвращающие образование коррозии в трещинах на лакокрасочных покрытиях.

Чтобы уменьшить коррозию черных металлов, их поверхность можно покрывать как менее стойкими в коррозионном отношении металлами (анодные покрытия), так и более стойкими (катодные покрытия). В зависимости от этого покрытия будут по-разному выполнять свою защитную функцию.

*Анодные покрытия* – это такая защита, при которой электродный потенциал покрытия оказывается более отрицательным по отношению к металлу защищаемой конструкции.

При наличии царапин или пор в цинковом покрытии образуется гальваническая пара, в которой более отрицательным электрическим потенциалом обладает Zn, а менее активным металлом является Fe. Физическая сущность такой защиты заключается в следующем. Электроны более активного металла (Zn) перетекают на металл с меньшей активностью (Fe) и удерживают положительные катионы последнего от перехода в электролит. В результате замедляется разрушение конструкции. Железо в этой паре не корродирует до тех пор, пока не будет разрушен слой цинка в радиусе его действия.

Такой метод уменьшения интенсивности коррозии называют протекторной защитой. Эффективность протекторной защиты зависит не только от материала протектора, но и от электропроводности электролита: чем выше его проводимость, тем на большую поверхность распространяется защитное действие протектора.

Протекторы располагают у наиболее опасных в коррозионном отношении мест конструкции.

*Катодные покрытия* – это такая защита, при которой электродный потенциал покрытия оказывается более положительным по отношению к металлу защищаемой конструкции. При наличии царапины или трещины такое покрытие не только не защищает конструкцию от разрушения, но и, наоборот, ускоряет коррозию, так как в гальванической паре Sn–Fe более активным металлом является железо и коррозия распространяется под слой более благородного металла. При катодных покрытиях очень важно не допустить в них пор и трещин.

### 2.2.5. Старение материалов

*Старением материалов* называются процессы изменения их физико-механических свойств во времени в условиях длительного хранения или эксплуатации под влиянием окружающей среды и условий эксплуатации (температура, колебания температуры, влажность, солнечная радиация).

Старение обусловлено недостаточно стабильным (неравновесным) состоянием материала и постепенным его переходом в стабильное (равновесное) состояние. Старение материала может приводить как к улучшению, так и к ухудшению отдельных его свойств. Во многих случаях технологическими процессами предусматриваются операции искусственного старения материалов с целью улучшения их свойств.

К старению металлов и сплавов следует относить все процессы изменения во времени их свойств, связанные с превращениями металлов и сплавов в твердом состоянии.

Эти процессы можно разделить на две группы: превращения, связанные только с изменением кристаллической структуры, протекающие без изменения химического состава образующихся при превращении фаз; превращения, сопровождающиеся образованием фаз с измененным химическим составом.

Наибольшее практическое значение имеют процессы старения, связанные с распадом пересыщенных твердых растворов (процессы выделения) и распадом мартенситной структуры. Эти процессы обусловлены неустойчивой структурой сплава, получаемой в результате технологической обработки, например закалки, наклепа и др., и связанной с появлением искажений кристаллической решетки. Такое состояние характеризуется повышенным по сравнению со стабильным состоянием уровнем внутренней (свободной) энергии. Это способствует самопроизвольному переходу из нестабильного состояния в стабильное с более низким уровнем внутренней энергии, связанному с атомными перемещениями в решетке металла. Температура и деформации способствуют этим перемещениям.

Скорость распада резко увеличивается с повышением температуры отпуска, а время достижения метастабильного равновесия соответственно резко сокращается. Например, отпуск при 100 °С происходит в течение 1 часа, а при 20 °С – в течение 10 лет.

Старение технических полимерных материалов обусловлено в основном процессами, приводящими к *деструкции полимеров*, т.е. к распаду основных цепей макромолекул на осколки более простого строения или к изменению строения макромолекул и взаимодействия между ними без разрыва основной цепи (*структурированию*). Деструкция и структурирование оказывают прямо противоположное влияние на свойства полимеров. С ростом числа поперечных связей при структурировании уменьшается растворимость полимеров, теряются механические свойства, характерные для линейных полимеров: эластичность, вязкость и др.

Наибольшее техническое значение имеют процессы деструкции. Они происходят под влиянием физических (тепло, свет, ионизация и т.д.) или химических (кислород, вода и т.д.) факторов. Соответственно наиболее распространенными являются термическая, фотохимическая и окислительная деструкции. Физические изменения в полимерах связаны с перемещением макромолекул или их сегментов, а химические – с разрывом химических связей, уменьшением размеров макромолекул, часто сопровождаемым изменением их химического состава. Иногда эти процессы протекают одновременно.

При старении полимеров изменяются структура, молекулярный вес, химический состав, взаимодействие макромолекул, определяющие физико-механические свойства этих материалов: прочность, твердость, пластичность, эластичность, растворимость, диэлектрические свойства. В результате старения у неметаллических материалов снижаются прочность, эластичность, появляются трещины. Так, резинотехнические изделия теряют прочность и эластичность в результате окисления, термического воздействия (разогрев или охлаждение), химического воздействия масла, топлива и жидкостей, а также солнечной радиации и влажности.

В процессе эксплуатации свойства смазочных материалов и эксплуатационных жидкостей ухудшаются в результате накопления в них продуктов износа, изменения вязкости и потери свойств присадок. Детали и материалы изменяются не только при их использовании, но и при хранении: снижаются прочность и эластичность резинотехнических изделий; у топлива, смазочных материалов и жидкостей наблюдаются процессы окисления, сопровождаемые выпадением осадков.

#### 2.2.6. Тепловое разрушение

*Тепловое разрушение* происходит под действием теплового поля. Некоторые детали машин во время работы нагреваются, вследствие чего в них разрушается созданная ранее структура материала, и они теряют свои служебные свойства. К таким деталям относятся головки цилиндров, форкамеры, поршни, выпускные коллекторы и трубы.



Большому тепловому напряжению подвержены токопроводящие детали электрооборудования машин при коротком замыкании или замыкании «на массу» вследствие разрушения изоляции или обрыва проводов, обмоток. Детали, претерпевшие тепловое разрушение, восстановлению не подлежат.

Оплавление и разрушение поверхности деталей вызываются действием электромагнитного поля. Некоторые детали электрооборудования машин, проводящие ток, согласно кинематике механизмов, размыкаются и замыкаются или находятся друг от друга на определенном расстоянии. Между этими деталями периодически возникает искровой разряд. В этом случае электроны перемещаются с катода на анод. С поверхности анода уносятся частицы металла, которые частично рассеиваются в окружающей среде, а частично переносятся на катод. Такому виду разрушения подвержены электроды искровых свечей зажигания, контакты прерывателей и др. Эти детали обычно подлежат замене.

### 2.2.7. Другие причины потери работоспособности

*Потеря намагниченности.* Такие детали, как роторы магнето, генераторов переменного тока, и другие намагниченные детали, не изменяя своих геометрических размеров и целостности, теряют работоспособность вследствие потери магнитных свойств под воздействием накладываемых электрического и магнитного полей, а также силового поля путем встряски и вибрации. Работоспособность зависит и от действия теплового поля.

*Образование нагара* – образование твердых отложений под воздействием сильноперегретых газов и продуктов сгорания, что приводит к ухудшению условий теплопередачи и перегреву деталей.

*Образование накипи* – отложение солей магния и кальция на поверхностях деталей системы охлаждения двигателя в результате использования недистиллированной воды, что ухудшает теплопередачу и режим работы двигателя.

Такие детали, как листы рессор, пружины, торсионные валы, не изменяя своих размеров, *теряют упругость и форму* вследствие *перераспределения внутренних напряжений* под действием силового поля. Приданные служебные свойства деталей могут быть восстановлены путем проведения повторных операций (намагничивания роторов и термической обработки упругих деталей).

*Водородное разрушение* – это разрушение под нагрузкой в результате взаимодействия водорода с металлом. Оно может быть вызвано газообразным водородом высокого давления, хрупкостью, продуктами взаимодействия металла с адсорбированным водородом.

В процессе трения при разложении топлива, масла, водяного пара и деструкции полимеров в зонах контакта образуется атомарный водород,

который обладает большой активностью и проникающей способностью. Он перемещается в пространство между кристаллами металла, вступает в химические реакции с его атомами и образует хрупкие соединения гидриды. Кристаллическое зерно металла по своим границам охрупчивается и теряет прочность, что ведёт к ускоренному износу. Одновременно атомарный водород накапливается в межзеренном пространстве металла и превращается в молекулярный водород. В результате создается высокое давление, которое разрушает металл, образуются микротрещины.

*Водородное охрупчивание* – это охрупчивание металлов и сплавов под влиянием водорода, приводящее к уменьшению пластичности стали. Различают два вида водородного охрупчивания:

1) обусловленное источниками повышенного содержания водорода, имеющимися в исходном металле до какого-либо приложения напряжений;

2) вызванное источниками, возникающими в металле с повышенным содержанием водорода под действием напряжений или (и) пластической деформации, например диффузия атомов водорода в поле напряжений к дефектам кристаллического строения, насыщенных водородом из внешней среды, в частности в результате коррозии, изнашивания и др.

### 2.3. Теории трения и изнашивания

Наиболее частая причина потери работоспособности машин в процессе эксплуатации – это изнашивание их составных элементов (см. рис. 2.2).

Для объяснения природы трения и изнашивания при механическом истирании существует три теории, дополняющие и уточняющие друг

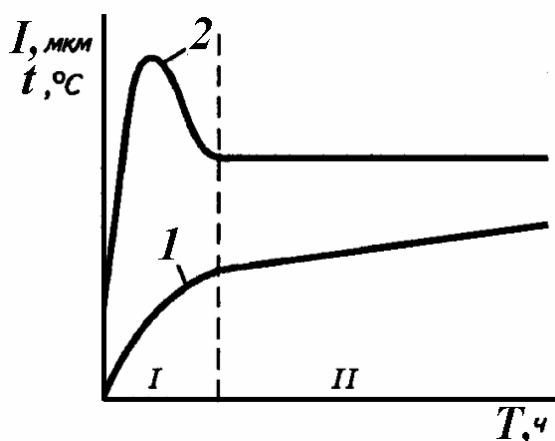


Рис. 2.9. Зависимости износа (1) и температуры (2) на поверхности трения от наработки (T):  
I – процесс приработки;  
II – нормальное изнашивание

друга. Их исходные положения сводятся в основном к механическому, молекулярному и молекулярно-механическому взаимодействиям между трущимися поверхностями. Отсюда и эти теории называют механической, молекулярной и молекулярно-механической.

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

Сближение шероховатых поверхностей приводит как к контакту микронеровностей, так и к взаимному проникновению микровыступов одной из поверхностей во впадины другой. В связи с различной высотой микронеровностей контактирующие микровыступы нагружаются по-разному; поэтому одни из них испытывают упругие деформации, другие – пластические. При относительном перемещении трущихся поверхностей имеют место все известные виды деформаций: смятие, сдвиг, изгиб.

Трущиеся детали соприкасаются не всей видимой поверхностью, а лишь микровыступами. Фактическая площадь касания, в зависимости от класса шероховатости, составляет 0,010...0,001 видимой поверхности. В силу этого удельные нагрузки на отдельные микровыступы достигают больших значений. Так, если в подшипниках коленчатых валов автотракторных двигателей среднее расчетное давление составляет 4 МПа, то фактическое давление на микровыступах может достигать 400...4000 МПа. При таком давлении в контактных точках возникают температурные вспышки локального характера (1000 °С) и происходит сваривание микровыступов с почти мгновенным разрывом мостиков сварки.

Показанный характер износов подтверждается на практике в виде задиров и наплывов на трущихся поверхностях. С течением времени фактическая площадь касания увеличивается. Идет процесс приработки.

В период приработки происходит изменение старых микронеровностей, полученных при механической обработке, с образованием новых. Значительная часть работы трения (70,..80 %) переходит в теплоту; поэтому температура на поверхностях трения резко подскакивает (I период на кривой изнашивания (см. рис. 2.9)).

При установившемся трении тепловой баланс стабилизируется и соединение приобретает некоторую среднюю температуру, соответствующую II периоду нормального изнашивания.

Благодаря тому, что процесс изнашивания делится на два основных периода (первоначальной приработки и нормального изнашивания), механическая теория получила довольно стройный вид. Однако, если считать, что изнашивание – следствие лишь процессов деформации и разрушения поверхностных слоев при механическом взаимодействии микронеровностей, то невозможно объяснить, почему чисто обработанные поверхности в процессе трения и изнашивания приобретают определенную шероховатость и почему поверхности с высокими механическими свойствами при трении о мягкие поверхности изнашиваются.

Поэтому профессором Б.В. Дерягиным была выдвинута молекулярная теория трения и изнашивания.

*Молекулярная теория.* Эта теория исходит из допущения существования молекулярных сил взаимодействия между контактирующими

микровыступами. Существование молекулярной адгезии можно увидеть из эмпирической формулы Кулона

$$F = A + \mu N, \quad (2.2)$$

где  $F$  – сила трения;

$A$  – молекулярная составляющая силы трения;

$\mu$  – коэффициент трения;

$N$  – нормальная нагрузка.

При отсутствии нормальной нагрузки ( $N = 0$ ) поверхности трения все-таки взаимодействуют, так как сила трения при этом  $F > 0$  ( $F = A$ ).

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

Более полно физическую сущность явлений трения и изнашивания отражает *молекулярно-механическая теория*, предложенная И.В. Крагельским. Эта теория с учетом влияния на процесс изнашивания вида трения является общепризнанной.

## 2.4. Трение

*Внешнее трение* – явление сопротивления относительно перемещению, возникающее между двумя телами в зонах соприкосновения поверхностей по касательным к ним и сопровождаемое рассеиванием энергии.

По наличию относительного движения различают *трение покоя*, которое представляет собой трение двух тел при микроперемещениях до перехода к относительному движению и *трение движения*, т.е. трение двух тел, находящихся в относительном движении.

По наличию смазочного материала существует *трение без смазочного материала (сухое)*, т.е. трение двух тел при отсутствии на поверхности трения введенного смазочного материала любого вида, и *трение со смазочным материалом*, т.е. трение двух тел при наличии на поверхности трения введенного смазочного материала любого вида.

*Смазочный материал* – материал, вводимый на поверхности трения для уменьшения силы трения и (или) интенсивности изнашивания.

Действие смазочного материала, в результате которого между двумя поверхностями уменьшается сила трения и (или) интенсивность изнашивания называется *смазкой*.

*Процесс смазывания* – это подведение смазочного материала к поверхности трения.

Трение со смазочным материалом в зависимости от толщины слоя, разделяющего трущиеся поверхности, выделяют жидкостное и граничное.

*Жидкостное трение* имеет место при наличии промежуточного слоя смазки, полностью разделяющего трущиеся поверхности. Процессы трения и изнашивания характеризуются при этом не материалом трущихся деталей, а вязкостью смазочного слоя, конструкцией и режимом работы соединения.

Минимальная толщина слоя смазочного материала, обеспечивающего жидкостное трение, определяется по выражению

$$h_{\min} = \frac{d^2 \cdot \eta \cdot n}{18.36 \cdot p \cdot S \cdot C}, \quad (2.3)$$

где  $d$  – диаметр вала, м;

$\eta$  – абсолютная вязкость масла, Н·с/м<sup>2</sup>;

$n$  – частота вращения вала;

$p$  – удельная нагрузка на вал, Па;

$S$  – зазор (разность диаметров подшипника и вала), м;

$C$  – поправка на конечную длину подшипника,

$$C = 1 + d/L;$$

здесь  $L$  – длина шипа, м.

При уменьшении толщины масляного слоя трущиеся поверхности сближаются. Когда в процессе сближения они разделяются не слоем смазки, а масляной пленкой молекулярной толщины, наступает граничное трение.

*Граничное трение* возникает под действием молекулярных сил трущихся поверхностей, смазочное вещество прочно адсорбируется на поверхностях трения. Полярные концы молекул смазочного вещества образуют на поверхностях трения «молекулярный частокол».

При граничном трении трущиеся детали разделены молекулами масла, адсорбированными на поверхности металла толщиной, равной десятой доли микрометра.

Граничная фаза масляной пленки, находясь под двусторонним воздействием молекулярных сил, приобретает квазитвердое состояние с расклинивающим давлением, оказывающим сильное сопротивление образованию металлического контакта; скользкое состояние, напоминающее мыло, смоченное водой. Указанные свойства предохраняют трущиеся поверхности от разрушения.

*По характеру относительного движения* возможно трение качения, представляющее собой трение движения двух твердых тел, при котором их скорости в точках касания одинаковы по величине, и *трение скольжения*, т.е. трение движения двух твердых тел, при котором скорости тел в точках касания различны по величине и направлению.

*Скорость скольжения* – разность скоростей тел в точках касания при скольжении.

*Сила сопротивления* при относительном перемещении одного тела по поверхности другого под действием внешней силы, направленной по касательной к общей границе между этими телами, называется *силой трения*.

*Наибольшая сила трения покоя* – сила трения покоя, любое превышение которой ведет к возникновению движения.

Трение может быть охарактеризовано следующими параметрами: силой трения  $F_{\text{тр}}$ , площадью фактического контакта, скоростью относительного перемещения деталей, коэффициентом трения  $\mu = F_{\text{тр}}/P$ , где  $P$  – нагрузка.

Наиболее опасным считают трение ювенильных (обнаженных, чистых, без окислов) поверхностей материалов. Оно относится к трению без смазочного материала и характеризуется непосредственным взаимодействием между твердыми телами при отсутствии между ними третьей фазы (например оксидной пленки), способной выполнять смазочную функцию. Ювенильная поверхность несет значительный запас свободной поверхностной энергии и, следовательно, характеризуется высокой адсорбционной способностью. Коэффициент трения при взаимодействии ювенильных поверхностей весьма высок. Их трение и сопровождается схватыванием поверхностей (заеданием).

Металлическая поверхность может сохранять ювенильные свойства лишь в условиях высокого вакуума или в атмосфере инертного газа, что встречается при износе деталей в случаях, когда отделяются оксидные пленки и твердые тела вступают в непосредственный контакт. Такое явление имеет место при трении деталей из однородных материалов, например сталь по стали.

## 2.5. Явление безызносности – избирательный перенос

При исследовании технического состояния узлов трения самолетов на разных этапах их эксплуатации было обнаружено явление самопроизвольного образования тонкой пленки меди на поверхностях деталей тяжело нагруженных узлов при работах пары трения «сталь – бронза» при смазывании спиртоглицериновой смесью. Пленка меди толщиной 1...2 мкм в процессе трения покрывала как бронзу, так и сталь. Она резко снижала износ пары трения и уменьшала силу трения примерно в 10 раз.

Исследования показали, что медная пленка образуется в результате анодного растворения бронзы: легирующие элементы уходят в смазочный материал, а поверхность обогащается медью. После того как поверхность бронзы и стали покроется медью, растворение прекращается, устанавливается режим избирательного переноса.

Образовавшуюся защитную пленку называют «сервовитной». Она представляет собой металл, образованный потоком энергии и существующий в процессе трения. При деформировании сервовитная пленка не разрушается и не подвергается усталостному разрушению.

Исследованиями установлено, что пленка толщиной 1...2 мкм имеет рыхлую, пористую структуру. Под сервовитной пленкой на границе со сталью имеется слой окислов меди, легирующих элементов или примесей толщиной около 0,1 мкм. В самом верхнем слое пленки нет скоплений дислокаций, т.е. нет повреждений, приводящих к разрушению поверхности. Установлено, что материал пленки находится в состоянии, подобном расплавленному. Она не способна к наклепу, имеет малые сдвиговые усилия, пориста. Пленка в верхней части не имеет окислов, способна к схватыванию без образования повреждений и увеличения сил трения. Трение бронзы о сталь в условиях избирательного переноса можно уподобить скольжению тела по льду, при котором жидкостное трение вместо воды обеспечивает пленка расплавленного металла.

Избирательный перенос проявляется при трении стали по стали, по чугуноу, по стеклу, по бронзе и другим материалам.

*Избирательный перенос* – это комплекс физико-химических явлений на контакте поверхностей при трении, который позволяет преодолеть ограниченность ресурса трущихся сочленений машин и снизить потери на трение.

Можно считать, что избирательный перенос – особый вид трения, который обусловлен самопроизвольным образованием в зоне контакта неокисляющейся тонкой металлической пленки с низким сопротивлением сдвигу и неспособной наклепываться.

К факторам, обуславливающим безызносность, относятся:

- контактирование поверхностей происходит через мягкий слой металла, основной металл испытывает пониженное на порядок (в 10 раз) давление;
- металлическая пленка при деформации в процессе трения не наклепывается и может многократно деформироваться без разрушения;
- трение происходит без окисления поверхностей, эффект Ребиндера, т.е. эффект адсорбционного понижения прочности твёрдых тел, облегчение деформации и разрушения твёрдых тел вследствие обратимого физико-химического воздействия среды, реализуется в большей степени;
- продукты износа переходят с одной трущейся поверхности на другую и обратно, в зоне трения продукты износа удерживаются электрическими силами.

Если в процессе трения будут созданы условия, при которых происходило бы обеспечение сервовитной пленки на постоянном уровне (толщиной 1...2 мкм), то может обеспечиваться безызносное трение. Это

происходит, когда в смазочном материале находятся присадки на основе меди.

Избирательный перенос позволяет: при изготовлении машин экономить металл (15...20 %) за счет большей грузоподъемности (в 1,5...2,0 раза) пар трения; увеличить срок работы машин (в 2 раза), сократить период приработки двигателей (в 3 раза) и редукторов (до 10 раз), соответственно сократить расход электроэнергии; в подшипниках скольжения и качения уменьшить расход смазочных материалов (до 2 раз); повысить КПД глобоидных редукторов с 0,70 до 0,85, винтовой пары – с 0,25 до 0,50; увеличить экономию драгоценных металлов в приборах в 2...3 раза за счет большей надежности электрических контактов.

## 2.6. Изнашивание деталей машин

Процесс изнашивания возникает под действием трения, зависящего от материала и качества обработки поверхностей, смазки, нагрузки, скорости относительного перемещения поверхностей и теплового режима работы сопряжения.

*Изнашивание* – это процесс разрушения и отделения материала с поверхности детали и (или) накопления ее остаточной деформации при трении, проявляющейся в постепенном изменении размеров и формы деталей.

Результат изнашивания, определяемый в установленных единицах, называется *износом* ( $I$ ). Величина износа может выражаться в единицах длины, объема, массы и др.

Свойство материала оказывать сопротивление изнашиванию в определенных условиях трения, оцениваемое величиной, обратной скорости изнашивания или интенсивности изнашивания, называется *износостойкостью*.

*Интенсивность изнашивания* – это отношение износа ( $dI$ ) к наработке ( $dL$ ), за которую он произошел  $U = dI/dL$ .

*Скорость изнашивания* – это отношение износа ( $dI$ ) ко времени ( $dt$ ), за которое он произошел  $U = dI/dt$ .

Процесс увеличения износа может иметь различные закономерности. Классическая кривая износа деталей сопряжения (рис. 2.10) имеет три периода. Период приработки (1), в котором изнашивание протекает наиболее интенсивно.

*Приработка* – это процесс изменения геометрии поверхностей трения и физико-механических свойств поверхностных слоев в начальный период трения, обычно проявляющийся при постоянных внешних условиях в уменьшении силы трения, температуры и интенсивности изнашивания. В определенной мере этот процесс объясняется изменением фактической площади контакта трущихся поверхностей. Первоначальная площадь



контакта определяется шероховатостью поверхности, созданной последней обработкой детали при ее изготовлении. Эта площадь постепенно увеличивается за счет деформации поверхности при трении от минимальной до расчетной. В результате чего давление в зоне контакта деталей снижается, и, соответственно, уменьшаются износ и интенсивность изнашивания.

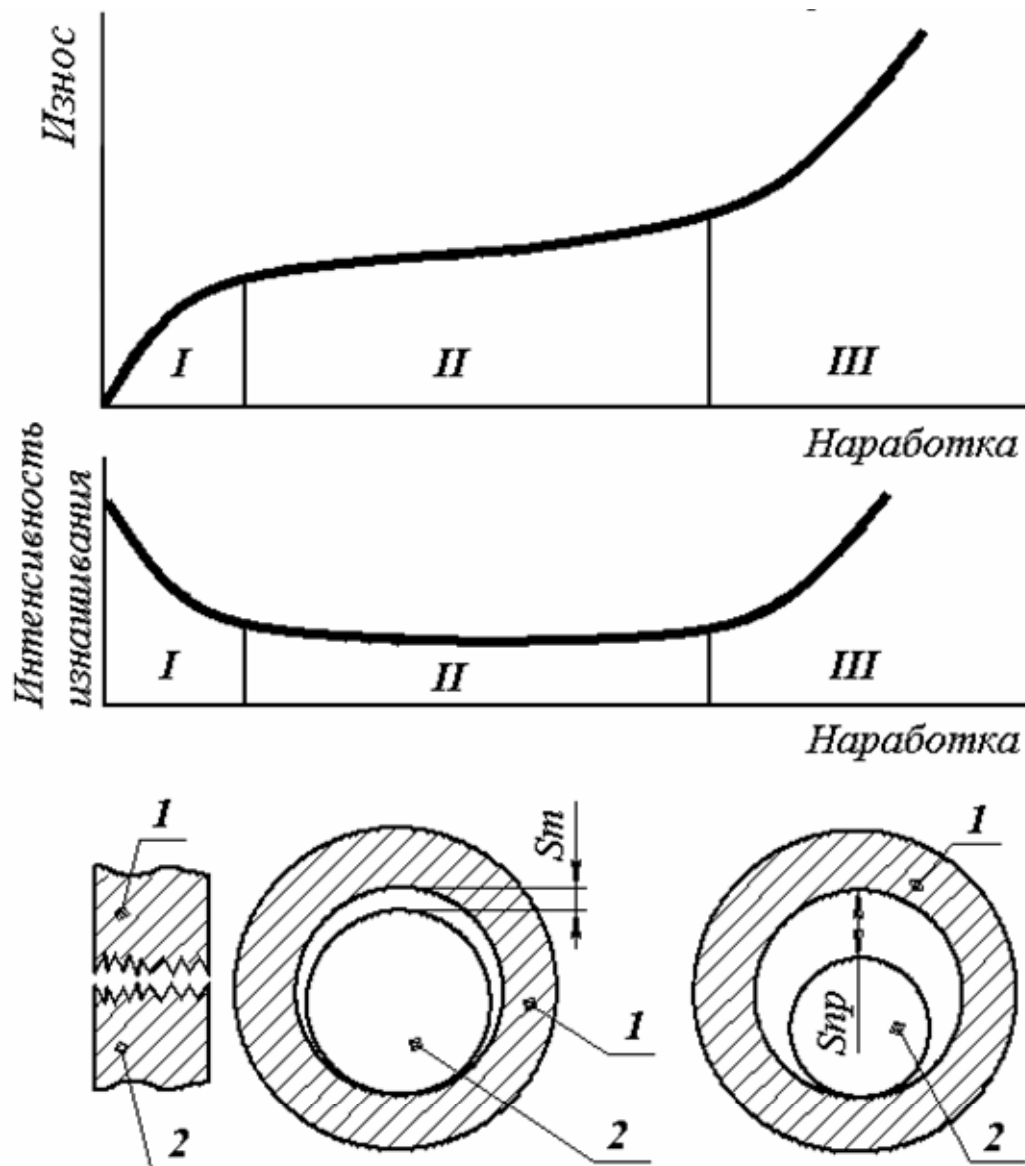


Рис. 2.10. Классическая кривая зависимости износа от наработки (I – период приработки, II – нормальная эксплуатация, III – аварийная эксплуатация, 1 – втулка, 2 – вал)

Весьма важно для обеспечения расчетной долговечности узла создать такие скоростные и нагрузочные условия, чтобы к концу приработки износ деталей сопряжения не превысил заданного конструктором значения.

Изнашивание на участке II (см. рис. 2.10) называется *нормальным (естественным) изнашиванием*. Оно характеризуется постоянством условий работы трения и интенсивности изнашивания деталей сопряжения.

Однако постепенное изменение размеров деталей приводит к увеличению зазора ( $S_T$ ) между ними.

После достижения предельного значения зазора ( $S_{пр}$ ) между трущимися поверхностями происходит ухудшение режима смазывания, рост динамических нагрузок. Поэтому для дальнейшей эксплуатации сопряжения характерно резкое увеличение износа и интенсивности изнашивания. Соответственно, период III называется *аварийной эксплуатацией*.

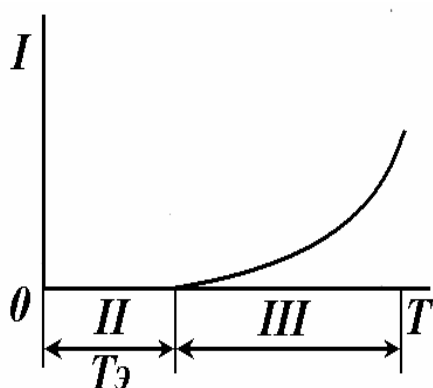


Рис. 2.11. Зависимость износа от наработки деталей неподвижного соединения

Детали сопряжения с гарантированным натягом (шейка вала – кольцо подшипника, шпоночное соединение, заклепочное соединение и др.) не имеют участка приработки, интенсивное нарастание их износа наступает по истечении наработки  $T_э$ , т.е. когда соединение из неподвижного становится подвижным (рис. 2.11).

Так изнашиваются и сопряжения деталей, износ которых наступает в результате усталостного разрушения поверхностных слоев металла, например беговых дорожек колец подшипников качения. У этих деталей отсутствует период приработки и нет явно выраженного участка аварийного износа.

Кривая, характеризующая износ указанных деталей, будет отличаться продолжительностью периода нормальной эксплуатации и крутизной участка кривой III периода, отражающей нарастание скорости изнашивания.

На интенсивность изнашивания влияют скорость и нагрузка в зоне трения. Существует критическое значение давления в зоне контакта ( $P_{кр}$ ), при котором происходит разрушение не только масляной пленки между трущимися деталями, но и вторичных структур (окислов, закислов, эктектик металла с кислородом), которые отделяют ювенильные поверхности деталей и предотвращают схватывание. До этого значения давления интенсивность изнашивания изменяется незначительно (рис. 2.12), а при его

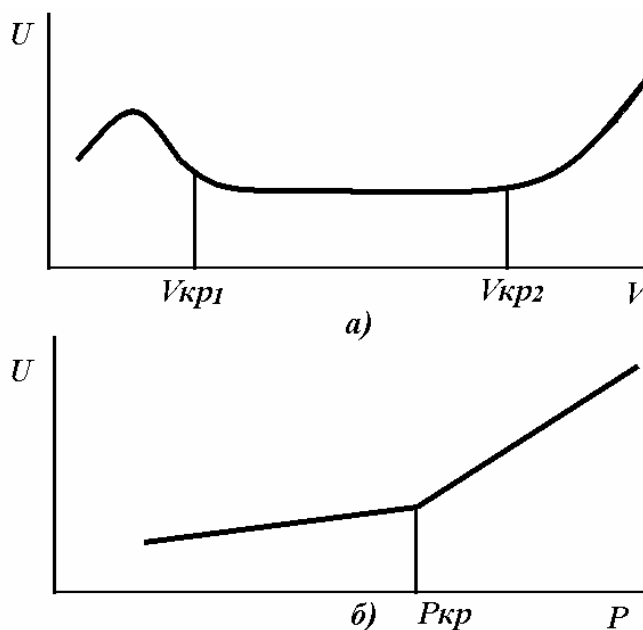


Рис. 2.12. Зависимости интенсивности изнашивания от скорости скольжения (а) и давления в зоне трения (б)

превышении резко возрастает, так как меняется физическая сущность процесса изнашивания. Интенсивность изнашивания имеет два критических значения и скорость относительного перемещения деталей, при которых интенсивность изнашивания резко изменяется.

При скорости, меньшей первой критической скорости ( $V_{кр1}$ ), и при давлении в зоне контакта, превышающем критическое ( $P_{кр}$ ), интенсивность изнашивания в начале резко возрастает (см. рис. 2.12), а затем снижается. Это объясняется изменением условий возникновения локальных металлических связей: при малых скоростях эти условия наиболее благоприятны для диффузии металлов. С повышением скорости относительного перемещения процесс диффузии атомов металла одной детали в кристаллическую решетку атомов другой становится менее интенсивным.

Между первым и вторым критическими значениями скоростей интенсивность изнашивания стабилизируется: происходит допустимое окислительное изнашивание деталей.

Превышение второго критического значения скорости приводит к резкому возрастанию температуры в зоне трения, возникновению контакта ювенильных поверхностей деталей, размягчению металла и намазыванию менее твердого металла на более твердый, т.е. к схватыванию второго рода, сопровождаемому резким возрастанием износа и интенсивности изнашивания.

## 2.7. Виды изнашивания

В зависимости от основных процессов, происходящих при изнашивании выделяют механическое, коррозионно-механическое и эрозионное изнашивание (рис. 2.13).

В зависимости от интенсивности и результатов процесса различают допустимое изнашивание, для которого характерны незначительные интенсивность и повреждаемость деталей. Оно является естественным, его невозможно исключить, как невозможно исключить трение в механизмах. К допустимым видам изнашивания относят окислительное изнашивание и механохимическую форму абразивного изнашивания.

Недопустимые виды изнашивания имеют скорость изнашивания, глубину разрушающегося слоя, коэффициент трения, в несколько раз превышающие данные показатели допустимых видов изнашивания.

К механическим видам изнашивания относят абразивное, усталостное и молекулярно-механическое (изнашивание при заедании, фреттинг-процесс).

Эрозионное изнашивание включает электроэрозионное изнашивание, гидрогазоэрозионное и изнашивание под воздействием кавитации.

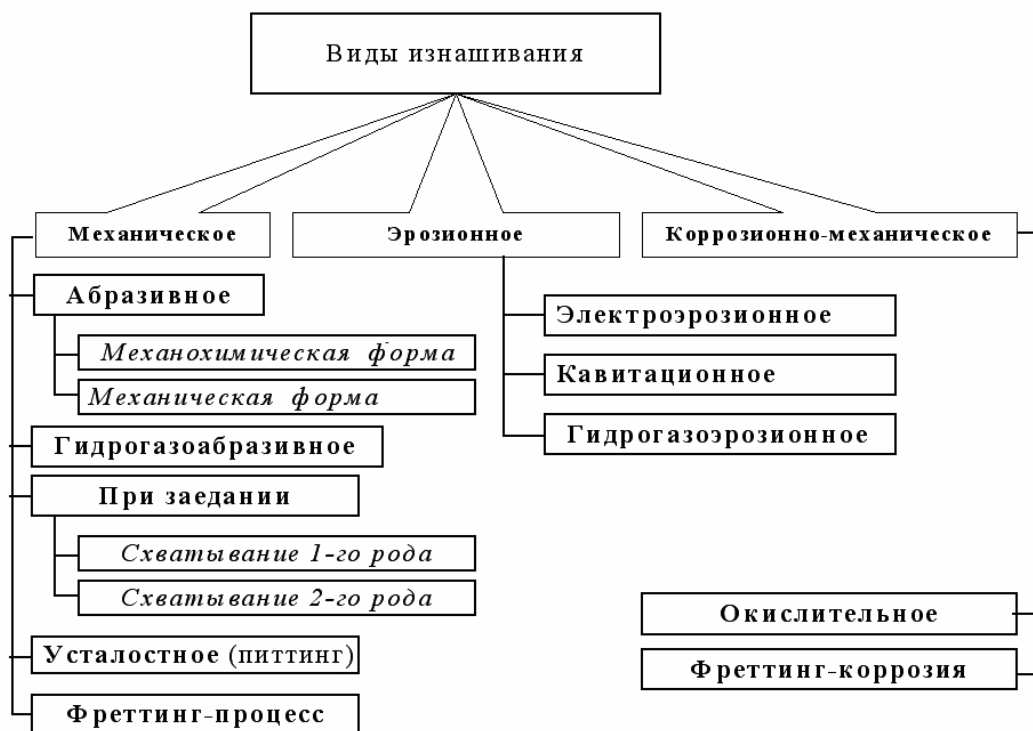


Рис. 2.13. Виды изнашивания деталей

Коррозионно-механическое, где ведущим процессом, приводящим к разрушению, является процесс взаимодействия металла с агрессивной средой, представлено окислительным изнашиванием пленкой кислородного и неокислородного происхождения и фреттинг-коррозией.

### 2.7.1. Окислительное изнашивание

Окислительное изнашивание происходит в результате сочетания механического изнашивания и агрессивного воздействия среды, под действием которой на поверхности трения образуются непрочные пленки окислов, которые снимаются при механическом трении, а обнажающиеся поверхности опять окисляются. Такое изнашивание наблюдается на деталях цилиндропоршневой группы, гидроусилителей, тормозной системы с гидроприводом и др.

*Окислительное изнашивание* – это процесс постепенного разрушения поверхностей деталей при трении, вызываемый взаимодействием активных, пластически деформированных тонких (10...100 нм) поверхностных слоев металла с атомами кислорода, который содержится в воздухе, смазке и адсорбируется на поверхностях. При данном виде изнашивания преобладает химическая реакция материала с кислородом или окисляющей окружающей средой. При этом образуются пленки химически адсорбированные, твердых растворов и химических соединений металла с кислородом, которые затем удаляются с поверхности трения. Особой характеристикой

окислительного изнашивания является одновременность протекания двух процессов: микропластической деформации и диффузии кислорода в пластически деформируемые объемы металла (рис. 2.14, а). При окислительном изнашивании на поверхности трения всегда есть масляная пленка, адсорбированная пленка и пленка окислов.

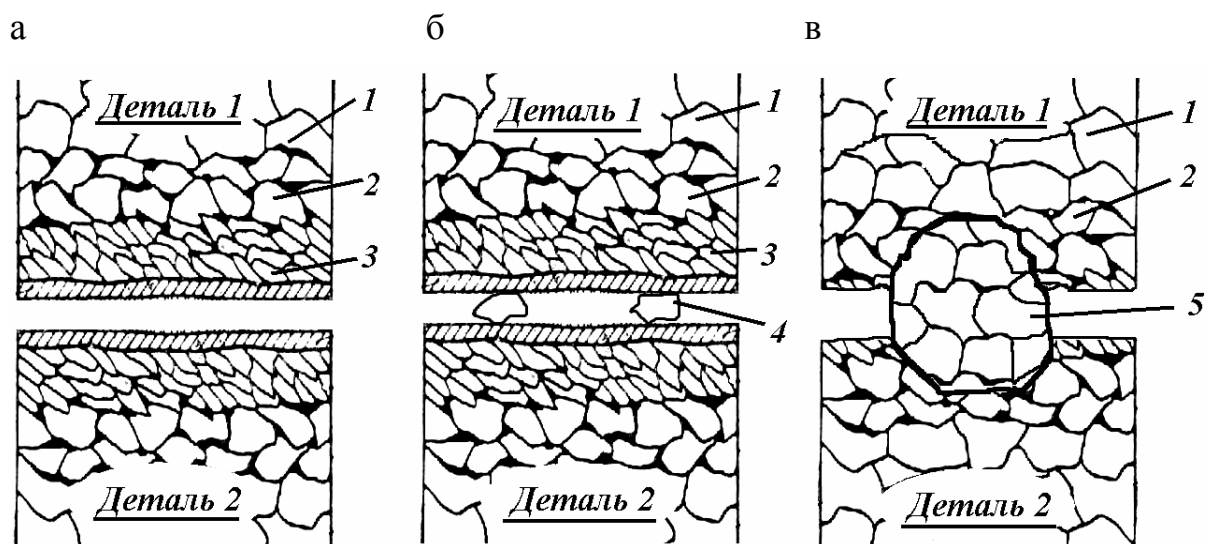


Рис. 2.14. Поверхностные слои деталей при окислительном (а), абразивном (б) и изнашивании при заедании (в):

1 – первичная структура металла детали; 2 – пластически деформированная первичная структура металла детали; 3 – вторичная структура металла детали; 4 – абразивная частица; 5 – локальная металлическая связь

Различают две формы окислительного изнашивания. При первой на поверхности трения образуются твердые растворы кислорода и тонкие эвтектики его соединений с металлом; при второй – химические соединения кислорода с металлом. В последнем случае также возможны две формы изнашивания. В первой оно происходит путем образования пластических пленок вторичных структур, перемещения их на поверхностях трения и непрерывного уноса из зоны контакта. Вторая форма характеризуется образованием хрупких пленок вторичных структур и периодическим их выкрашиванием, с отделением от поверхностей трения. Итак, при окислительном изнашивании постоянно происходят образование и разрушение тончайших пленок вторичных структур ( $\text{FeO}$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ , эвтектики  $\text{O}_2$  и  $\text{Fe}$ ).

Нормальное окислительное изнашивание возникает при трении скольжения и качения без смазочного материала и при граничной смазке. Давление в зоне контакта деталей при окислительном изнашивании не превышает критических значений разрушения масляных пленок и вторичных структур, а скорость скольжения при сухом трении составляет 1...4 м/с, при граничном – до 25 м/с.

## 2.7.2. Абразивное изнашивание

*Абразивное изнашивание* – это процесс разрушения деталей машин, обусловленный наличием абразивной среды в зоне трения (рис. 2.14 б).

Абразивным материалом именуют минерал естественного или искусственного происхождения, зерна которого имеют достаточную твердость и обладают способностью резания (скобления, царапания). Абразивным изнашиванием называют разрушение поверхности детали в результате ее взаимодействия с твердыми частицами при наличии относительной скорости.

В роли таких частиц выступают:

- неподвижно закрепленные твердые зерна, входящие в контакт по касательной либо под небольшим углом атаки к поверхности детали;
- незакрепленные частицы, входящие в контакт с поверхностью детали (например, насыпные грузы при их транспортировании соответствующими устройствами, абразивные частицы в почве при работе почвообрабатывающих машин и т.д.);
- свободные частицы, пребывающие в зазоре сопряженных деталей;
- свободные абразивные частицы, вовлекаемые в поток жидкостью или газом.

Твердые (абразивные) частицы могут образовываться и в самой машине в виде закаленных частиц металла – продуктов износа соединенных пар трения.

Абразивному изнашиванию подвергаются детали сельскохозяйственных, дорожно-строительных, горных, транспортных машин и транспортирующих устройств, узлы металлургического оборудования, металлорежущих станков, шасси самолетов, рабочие колеса и направляющие аппараты гидравлических турбин, лопатки газовых турбин, трубы и насосы земснарядов, бурильное оборудование нефтяной и газовой промышленности и т.п.

На процесс абразивного изнашивания могут влиять природа абразивных частиц, агрессивность среды, свойства изнашиваемых поверхностей, ударное взаимодействие, нагрев и другие факторы. Общим для абразивного изнашивания является механический характер разрушения поверхности.

Интенсивность абразивного изнашивания особенно велика у машин, эксплуатируемых в условиях запыленного воздуха, при недостаточной герметичности уплотнений. Двигатель с неисправным воздухоочистителем теряет компрессию через несколько часов и выходит из строя в результате форсированного износа поршневых колец и зеркала цилиндров. Накопление пыли в смазочном материале до 0,25 % по массе приводит к отказу подшипников качения за 1000 ч при нормативной долговечности, в 10 раз большей.

Абразивные частицы ведут себя в зависимости от твердости поверхностей соединенных деталей. Когда одна из трущихся поверхностей изгото-

влена из мягкого материала, абразивные частицы поглощаются этой поверхностью, что при малой концентрации абразивных частиц в смазочном материале предохраняет твердую поверхность от износа. С течением времени мягкая поверхность насыщается абразивными частицами и превращается в своеобразный абразивный инструмент, который царапает соединенный вал.

Если обе соединенные поверхности имеют значительную твердость, то абразивные частицы, попадая в зазор между ними, или царапают их, или разрушаются, не повреждая ни ту, ни другую.

Все зависит от соотношения твердостей соединенных поверхностей и абразива. Степень агрессивности абразивных частиц по отношению к изнашиваемым поверхностям оценивают коэффициентом твердости

$$K_T = \frac{H_M}{H_A}, \quad (2.4)$$

где  $H_M$  – микротвердость материала детали;

$H_A$  – микротвердость абразива.

Профессором М.М. Тененбаумом установлено критическое значение коэффициента твердости, равное 0,6.

В зависимости от коэффициента твердости различают две формы абразивного изнашивания:

➤ *механохимическую форму*, при которой абразивные частички разрушают лишь вторичные структуры на поверхности трения, не воздействуя на первичные из-за недостаточной их твердости. Коэффициент твердости в этом случае превышает 0,6. Механизм механохимической формы абразивного изнашивания включает в себя механический контакт и упругопластическую деформацию, активацию – образование слоя деформированного активированного металла, мгновенное пассивирование – взаимодействие активированного металла с химически активными компонентами среды (образование ослабленных вторичных структур), разрушение вторичных структур механическими воздействиями;

➤ *механическую форму*, которая предполагает внедрение абразивных частиц и разрушение поверхностных слоев как без отделения металла, так и со снятием микростружки при коэффициенте твердости  $K_T < 0,6$ .

При взаимодействии с абразивными частицами присутствует три основных вида разрушения поверхности детали: микрорезание (царапание), многократное деформирование (задир) и коррозионно-механическое истирание.

Микрорезание имеет место, когда твердость абразивных частиц значительно выше твердости материала. При этом износостойкость пропорциональна твердости материала. При микрорезании и пластическом деформировании образуется царапина. На ее дне происходит упрочнение

металлов и сплавов в результате наклепа. В случае микрорезания, как и при выдавливании металла с его последующим передеформированием, износостойкость определяется сопротивлением сдвигу, которое пропорционально микротвердости металла.

*Царапание* – образование углублений на поверхности трения в направлении скольжения при воздействии выступов твердого тела или твердых частиц.

*Гидрогазоабразивное* механическое изнашивание происходит в результате воздействия твердых частиц, находящихся в потоке жидкости и (или) газа на детали.

Гидрогазоабразивному виду разрушения подвержены плунжерные пары, гильзы цилиндров дизельных двигателей, трубопроводы и детали, работающие в потоках воды и смазочных масел. Интенсивность разрушения при газогидроабразивной эрозии зависит не только от энергии удара, твердости, прочности, размера и геометрии частиц в потоке жидкости или газов, но и от угла наклона вектора скорости абразивных частиц к поверхности детали (от угла атаки), она максимальна при угле атаки 30...70 °С.

### 2.7.3. Изнашивание при заедании

Изнашивание при заедании происходит в результате схватывания, глубинного вырывания материала, переноса его с одной поверхности на другую и воздействия возникших неровностей на сопряженную поверхность.



Рис. 2.15. Поршень, подвергшийся изнашиванию при заедании

*Схватывание* – это явление локального соединения двух твердых тел, происходящего вследствие действия молекулярных сил.

Таким образом, *изнашивание при заедании* – это процесс разрушения поверхностей трения, развивающийся в результате возникновения локальных металлических связей (рис. 2.14, в), их деформации и разрушения с отделением частиц металла или налипанием его на поверхности контакта. Оно приводит к задирам, заклиниванию и разрушению механизмов. Такое изнашивание обуславливается наличием местных контактов между трущимися поверхностями, на которых вследствие больших нагрузок и скоростей происходят разрыв масляной пленки, сильный нагрев и «сваривание» частиц



металла. При дальнейшем относительном перемещении поверхностей связи разрываются. Типичный пример – заклинивание коленчатого вала при недостаточной смазке.

*Задир* – повреждение поверхностей трения в виде широких глубоких борозд в направлении скольжения (рис. 2.15). Различают два вида изнашивания при заедании: схватывание 1-го и 2-го рода, которые происходят при различных режимах работы соединений.

*Схватывание 1-го рода* – при малых скоростях относительного перемещения деталей и давлении, превышающем предел текучести, при отсутствии разделяющего слоя смазки и защитной окисной пленки.

При *схватывании 2-го рода* возникают металлические связи, обусловленные нагреванием, размягчением, деформированием и контактированием ювенильных поверхностей при высоких скоростях относительного перемещения и значительных удельных давлениях.

Температура в зоне контакта близка к температуре плавления, что обуславливает деформацию поверхностей и выход на контакт ювенильных поверхностей (табл. 2.1). В результате происходят разупрочнение металла, отпуск, оплавление.

Т а б л и ц а 2 . 1

Характеристики видов изнашивания

Показатель изнашивания	Виды изнашивания						
	Окислительное изнашивание	механохимическая форма абразивного изнашивания	Механическая форма абразивного изнашивания	Изнашивание при схватывании 1-го рода	Изнашивание при схватывании 2-го рода	Фреттинг-процесс	Усталостное изнашивание
Интенсивность, мкм/ч	0,1	0,5	50	10–15	5	До 10	Нет данных
Глубина разрушающегося слоя, мм	0,001–0,010	0,1	0,5	3–4	1	0,5	До 5 мм
Температура, °С	До 200	До 50	До 50	До 100	До 1500	До 300	До 100
Коэффициент трения	0,01–0,1	0,05–0,30	Нет данных	0,5–4,0	0,1–1,0	0,1–1,0	Нет данных

#### 2.7.4. Усталостное изнашивание

*Усталостное изнашивание* состоит в том, что поверхностный слой материала в результате трения и циклической нагрузки становится хрупким и разрушается, обнажая лежащий под ним менее хрупкий материал. Такой вид изнашивания может наблюдаться на беговых дорожках подшипников, шестерен, зубьях. В результате происходят выкрашивание и отслаивание поверхности деталей.

*Выкрашивание* – образование ямок на поверхности трения в результате отделения частиц материала при усталостном изнашивании. *Отслаивание* – процесс отделения с поверхности трения материала в форме чешуек при усталостном изнашивании.

Усталостное изнашивание антифрикционного слоя происходит в подшипниках скольжения, подвергавшихся длительному нагружению переменными по направлению и величине усилиями. Присутствие смазочного материала не снижает интенсивности процесса.

Усталостные трещины (рис. 2.16) берут начало на поверхности трения и входят, сужаясь, в глубь слоя. Развиваясь по длине, мелкие трещины образуют сетку на отдельных ограниченных или больших участках поверхности. Раскрытие трещин происходит под действием пульсирующего давления смазочного масла. На более поздней фазе трещина, достигнув основания антифрикционного слоя, изменяет свое направление, распространяясь по стыку между слоем и основанием, в результате отдельные участки поверхностного слоя обособляются от остального слоя, а затем выкрашиваются. Большую роль в отделении частиц, вероятно, играет смазочный материал, который, проникнув в трещину, как бы подрывает металл над ней. Иногда трещина не доходит до стыка и продвигается вблизи него и параллельно ему. Выкрашивание крупных кусков слоя может сопровождаться поверхностными язвинами.

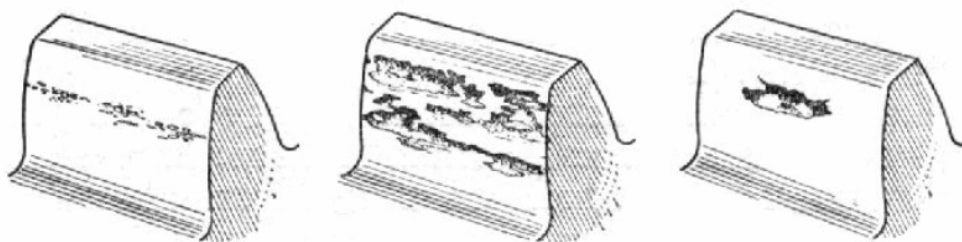


Рис. 2.16. Усталостное изнашивание зубьев шестерен

Сопротивление усталости антифрикционного слоя зависит от режима работы и конструкции подшипника, антифрикционного материала, физических свойств соединения слоя с основанием, жесткости вала и постели под подшипники и др. Недостаточная жесткость вала, корпусов и крышек подшипников и постелей может стать причиной перекосов цапф отно-

сительно подшипников и концентрации нагрузки у краев (рис. 2.17). Результатом повышенного кромочного давления на подшипниках может быть образование трещины либо пластический сдвиг мягкого сплава. При неудовлетворительном прилегании вкладышей подшипников к постелям участка вкладышей с неплотным контактом прогибаются; одновременно перегружается остальная рабочая поверхность. Конусность и овальность шеек, неправильная геометрия формы и несоответствие размеров вкладышей (особенно тонкостенных) и постелей служат причиной перенапряжения антифрикционного слоя.

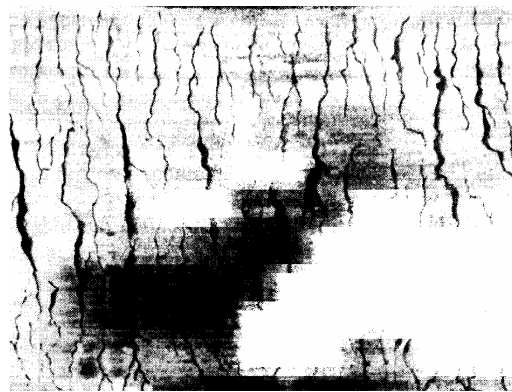


Рис. 2.17. Поверхность подшипника двигателя, залитого свинцовой бронзой, с усталостными повреждениями в виде сетки трещин

Отслаивание возникает в результате образования и развития продольной трещины на некоторой глубине с выходом ее на поверхность. Отслаивание твердой корки металла наблюдается в деталях, которые азотированы, цементованы или подвергнуты поверхностной закалке. Касательные напряжения на стыке твердой корки с сердцевиной приводят к разрушению ее тем быстрее, чем больше касательные напряжения внутри корки. Это объясняется определенным соотношением сопротивления усталости сердцевины и упрочненного слоя. Увеличивая его толщину, часто удается ликвидировать отслаивание.

Причиной отслаивания может быть значительное пластическое деформирование неупрочненной поверхности детали под действием контактной нагрузки. При качении без смазочного материала или с пластичным смазочным материалом возникающие на поверхности усталостные трещины залечиваются (слипаются) при пластической деформации, а на глубине, в связи с неоднородностью структуры, появляются опасные остаточные напряжения.

Отслаиванию могут способствовать и дефекты металла в виде неметаллических включений, наличия свободного цементита и др.

#### 2.7.5. Фреттинг-процесс и фреттинг-коррозия

*Изнашивание при фреттинге* – это механическое изнашивание соприкасающихся деталей при колебательных микроперемещениях (амплитуда до 0,025 мкм) и динамическом характере приложения нагрузки (скорость 2,5...7,5 мм/с). Данному виду изнашивания подвергаются детали неподвижных соединений, полученных с помощью точечной сварки, клепки, а также замковые части лопаток турбин и т.п., которые испытывают динамические нагрузки, вибрацию.

При фреттинге происходят процессы схватывания вследствие пластического деформирования микровыступов и контактирования ювенильных поверхностей деталей, абразивного изнашивания, при котором в роли абразивных частиц выступают продукты износа; это усугубляется тем, что они не покидают зону трения, а накапливаются под воздействием динамической знакопеременной нагрузки, сопровождающей данный процесс.

Фреттинг-процесс возможен при сухом трении и при наличии смазки при вибрации и периодических колебаниях. Если при этом на металл агрессивно воздействует среда, то происходит коррозионно-механическое изнашивание – изнашивание при фреттинг-коррозии. Такое изнашивание наблюдается в местах контакта вкладыша шеек коленчатого вала и постели в картере и крышке.

При фреттинг-коррозии происходят пластическая деформация микровыступов, схватывание ювенильных поверхностей, возникновение и разрушение окисных пленок, развиваются коррозионно-усталостные процессы, формируется коррозионно-активная среда вследствие адсорбции на окислах влаги и  $O_2$ , разрушаются поверхностные слои, предварительно разрыхленные усталостным и коррозионным процессами, в зоне контакта увеличивается количество продуктов износа, что интенсифицирует процесс до абразивного.

Механизм изнашивания при фреттинг-коррозии (рис. 2.18) включает первоначальное контактирование деталей, которое происходит в отдельных точках поверхности (а). При вибрации окисные пленки в зоне фактического контакта разрушаются, образуются небольшие каверны, заполненные окисными пленками (б), которые постепенно увеличиваются в размерах и сливаются в одну большую каверну (в). В ней повышается давление окисленных частиц металла, образуются трещины. Некоторые трещины сливаются, и происходит откалывание отдельных объемов металла. Частицы окислов производят абразивное воздействие. В результате действия повышенного давления и сил трения частиц окислов повышается температура, и происходит образование белых твердых нетравящихся структур в отколовшихся частицах и на поверхности каверн.

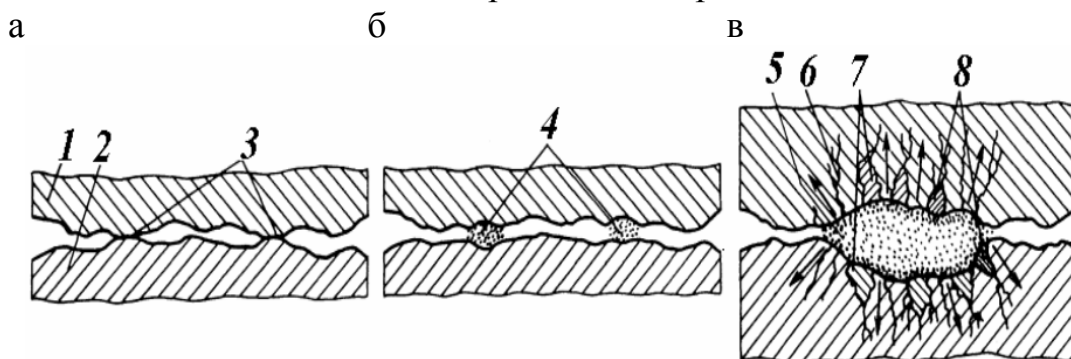


Рис. 2.18. Механизм изнашивания металлических поверхностей при фреттинг-коррозии:

- 1, 2 – контактирующие детали; 3 – точки контакта поверхностей;  
 4 – мелкие зарождающиеся каверны; 5 – общая большая каверна; 6 – трещины;  
 7 – отколовшиеся объемы металла; 8 – отколовшиеся частицы с твердой структурой

### 2.7.6. Эрозионное изнашивание

*Эрозионным изнашиванием* деталей автомобиля называют процесс разрушения поверхности детали, изменения ее размеров при динамическом воздействии на материал детали рабочего тела или электрических разрядов. Рабочим телом может быть газ или жидкость. Соответственно различают гидроэрозионное, газозерозионное, кавитационное и электроэрозионное изнашивание.

При гидрогазовой эрозии материал разрушается под действием механических и тепловых воздействий молекул жидкости или газа, при кавитационной – за счет воздействия парогазовых пузырьков и капелек жидкости, при электрической – под действием электрических сил.

При микроударном механизме эрозии энергия локальных импульсных ударов вызывает пластическую деформацию, структурные или фазовые превращения в микрообъемах, соизмеримых с размерами зерна металла и отдельными структурными составляющими. Поэтому возрастает роль границ зерен и отдельных структурных составляющих сплавов в процессе зарождения и развития микротрещин на стадии разрушения.

*Гидрогазоэрозионное изнашивание* происходит в результате воздействия потока жидкости и (или) газа. Такому изнашиванию на автомобиле подвержены в первую очередь рабочие поверхности тарелок выпускных клапанов двигателя, жиклеры карбюратора. Поверхность при газовой эрозии разрушается в результате контакта с динамическим потоком главным образом раскаленных газов.

Термический механизм газовой эрозии проявляется при воздействии на материал раскаленного газового потока, что приводит к ослаблению связей между частицами металла и выносу частиц газовой струей.

*Электроэрозионное изнашивание* проявляется в эрозионном изнашивании поверхности в результате воздействия разряда при прохождении электрического тока, например между электродами свечи зажигания, контактами прерывателя-распределителя.

Электроэрозионному разрушению под действием дугового или искрового разряда в результате испарения или выброса металла в виде капель (контакты прерывателя-распределителя) подвержены токопроводные материалы.

*Кавитация* – это явление образования в движущемся по поверхности твердого тела потоке жидкости пустот в виде пузырьков, наполненных парами, воздухом, газами, растворенными в жидкости и выделившимися из нее.

В движущемся с большой скоростью потоке при его сужении и наличии препятствий на его пути давление может упасть до давления парообразования при данной температуре. В зависимости от сопротивления жидкости, может произойти разрыв, нарушение целостности потока. Образующаяся пустота заполняется паром и газами, выделившимися из жидкости. Воздух, вовлекаемый в поток, облегчает возникновение кави-

тации. Образовавшиеся парогазовые пузыри размерами порядка десятых долей миллиметра, перемещаясь вместе с потоком, попадают в зоны высоких давлений. Пар конденсируется, газы растворяются, и в образовавшиеся пустоты с громадным ускорением устремляются частицы жидкости; происходит сопровождаемое ударом восстановление целостности потока.

Таким образом, *кавитационное изнашивание* – это изнашивание движущегося относительно жидкости тела, происходящее под ударным воздействием захлопывающихся пузырьков воздуха вблизи поверхности, находящихся в жидкости.

Сущность процесса состоит в следующем: в потоке жидкости образуются пузырьки воздуха (в течение 1 секунды на площади 1 см<sup>2</sup> возможно образование и захлопывание более 30000000 пузырьков), далее эти пузырьки перемещаются в зону повышенного давления, под воздействием которого происходят захлопывание пузырьков (со скоростью 100...400 м/с) и нанесение микрогидроударов при высоком давлении и температуре (до 1000...1500 °С) частичками жидкости по поверхности детали.

Исследования показали, что кавитационный пузырек может вырасти за 0,002 с до 6 мм в диаметре и полностью разрушиться за 0,001 с.

Кавитация наблюдается в трубопроводах, в гидромониторах и в потоках, обтекающих лопасти центробежных и пропеллерных насосов и лопастей гидравлических турбин и гребных винтов. Явление кавитации вызывает вибрации, стуки и сотрясения, что приводит к расшатыванию крепежных связей, обрыву болтов, смятию резьб, фрикционной коррозии стыков, нарушению уплотнений и усталостным поломкам.

Разновидностью кавитации является вибрационная кавитация, которая возникает при колебании твердого тела относительно жидкости или жидкости относительно твердого тела. Давление в жидкости на границе раздела жидкости и твердого тела может упасть и вызвать образование кавитационных пузырьков. Вибрационная кавитация проявляется в двигателях внутреннего сгорания, особенно на наружных поверхностях



Рис.2.19. Наружная поверхность гильзы после кавитационного изнашивания

гильз в результате их колебаний от ударов поршня (рис. 2.19). Износ от кавитации наружной стенки гильзы может быть в 3...4 раза больше, чем износ внутренней поверхности от действия поршневых колес.

Интенсивность кавитационного изнашивания зависит от температуры, свойств жидкости и материала деталей. В воде с температурой 50 °С соответствует наибольшая интенсивность. Вязкость жидкости на кавита-

цию влияет незначительно. С увеличением поверхностного натяжения изнашивание происходит более интенсивно. Введение в воду веществ, образующих и способствующих образованию эмульсий (масла и эмульгаторы), понижает поверхностное натяжение и снижает кавитационное изнашивание.

При температуре 55...60 °С гильза толщиной 7 мм пробивается за 800 часов работы. Большую опасность представляет кавитационное разрушение опорных поясков гильз и блока цилиндров, что приводит к проникновению охлаждающей жидкости в полость цилиндра и в картер двигателя.

Для уменьшения кавитационного изнашивания необходимо тщательно восстанавливать демпфирующие элементы механизмов, чтобы сдерживать вибрацию и распространение упругих волн в деталях.

## 2.8. Классификация отказов

Классификация отказов необходима для выявления их причин и разработки мер по предупреждению и устранению. Существует несколько квалификационных признаков.

*По влиянию на работоспособность изделия* (полные и частичные) различают отказы его элементов и отказы, вызывающие неисправность или отказ изделия в целом. Например, перегорание лампы плафона вызывает отказ лампы, но не автомобиля, а отказ тормозной системы или рулевого управления является одновременно и отказом автомобиля, так как при этом нельзя продолжать движение.

*По источнику возникновения* различают отказы: конструкционные, возникающие вследствие несовершенства конструкции; производственные, являющиеся следствием нарушения или несовершенства технологического процесса изготовления или ремонта изделия; эксплуатационные, вызванные нарушением действующих правил (например, перегрузкой автомобиля, применением нерекомендуемых топлив или смазочных материалов, несвоевременным проведением технического обслуживания и т.п.).

На последнюю группу отказов (около 40...50 %) эксплуатация может влиять непосредственно. При этом более 50 % отказов в эксплуатации зависят от качества ТО и ремонта, более 1/3 – от качества ТСМ и около 10 % от квалификации водителя.

*По связи с отказами других элементов* различают зависимые и независимые отказы. Зависимым называется отказ, обусловленный отказом или неисправностью других элементов изделия. Независимый отказ такой обусловленности не имеет. Примером зависимого отказа могут служить задиры зеркала цилиндра двигателя из-за разрушения поршневого кольца или отказ аккумуляторной батареи из-за неисправности реле-регулятора. Пример независимого отказа – прокол шины на дороге.

По характеру (закономерности) возникновения и возможности прогнозирования различают постепенные и внезапные отказы.

Постепенные отказы возникают в результате плавного изменения показателей технического состояния изделия, чаще всего вследствие изнашивания. Для постепенных отказов характерен последовательный переход изделия из начального исправного состояния в состояние отказа через ряд промежуточных состояний.

Особенности постепенных отказов: во-первых, они в принципе могут быть предотвращены в результате своевременного выполнения ТО; во-вторых, изменение технического состояния происходит монотонно, что создает предпосылки для его прогнозирования. На постепенные отказы приходится 40...70 % всех отказов.

Для внезапных отказов характерным является скачкообразное изменение показателя технического состояния. Примером внезапного отказа является повреждение или разрушение вследствие превышения допустимого уровня нагрузки, которое может произойти в любой момент работы изделия. При старении автомобиля удельный вес внезапных отказов возрастает.

На автомобилях также встречается особый, так называемый перемежающийся отказ, отличающийся тем, что многократно возникает и самоустраняется. Такой отказ, например, может возникнуть при ослаблении крепления электрического контакта.

По частоте возникновения (наработке) для современных автомобилей различают отказы: с малой наработкой (3...4 тыс. км), средней (до 12...16 тыс. км) и большой (свыше 12...16 тыс. км). Следует иметь в виду, что наработки между отказами существенно сокращаются при увеличении пробега автомобиля с начала эксплуатации (рис. 2.20).

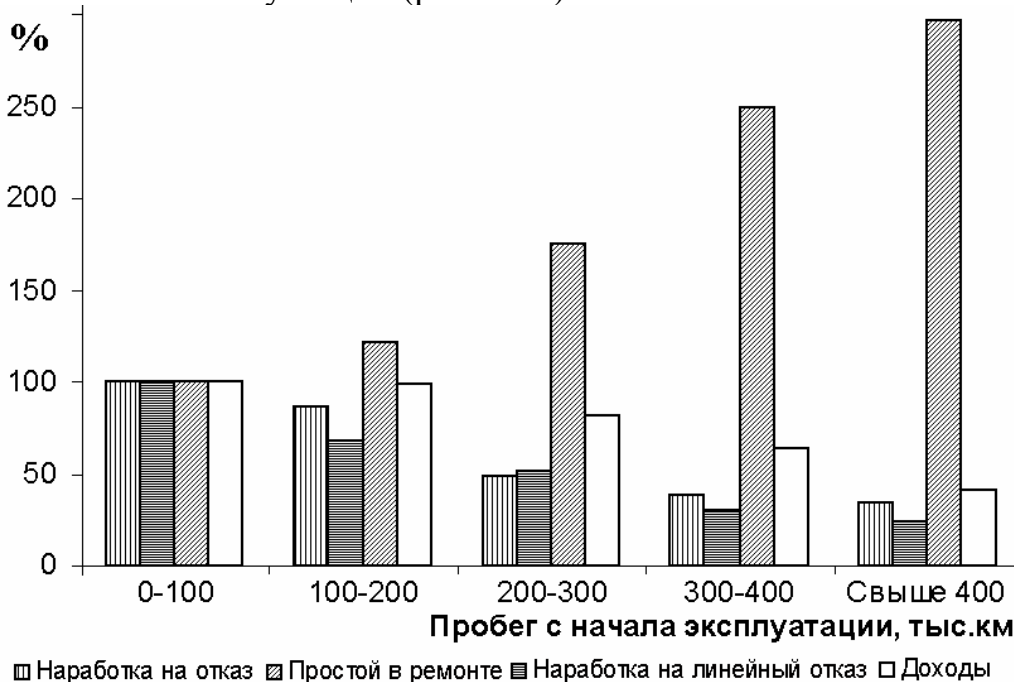


Рис. 2.20. Влияние наработки с начала эксплуатации на показатели надежности автобуса



*По трудоемкости устранения* (группе сложности) отказы можно разделить на отказы, для устранения которых требуется малая (до 2 чел.-ч) трудоемкость работ (как правило, устранение заменой деталей, расположенных снаружи), средняя трудоемкость (2...4 чел.-ч), в основном это ремонт и замена легкодоступных деталей, и большая (свыше 4 чел.-ч) трудоемкость, такие отказы предполагают ремонт с разборкой, расчленением основных агрегатов машины.

Средняя трудоемкость устранения одного отказа современного автомобиля в зависимости от грузоподъемности (вместимости) и конструктивных особенностей составляет 1,5...2,0 чел.-ч. Например, у автомобилей МАЗ 87 % отказов имеет малую и среднюю трудоемкость. На остальные 13 % отказов приходится более 78 % общей трудоемкости ремонта и 82 % всей продолжительности простоев в ремонте.

*По влиянию на потери рабочего времени* автомобиля отказы подразделяют на устраняемые без потери рабочего времени, т.е. при ТО или в нерабочее (межсменное) время, и отказы, устраняемые с потерей рабочего времени.

Процент отказов агрегатов и систем автомобиля большой грузоподъемности, устраняемых с потерей рабочего времени, для рамы составляет 100 %, для двигателя – 78 %, для коробки передач – 75 %, для сцепления – 65 %, для кузова – 61 %, для заднего моста – 29 %, для переднего моста – 25 %, для электрооборудования – 23 %, для подвески – 21 %, для системы питания – 17 %.

Особое значение имеют отказы на линии, вызывающие нарушение транспортного процесса. Например, наработка на линейный (дорожный) отказ автобуса среднего класса на первом году эксплуатации составляет в среднем 24 тыс. км, а на пятом-седьмом годах – до 5 тыс. км (см. рис. 2.20).

## 3. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ НАДЕЖНОСТИ

### 3.1. Вероятность возникновения события

Расчет надежности основан на теории вероятности – науки, изучающей закономерности случайных явлений.

Явления, появившиеся в процессе испытаний, называют событиями. В теории надежности наиболее часто используют события: повреждение, отказ, восстановление.

Расчет надежности дает возможность заранее установить, когда и какие неисправности могут возникнуть у группы изделий, с учетом конструктивных и технологических особенностей машины; оценить вероятность их появления; определить показатели, характеризующие надежность.

События подразделяют по возможности возникновения: на возможные, которые могут произойти, а могут и не произойти; на невозможные, которые в заданных условиях произойти не могут; на равновероятные, вероятность возникновения которых одинакова; на единственно возможные, при испытании произойдет хотя бы одно из этих событий; на достоверные, которые обязательно произойдут.

По возможности одновременного появления события подразделяются на совместные, для которых появление одного из них не исключает появления другого; несовместные, которые исключают совместное появление.

По взаимосвязи события бывают зависимые, т.е. появление одного события зависит от появления другого, и независимые, для которых появление одного не исключает появления других.

Вероятность события, например отказа, – это объективная математическая оценка возможности реализации случайного события, например возникновения отказа, значение которой находится в интервале  $0 \dots 1$ .

Вероятность события определяется как отношение числа случаев, благоприятствующих наступлению данного события ко всему числу (несовместных, единственно возможных, равно возможных) событий:

$$P(A) = \frac{m}{N}, \quad (3.1)$$

где  $m$  – число случаев, благоприятствующих наступлению события;

$N$  – общее число случаев (событий).

Например, событие  $A$  – это отказ двигателя автомобиля, общее количество отказов автомобиля за период  $N = 20$ , число случаев отказа двигателя  $m = 5$ . Тогда вероятность отказа двигателя автомобиля за рассматриваемый период составит:  $P(A) = \frac{5}{20} = 0,25$ .

В этом примере рассмотрен расчет вероятности простого события. Как правило, требуется определить вероятность появления более сложного события, например вероятность двух и более отказов в нескольких испытаниях. При расчете следует учитывать вид события.

*Вероятность появления одного из несовместных событий (A и B) определяется по формуле*

$$P(A \text{ или } B) = P(A) + P(B). \quad (3.2)$$

Например, событие A – отказ станка, событие B – выполнение производственного задания на этом станке. Вероятности этих событий равны:  $P(A) = 0,1$ ,  $P(B) = 0,7$ , тогда

$$P(A \text{ или } B) = 0,1 + 0,7 = 0,8.$$

*Вероятность одновременного появления независимых, несовместных событий*

$$P(A \text{ и } B) = P(A) \cdot P(B). \quad (3.3)$$

Например, событие A – отказ двигателя, событие B – отказ колес. Вероятности этих событий равны:  $P(A) = 0,2$ ,  $P(B) = 0,3$ , тогда

$$P(A \text{ и } B) = 0,2 \cdot 0,3 = 0,06.$$

*Вероятность появления одного из совместных событий*

$$P(A \text{ или } B) = P(A) + P(B) - P(A \text{ и } B). \quad (3.4)$$

Например, событие A – отказ сцепления, событие B – отказ рулевого механизма. Вероятности этих событий равны:  $P(A) = 0,4$ ,  $P(B) = 0,5$ , тогда

$$P(A \text{ или } B) = 0,4 + 0,5 - 0,4 \cdot 0,5 = 0,7.$$

*Вероятность одновременного возникновения зависимых событий*

$$P(A \text{ и } B) = P_B(A) \cdot P(B), \quad (3.5)$$

где  $P_B(A)$  – вероятность появления события A при условии, что событие B произошло.

Например, событие A – дорожно-транспортное происшествие, событие B – отказ тормозов. Вероятности этих событий равны:  $P_B(A) = 0,25$ ,  $P(B) = 0,2$ , тогда

$$P(A \text{ и } B) = 0,25 \cdot 0,2 = 0,05.$$

*Вероятность одновременного возникновения полной группы достоверных событий (A, B, C, D), из которых при каждом испытании обязательно наступит хотя бы одно, равна единице:*

$$P(A) + P(B) + P(C) + P(D) = 1. \quad (3.6)$$

Если в группе достоверных событий только два, то они называются *противоположными*  $P(A) + P(B) = 1$ .

Например, событие A – отказ автомобиля, событие B – нахождение этого автомобиля в работоспособном состоянии.

### 3.2. Распределение случайных величин

В расчетах надежности многие параметры рассматриваются как случайные величины. Например, рассеяние ресурсов по критерию усталости, оцениваемое отношением наибольшего ресурса к наименьшему, для подшипников достигает 40, для зубчатых передач – 10...15. Это вызвано тем, что факторы, влияющие на рассчитываемые параметры, носят случайный характер.

*Случайная величина (СВ)* – это величина, которая в результате опыта может принять то или иное значение, не известное заранее.

Существуют две разновидности случайных величин: *дискретные СВ*, которые заранее можно перечислить, например число отказов генератора автомобиля, число ремонтов камер колеса; *непрерывные СВ*, которые в определенном интервале могут принимать любое значение, не известное заранее, к таким СВ относятся наработка, скорость изнашивания детали, износ.

Распределение случайных величин описывается законами распределения.

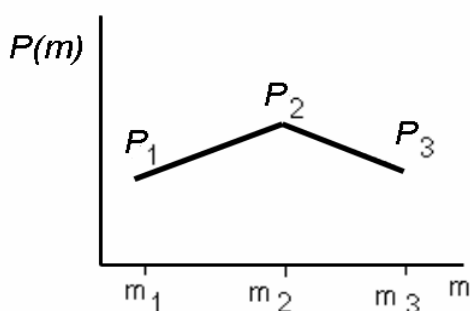


Рис. 3.1. Полигон распределения дискретной случайной величины

Дискретные значения случайной величины ( $m$ )  $m_1, m_2, m_3$  могут возникнуть с вероятностью  $P(m = m_1), P(m = m_2)$  и т.д.

*Законом распределения для дискретных СВ* является соотношение, устанавливающее связь между возможными значениями СВ и соответствующими им вероятностями.

Закон распределения может быть представлен в виде таблицы (табл. 3.1) или в виде графика (рис. 3.1) – полигона распределения.

Т а б л и ц а 3 . 1

Табличное представление закона распределения дискретной случайной величины

$m$	$m_1$	$m_2$	$m_3$	$\dots m_N$
$P$	$P_1$	$P_2$	$P_3$	$\dots P_N$

Для *непрерывных СВ* в качестве закона распределения используют вероятность события, заключающегося в том, что СВ  $T$  примет значение, меньшее заданного наперед  $T_i$  ( $T < T_i$ ), т.е.  $P(T < T_i)$ . Данную вероятность называют функцией распределения СВ  $F(T)$  или интегральной функцией

(рис. 3.2). Функция  $F(T)$  в пределах изменения случайной величины изменяется от 0 до 1.

Производная от функции распределения  $F(T)$  по переменной  $T$  является дифференциальной функцией  $f(T)$  (рис. 3.3):

$$f(T) = \frac{dF(T)}{dT}. \quad (3.7)$$

В теории надежности величину  $f(T)$  называют плотностью распределения случайной величины. Она характеризует относительную вероятность данного значения случайной величины и характеризуется следующими выражениями:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} f(T)dT = 1 \text{ и } f(T=T_i) = 0.$$

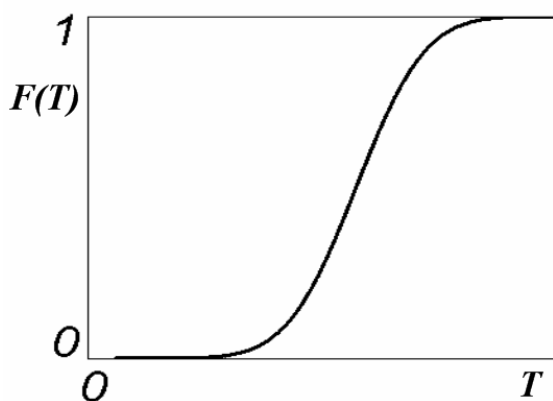


Рис. 3.2. Интегральная функция распределения случайной величины

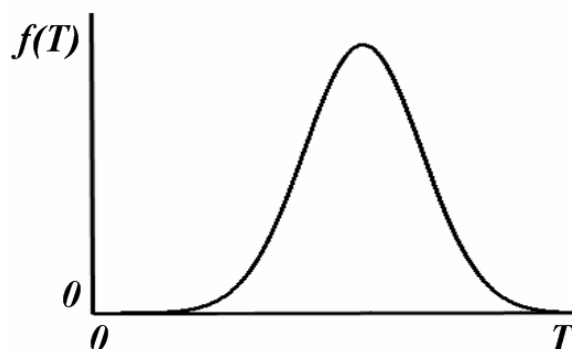


Рис. 3.3. Дифференциальная функция распределения непрерывной случайной величины

### 3.3. Точечные характеристики распределения случайных величин

Наиболее существенные особенности распределений выражают числовые характеристики случайной величины.

Основной характеристикой случайной величины  $T$  является математическое ожидание  $M(T)$  – это центр распределения, величина, к которой тяготеют значения СВ, показатели рассеивания СВ, дисперсия  $D(T)$  и среднеквадратическое отклонение  $\sigma(T)$ .

Расчет перечисленных характеристик дискретных и непрерывных величин имеет свои особенности.

Значения характеристик, полученные по результатам испытаний или эксплуатации, называют статистическими оценками.

Таблица 3.1

## Расчетные формулы характеристик распределения случайной величины

Характеристика	Дискретная случайная величина	Непрерывная случайная величина
Математическое ожидание СВ	$M(m) = \sum_{i=1}^n m_i \cdot P(m_i)$	$M(T) = \int_{-\infty}^{+\infty} T \cdot f(T) dT$
Среднеквадратическое отклонение	$\sigma(m) = \sqrt{\sum_{i=1}^N [m_i - M(m)]^2 \cdot P(m_i)}$	$\sigma(T) = \sqrt{\int_{-\infty}^{+\infty} (T - M(T))^2 \cdot f(T) dT}$
Дисперсия	$D(m) = \sigma^2(m)$	$D(T) = \sigma^2(T)$

Примечание.  $i$  – индекс дискретной случайной величины ( $m$ ),  $N$  – количество значений дискретной случайной величины.

Для сравнения различных распределений СВ используется относительный показатель рассеивания – коэффициент вариации (изменчивости) ( $V$ ):

$$V = \frac{\sigma}{(T_{cp} - T_{см})}, \quad (3.8)$$

где  $T_{см}$  – величина смещения (сдвига) распределения СВ относительно нуля,

$$T_{см} = T_{\min} - 0,5 \cdot A, \quad (3.9)$$

$$T_{см} = T_1 - \frac{(T_2 - T_1) + (T_3 - T_2)}{2} = T_1 - \frac{T_3 - T_1}{2}; \quad (3.10)$$

здесь  $T_{\min}$  – минимальное значение СВ в вариационном ряду;

$A$  – величина интервала;

$T_1, T_2, T_3$  – первое, второе, третье значения СВ в вариационном ряду.

Таблица 3.2

## Формулы для расчета статистических аналогов характеристик распределения случайной величины

Статистический аналог СВ	Количество информации ( $N$ )	
	$N < 25$	$N > 25$
Среднее значение СВ	$T_{cp} = \frac{\sum T_i}{N}$	$T_{cp} = \sum_{i=1}^n T_{Ci} \cdot \frac{m_i}{N}$
Среднеквадратическое отклонение СВ	$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (T_i - T_{cp})^2}{N - 1}}$	$\sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^n (T_{Ci} - T_{cp})^2 \cdot \frac{m_i}{N}}$

Примечание.  $m_i$  – частота  $i$ -го интервала,  $n$  – количество интервалов статистического ряда.

*Квантилью* называют значение  $H_k(\alpha)$  случайной величины  $T$ , соответствующее заданной вероятности  $P(T < H_k(\alpha))$ , как правило, составляющей 0,5, 0,8, 0,9, 0,95.

*Медиана* – это значение СВ, являющееся срединным членом, т.е. значение СВ, при котором  $P_1(T < Me) = P_2(T > Me)$  (рис. 3.4).

Квантиль, соответствующая вероятности 50 %, называется медианой. Площадь под графиком функции плотности распределения случайной величины делится медианой пополам.

*Мода* – это значение СВ, соответствующее максимальной частоте или плотности распределения (рис. 3.4). Модой случайной величины называют наиболее вероятное значение этой величины, т.е. значение, при котором  $P(m) = P_{\max}(m)$  или плотность вероятности  $f(T) = f_{\max}(T)$ .

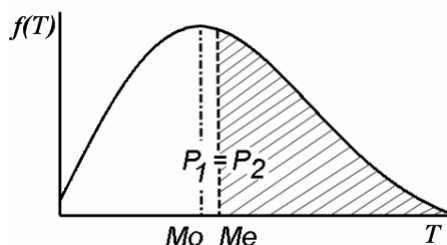


Рис. 3.4. Мода ( $Mo$ ) и медиана ( $Me$ )

Точечные характеристики, полученные для выборки изделий, должны быть перенесены на генеральную (общую) совокупность изделий.

*Генеральная совокупность* – это совокупность изделий, содержащая все исследуемые изделия, из которой делается выборка, т.е. над которой ведется наблюдение.

*Выборка* – это определенное число изделий, отобранных из исследуемой совокупности для получения сведений о генеральной совокупности. Так как объем выборки невелик, используют интервальные оценки, которые определяют с учетом теоретического закона распределения СВ.

### 3.4. Теоретические законы распределения случайных величин

*Закон нормального распределения (ЗНР)* используют:

- для определения характеристики рассеивания ресурсов и сроков службы машины и агрегатов;
- для определения характеристик рассеивания ошибок измерения деталей и рассеивания размеров деталей;
- для расчета показателей надежности изделий в период постепенных отказов из-за износа и старения.

Параметрами данного закона являются математическое ожидание  $M(T)$  (среднее значение  $T_{cp}$ ) и среднеквадратическое отклонение  $\sigma$ .

Особенность данного закона – симметричное распределение относительно математического ожидания (рис. 3.5).

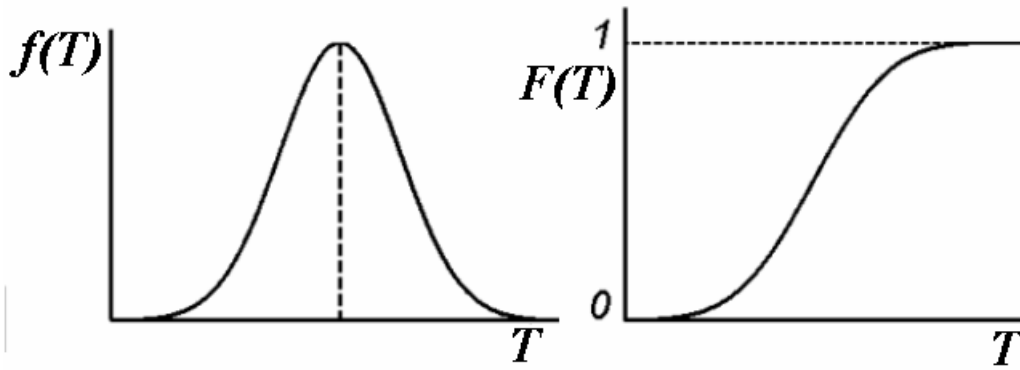


Рис. 3.5. Дифференциальная  $f(T)$  и интегральная  $F(T)$  функции закона нормального распределения

Дифференциальная функция применяется для расчета вероятности появления отказов в интервале  $A$ , с серединой  $T_{ci}$  (прил. 3)

$$f(T) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(T-T_{cp})^2}{2\sigma^2}}; \quad f(T_{c,i}) = \frac{A}{\sigma} \cdot f_0 \cdot \left( \frac{T_{c,i} - T_{cp}}{\sigma} \right). \quad (3.11)$$

Интегральная функция определяется с помощью табулированной центрированной интегральной функции  $\Phi(Z)$  по аргументу  $Z=(T-T_{cp})/\sigma$  с использованием прил. 1

$$F(T) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot \int_0^{+\infty} e^{-\frac{(T-T_{cp})^2}{2\sigma^2}} dT; \quad F(T) = \Phi\left(\frac{T - T_{cp}}{\sigma}\right) = \Phi(Z). \quad (3.12)$$

*Закон распределения Вейбулла (ЗРВ)* используется для определения характеристик рассеивания ресурсов отдельных деталей и наработок между отказами. Особенность закона ЗРВ – правосторонняя асимметрия дифференциальной функции  $f(T)$ . Коэффициент вариации СВ для данного закона находится в пределах 0,5...0,9.

Параметрами закона ЗРВ являются *параметр масштаба* и *параметр формы*, которые могут быть вычислены по выражениям:

$$a=1.11 \cdot (T_{cp} - T_{cm}); \quad b=V^{-1,06}. \quad (3.13)$$

Более точно эти коэффициенты определяются с использованием прил. 12 по коэффициенту вариации и формулам:

$$a = \sigma/C_v \text{ или } a = (T_{cp}-T_{cm})/K_v. \quad (3.14)$$

Дифференциальная и интегральная функции (рис. 3.6) определяются по выражениям:

$$f(T) = \frac{b}{a} \cdot \left( \frac{T - T_{cm}}{a} \right)^{b-1} \cdot e^{-\left( \frac{T - T_{cm}}{a} \right)^b}; \quad F(T) = 1 - e^{-\left( \frac{T - T_{cm}}{a} \right)^b}. \quad (3.15)$$



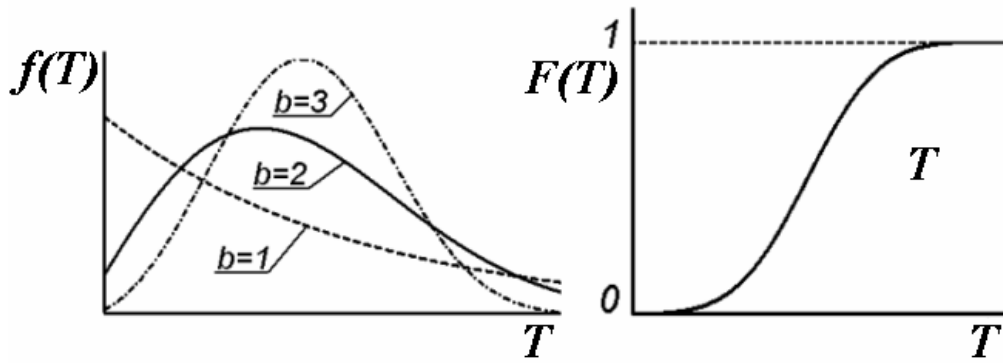


Рис. 3.6. Дифференциальная  $f(T)$  и интегральная  $F(T)$  функции закона распределения Вейбулла

Значения интегральной функции закона Вейбулла можно найти по прил. 11, используя отношение  $(T - T_{см})/a$  и коэффициент  $b$ . Этот закон может превращаться в законы: ЗНР – при  $b = 2,5 \dots 3,5$ , ЭЗР – при  $b = 1$ , ЗРР (Релея) – при  $b = 2$  (см. рис. 3.6).

Закон распределения Релея (ЗРР) применяется для определения долговечности изделий с выраженным эффектом старения.

Дифференциальная и интегральная функции определяются по выражениям:

$$f(T) = \frac{T}{\sigma^2} \cdot e^{-\frac{T^2}{2\sigma^2}}; F(T) = 1 - e^{-\frac{T^2}{2\sigma^2}}. \quad (3.16)$$

Коэффициент вариации для данного закона равен 0,52.

Экспоненциальный закон распределения (ЭЗР) используется для расчета надежности сложных систем.

Дифференциальная и интегральная функции (рис. 3.7) закона определяются по выражениям:

$$f(T) = \lambda \cdot e^{-\lambda T}; F(T) = 1 - e^{-\lambda T}, \quad (3.17)$$

где  $\lambda$  – параметр ЭЗР, который представляет собой интенсивность появления событий, например отказов  $\lambda = 1/T_{ср}$ .

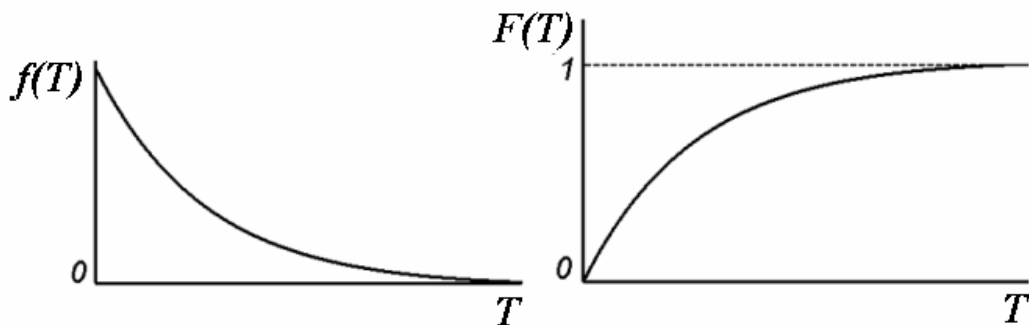


Рис. 3.7. Дифференциальная  $f(T)$  и интегральная  $F(T)$  функции экспоненциального закона распределения

Данный закон является однопараметрическим с коэффициентом вариации СВ, равным 1.

Закон *распределения Пуассона* применяется для определения вероятности появления  $m$  независимых событий в интервале времени  $T$ , когда события происходят с постоянной интенсивностью  $\lambda$ .

СВ распределена по закону Пуассона, если вероятность ее частот при определенных значениях СВ  $m$  равна (прил. 10):

$$P_m = \frac{a_n^m}{m!} \cdot e^{-a_n} = \frac{(\lambda \cdot T)^m}{m!} \cdot e^{-\lambda \cdot T}, \quad (3.18)$$

где  $m$  – СВ, принимающая положительные значения,  $m \geq 0$ ;

$a_n$  – параметр закона Пуассона,  $a_n = \lambda \cdot T$ ;

$\lambda$  – интенсивность возникновения событий,  $\lambda > 0$ .

Параметр закона Пуассона существенно влияет на характер изменения вероятности  $P_m$  (рис. 3.8).

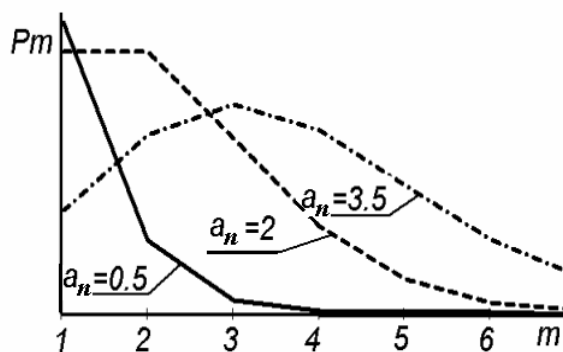


Рис. 3.8. Закон распределения Пуассона

Математическое ожидание и среднеквадратическое отклонение равны параметру закона Пуассона:

$$M(m) = a_n = n \cdot p; \quad \sigma = a_n, \quad (3.19)$$

где  $n$  – число испытаний;

$p$  – вероятность события при одном испытании.

Например, вероятность появления трех отказов автомобилей за 1000 часов работы при интенсивности отказов  $\lambda = 0,002 \text{ ч}^{-1}$  составит

$$P_m = \frac{\lambda \cdot T^m}{m!} \cdot e^{-\lambda T} = \frac{(0,002 \cdot 1000)^3}{3 \cdot 2 \cdot 1} \cdot e^{-0,002 \cdot 1000} = 0,18.$$

Закон *биномиального распределения* применяется для определения вероятности появления события  $A$   $m$  раз в  $n$  испытаниях (событие  $A$  либо наступит, либо нет), когда вероятность события постоянна и испытания независимы

$$P_{m,n} = C_{m,n} \cdot p^m \cdot q^{n-m}, \quad (3.20)$$

где  $m$  – количество появлений события  $A$ ;

$n$  – количество испытаний;  
 $p$  – вероятность события  $A$  в каждом испытании;  
 $q$  – вероятность неоявления события  $A$  в испытании,  $q = 1 - p$ ;  
 $C_{m,n}$  – биномиальный коэффициент (прил. 22),

$$C_{m,n} = \frac{n!}{m!(n-m)!} \quad (3.21)$$

Математическое ожидание определяется по выражению

$$M(m) = n \cdot P. \quad (3.22)$$

Дисперсия рассчитывается по формуле

$$D(m) = \sigma^2(m) = n \cdot P \cdot q. \quad (3.23)$$

Например, вероятность появления двух отказов автомобиля при трех его испытаниях и вероятности возникновения отказа  $p=0,1$  равна:

$$P_{5,10} = \frac{3 \cdot 2 \cdot 1}{3 \cdot 2 \cdot 1 \cdot (3-2)!} \cdot 0,1^2 \cdot 0,9^{3-1} = 0,027.$$

### 3.5. Выбор теоретического закона распределения

Теоретический закон распределения можно выбрать следующими способами: по области применения теоретического закона, по величине коэффициента вариации, на основе визуального сравнения полигона с дифференциальной функцией  $f(T)$  или кривой накопленных опытных вероятностей  $\Sigma m_i/N$  с интегральной функцией  $F(T)$  ТЗР, с помощью критериев согласия (Пирсона и Колмогорова).

Использование критериев позволяет более объективно выбрать теоретический закон распределения.

Физический смысл проверки «согласия» заключается в определении степени расхождения опытной и теоретической вероятностей. При этом в качестве меры совпадения или расхождения выбирают различные критерии согласия: сумму квадратов отклонения теоретических вероятностей от опытных (критерий Пирсона), наибольшее или суммарное отклонение кривой накопленных опытных вероятностей от интегральной кривой теоретического закона распределения (критерий Колмогорова).

Критерий согласия является случайной величиной и, следовательно, подчиняется определенному закону распределения. Поэтому по величине критерия согласия в каждом случае можно определить вероятность совпадения опытных и теоретических функций и принять или отбросить выбранный теоретический закон распределения показателя надежности. Следует иметь в виду, что как бы ни была велика вероятность совпадения, она свидетельствует только о том, что выбранный закон не противоречит

опытным данным, но не гарантирует того, что этот закон в данном случае лучше, чем какой-либо другой, выравнивает опытную информацию.

Поэтому наиболее удачно используют критерии согласия тогда, когда необходимо выбрать один теоретический закон распределения из двух или нескольких. В этом случае можно не сомневаться, что наиболее приемлемым окажется тот закон распределения, совпадение которого с опытной информацией характеризуется наименьшей величиной расхождения.

При количестве информации  $N > 25$  целесообразно использовать *критерий Пирсона*  $\chi^2$ , т.е. он применяется при большем числе наблюдений

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^{n_y} \frac{(m_i - m_{Ti})^2}{m_{Ti}}, \quad (3.24)$$

где  $n_y$  – число интервалов в укрупненном статистическом ряду информации,  $n_y \geq 4$ ;

$m_i$  – опытная частота в интервале, должна быть  $m_i \geq 5$  (если в интервале частота меньше 5, то интервалы следует объединить);

$m_{Ti}$  – теоретическая частота в интервале,

$$m_{T.i} = N \cdot [F(T_{k.i}) - F(T_{n.i})]; \quad (3.25)$$

здесь  $N$  – количество точек информации;

$T_{n.i}, T_{k.i}$  – наработки начала и конца  $i$ -го интервала статистического ряда.

Вероятность совпадения теоретического закона распределения  $P\chi^2$  определяют из прил. 7 с учетом числа степеней свободы:

$$r = n_y - k, \quad (3.26)$$

где  $k$  – количество обязательных связей,  $k = z + 1$  ( $z$  – число параметров ТЗР; например для ЭЗР один,  $z = 1$ ).

Критическая вероятность совпадения опытных данных с теоретическими составляет  $[P\chi^2] = 0,1$ .

*Критерий Колмогорова* находят по выражению

$$\lambda_K = D_{\max} \cdot \sqrt{N}, \quad (3.27)$$

где  $D_{\max}$  – максимальное расхождение между накопленной опытной вероятностью и интегральной функцией,

$$D_{\max} = \left| \sum m_i / N - F(T_{ki}) \right|_{\max}. \quad (3.28)$$

По критерию Колмогорова  $\lambda_K$  определяют вероятность совпадений опытных данных с теоретическими  $P_{\lambda_K}$ , используя прил. 5.

При  $\lambda_K \leq 1$  принято считать, что согласие опытных данных с теоретическими хорошее. Критическая вероятность совпадения  $[P_{\lambda_K}] = 0,05$ .

### 3.6. Интервальные характеристики распределения случайной величины

Точечные характеристики распределения случайной величины, полученные на основании результатов испытаний выборки изделий, должны быть перенесены на генеральную совокупность машин. Так как математическое ожидание СВ и среднее квадратическое отклонение не равны их статистическим аналогам, полученным по результатам испытаний выборки изделий, то следует определить интервальные оценки распределения СВ генеральной совокупности изделий.

Эти оценки характеризуются относительной ошибкой переноса и степенью доверия, т.е. доверительной вероятностью.

Для инженерных расчетов принимают относительную ошибку равной 10...15 %, а доверительную вероятность – 0,8...0,95 до 0,99.

Границы, в которых может колебаться значение одиночного показателя надежности при заданной  $\alpha$ , называются нижней доверительной границей  $T_\alpha^H$  и верхней доверительной границей  $T_\alpha^B$ .

Задаваясь меньшей доверительной вероятностью ( $\alpha$ ), сближают границы рассеивания и уменьшают погрешность расчета, однако при этом снижается степень доверия, т.е. вероятность попадания случайной величины в соответствующий интервал (рис. 3.9).

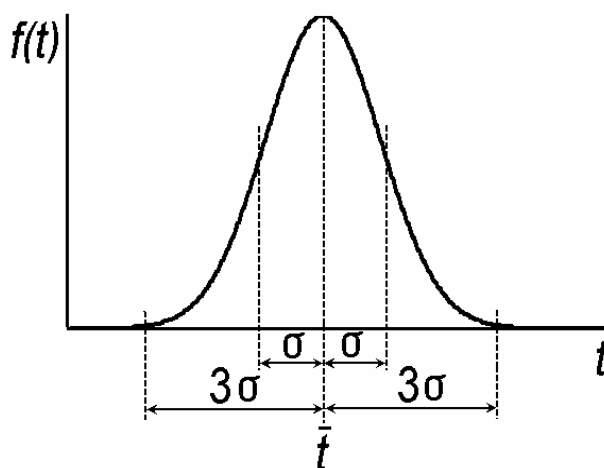


Рис. 3.9. Доверительные границы распределения случайной величины

Для закона нормального распределения доверительные границы одиночного значения показателя надежности рассчитывают по формулам:

$$\begin{aligned} \text{нижняя доверительная граница} \quad T_\alpha^H &= T_{\text{cp}} - t_\alpha \cdot \sigma, \\ \text{верхняя доверительная граница} \quad T_\alpha^B &= T_{\text{cp}} + t_\alpha \cdot \sigma, \end{aligned} \quad (3.29)$$

где  $t_\alpha$  – коэффициент Стьюдента, который определяют с учетом доверительной вероятности ( $\alpha$ ) и количества информации ( $N$ ) по прил. 2, 7.

Абсолютная ошибка переноса для одиночного значения показателя надежности равна:  $\varepsilon_\alpha = t_\alpha \cdot \sigma$ .

В практике чаще приходится встречаться с расчетом доверительных границ среднего значения показателя надежности:

$$\begin{aligned} \text{нижняя доверительная граница } T_{\text{ср}\alpha}^H &= T_{\text{ср}} - \frac{t_{\alpha} \cdot \sigma}{\sqrt{N}} \\ \text{верхняя доверительная граница } T_{\text{ср}\alpha}^B &= T_{\text{ср}} + \frac{t_{\alpha} \cdot \sigma}{\sqrt{N}}. \end{aligned} \quad (3.30)$$

Абсолютная ошибка переноса для среднего значения

$$\epsilon_{\text{ср.}\alpha} = \frac{t_{\alpha} \cdot \sigma}{\sqrt{N}}. \quad (3.31)$$

Для закона распределения Вейбулла границы одиночного значения рассчитываются с использованием квантилей этого закона ( $H_K$ ) (прил. 4):

$$\begin{aligned} \text{нижняя доверительная граница } T_{\alpha}^H &= H_K^B \left( \frac{1-\alpha}{2} \right) \cdot a + T_{\text{см}}, \\ \text{верхняя доверительная граница } T_{\alpha}^B &= H_K^B \left( \frac{1+\alpha}{2} \right) \cdot a + T_{\text{см}}. \end{aligned} \quad (3.32)$$

Доверительные границы среднего значения показателя надежности закона Вейбулла:

$$\begin{aligned} \text{нижняя доверительная граница } T_{\text{ср}\alpha}^H &= (T_{\text{ср}} - T_{\text{см}}) \cdot \sqrt[r_3]{b} + T_{\text{см}}, \\ \text{верхняя доверительная граница } T_{\text{ср}\alpha}^B &= T_{\text{ср}} \cdot \sqrt[r_1]{b} + T_{\text{см}}, \end{aligned} \quad (3.33)$$

где  $r_1, r_3$  – коэффициенты распределения Вейбулла, зависящие от доверительной вероятности  $\alpha$  и повторности информации  $N$  (прил. 7).

Интервал, в который при заданной доверительной вероятности  $\alpha$  попадают  $(N \cdot \alpha)$  значений, называется доверительным интервалом  $I_{\alpha}$ .

Доверительный интервал для одиночного значения

$$I_{\alpha} = T_{\alpha}^B - T_{\alpha}^H. \quad (3.34)$$

Доверительный интервал для среднего значения показателя

$$I_{\text{ср}\alpha} = T_{\text{ср}\alpha}^B - T_{\text{ср}\alpha}^H. \quad (3.35)$$

Относительная ошибка переноса

$$\delta = \frac{T_{\text{ср}\alpha}^B - T_{\text{ср}}}{T_{\text{ср}} - T_{\text{см}}} \cdot 100 \%. \quad (3.36)$$

### 3.7. Расчет показателей надежности технических изделий

*Показатель надежности* – величина, характеризующая одно из свойств или несколько свойств надежности. Показатели надежности используют для количественной характеристики надежности изделий.

Показатели надежности классифицируют:

*по способу получения показатели* на расчетные, получаемые на основе расчетных методов; эксплуатационные, получаемые по данным эксплуатации; экстраполированные, найденные путем экстраполяции известных показателей надежности на другую продолжительность эксплуатации или другие условия эксплуатации;

*по области использования* показатели надежности делятся на нормируемые, регламентируемые нормативно-технической или конструкторской (проектной) документацией; оценочные, получаемые по результатам испытаний и эксплуатации;

*по области распространения* показатели надежности различают индивидуальные, характеризующие надежность одного изделия; групповые, характеризующие надежность партии изделий;

*по свойствам изделий, характеризующим их надежность*, различают показатели безотказности восстанавливаемых и невосстанавливаемых изделий, долговечности, ремонтпригодности, сохраняемости и надежности в целом.

С помощью единичных показателей оценивают одно из свойств изделия, характеризующих его надежность, с помощью комплексных – оценивают одновременно несколько таких свойств.

#### 3.7.1. Расчет показателей безотказности

##### **Показатели безотказности невосстанавливаемых изделий**

*Вероятность безотказной работы  $P(T)$*  – вероятность того, что в пределах заданной наработки отказ изделий не возникнет, т.е. вероятность того, что наработка изделия до отказа больше заданной  $P(T > T)$ .

Статистическую оценку вероятности безотказной работы за время  $T$  (или в пределах наработки  $T$ ) определяют из соотношения

$$P(T) = \frac{N_p(T)}{N} = 1 - \frac{n(T)}{N}, \quad (3.37)$$

где  $N_p(T)$  – число работоспособных изделий к концу времени испытаний или эксплуатации  $T$ ;

$N$  – число изделий, поставленных на испытания или эксплуатацию;

$n(T)$  – число изделий, отказавших к концу времени испытаний или эксплуатации  $T$ .

Вероятность отказа может быть оценена интегральной функцией распределения наработки до отказа

$$F(T) = 1 - P(T) = \frac{n(T)}{N}. \quad (3.38)$$

Зная дифференциальную функцию, вероятность отказа можно определить:

$$F(T) = \int_0^T f(T) dT. \quad (3.39)$$

Вероятность безотказной работы находим по выражению

$$P(T) = 1 - F(T) = 1 - \int_0^T f(T) dT = \int_T^{\infty} f(T) dT. \quad (3.40)$$

*Средняя наработка до отказа*  $T_{cp}$  – это математическое ожидание наработки изделия до первого отказа. Она может быть определена по известной вероятности безотказной работы

$$T_{cp} = \int_0^{\infty} P(T) dt. \quad (3.41)$$

Распределение отказов во времени характеризуется *плотностью распределения отказов*  $f(T)$ .

*Плотность распределения наработки до отказа* – это отношение числа отказавших изделий за единицу времени к первоначальному их количеству при условии, что все вышедшие из строя изделия не восстанавливаются, т.е. их число во время испытаний уменьшается.

Плотность распределения отказов получают дифференцированием интегральной функции  $F(T)$ :

$$f(T) = \frac{\Delta F}{\Delta T} = \frac{\Delta n(T)}{N \cdot \Delta T}, \quad (3.42)$$

где  $\Delta n(T)$  – число отказавших изделий за наработку  $\Delta T$ .

Следовательно,

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = -\frac{dP(t)}{dt}. \quad (3.43)$$

*Интенсивность отказов* – условная плотность вероятности возникновения отказа невосстанавливаемого изделия, определяемая для рассматриваемого момента времени при условии, что до данного момента отказ не возникал. Это вероятность возникновения отказа в единицу времени.



По статистическим данным, эта величина определяется по формуле

$$\lambda(T) = \frac{\Delta n(T)}{(N_0 - n_t) \cdot \Delta T}, \quad (3.44)$$

где  $\Delta n(T)$  – число отказавших изделий за наработку  $\Delta T$ ;

$n_t$  – число отказавших изделий от начала испытаний до начала периода  $\Delta T$ ;

$N_0$  – начальное число испытываемых изделий.

Наименьшие значения плотности распределения отказов и интенсивность отказов имеют в период нормальной эксплуатации (рис. 3.10).

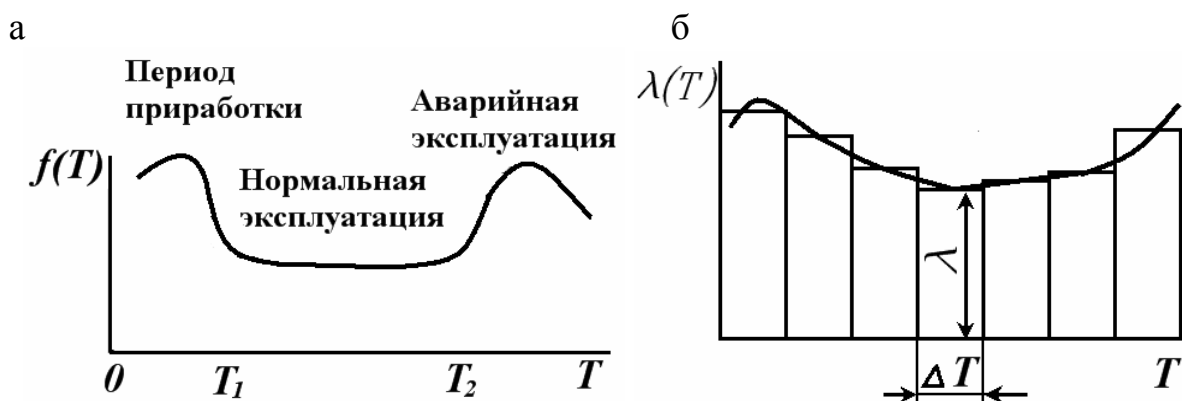


Рис. 3.10. Характер изменения плотности распределения отказов (а) и интенсивности отказов (б) в течение эксплуатации

Теоретически интенсивность определяется по формуле

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{P(t)}. \quad (3.45)$$

Из формул выводится одно из основных уравнений теории надежности:

$$\lambda(T) = -\frac{dP(T)}{P(T)dT}; \quad \frac{dP(T)}{P(T)} = -\lambda(T)dT; \quad \ln P(T) = -\int_0^T \lambda(T)dT, \quad (3.46)$$

$$P(T) = \exp \left[ -\int_0^T \lambda(T)dT \right].$$

### Показатели безотказности восстанавливаемых изделий

*Вероятность безотказной работы* – это вероятность того, что восстанавливаемое изделие в произвольный момент времени находится в работоспособном состоянии

$$P(T) = \frac{\mu}{\lambda + \mu} + \frac{\lambda}{\lambda + \mu} \cdot e^{-(\lambda + \mu)T}, \quad (3.47)$$

где  $\mu$  – интенсивность восстановления изделия, 1/ч;

$\lambda$  – интенсивность возникновения отказа, 1/ч.

За счет проведения обслуживаний и текущих ремонтов изделия вероятность его безотказной работы периодически повышается и в течение эксплуатации находится на уровне  $(\lambda / \lambda + \mu)$  (рис. 3.11).

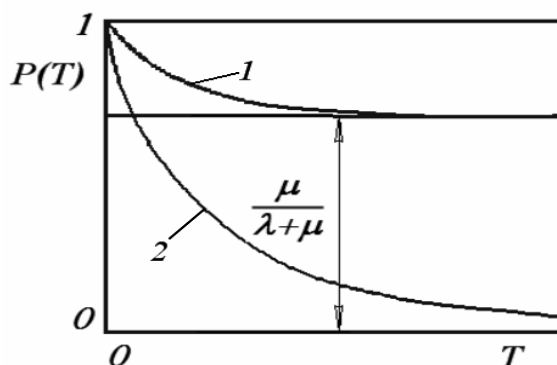


Рис. 3.11. Зависимость вероятности безотказной работы восстанавливаемых (1) и невосстанавливаемых (2) изделий от наработки

*Средняя наработка на отказ* – это отношение наработки восстанавливаемого изделия к математическому ожиданию числа его отказов в течение этой наработки

$$T_0 = \frac{T_k - T_n}{M(r_{к,н})}, \quad (3.48)$$

где  $M(r_{к,н})$  – математическое ожидание числа отказов в интервале наработки  $T_n - T_k$ .

*Параметр потока отказов* – скорость появления отказов (среднее количество восстановлений в единицу времени) при условии, что вышедшие из строя изделия заменяются новыми.

$$\omega(t) = \frac{r(\Delta T)}{N \cdot \Delta T}, \quad (3.49)$$

где  $r(\Delta T)$  – число отказов у  $N$  изделий в интервале наработки  $\Delta T$ .

### 3.7.2. Показатели долговечности

*Технический ресурс* (сокращенно – ресурс) – наработка изделия от начала его эксплуатации после изготовления или ремонта до предельного состояния.

Различают ресурс до первого капитального ремонта, между капитальными ремонтами, до списания (полный ресурс). Для группы изделий в технической документации указывается средний или минимальный ресурс.

*Средний ресурс*  $T_p$  равен математическому ожиданию ресурса.

$$T_p = \frac{\sum_{i=1}^N T_{pi}}{N}, \quad (3.50)$$

где  $T_{pi}$  – ресурс  $i$ -го изделия;

$N$  – число изделий, поставленных на испытания.

*Гамма-процентный ресурс*  $T_\gamma$  – это наработка, в течение которой изделие не достигнет предельного состояния с заданной вероятностью  $\gamma$  %, т.е. это ресурс, обеспечиваемый с вероятностью  $\gamma$  %

$$P(T_\gamma) = \gamma / 100. \quad (3.51)$$

Зная теоретический закон распределения, можно определить гамма-процентный ресурс.

Например, для экспоненциального закона распределения  $e^{-\lambda \cdot T_\gamma} = \frac{\gamma}{100}$ .

Прологарифмировав это выражение, можно получить:

$$T_\gamma = \frac{1}{\lambda} \cdot \ln(\gamma / 100). \quad (3.52)$$

Обычно назначают и определяют 90 %-й и 80 %-й ресурс.

50-процентный ресурс  $T_{50}$  называют медианным. При исчерпании этого ресурса половина изделий достигает предельного состояния.

Целесообразность гамма-процентного ресурса в следующем – этот показатель позволяет сократить время испытаний изделий на надежность, которые проводят до исчерпания ресурса у  $(1-\gamma/100) \cdot N$  изделий.

*Назначенный ресурс* – это суммарная наработка, при достижении которой эксплуатация изделия прекращается независимо от его технического состояния для проведения капитального ремонта или списания.

*Установленный ресурс* – это значение ресурса, обусловленное конструкцией, технологией изготовления и эксплуатацией изделия.

*Срок службы* – это календарная наработка до предельного состояния. Выражается обычно в годах. В отличие от ресурса срок службы включает в себя перерывы в работе изделия.

Средний, гамма-процентный, назначенный и установленный сроки службы определяются так же, как и соответствующие значения ресурсов.

В технической документации обычно указываются такие показатели, как гарантийная наработка и срок гарантии.

*Гарантийная наработка* – это наработка изделия, до завершения которой изготовитель гарантирует и обеспечивает определенное качество изделия при условии соблюдения потребителем правил эксплуатации, в том числе правил хранения и транспортирования. Если в течение этой наработки возникнут неисправности по вине завода-изготовителя, то последний должен безвозмездно их устранить.

Если в технических условиях указываются и гарантийная наработка, и срок гарантии, то изготовитель несет ответственность в пределах любой из этих величин. Например, если для автомобиля гарантийная наработка 30 тыс. км пробега, а срок гарантии – 6 месяцев. То это означает, что если в пределах любой из этих величин на автомобиле возникнут неисправности по вине завода-изготовителя, то последний должен безвозмездно их устранить.

### 3.7.3. Показатели сохраняемости

*Срок сохраняемости* – это календарная продолжительность хранения или транспортирования изделия, в течение которой показатели его надежности сохраняются в пределах, заданных в нормативно-технической документации.

*Среднее, гамма-процентное, назначенное и установленное значения* срока сохраняемости определяются так же, как и соответствующие значения срока службы.

### 3.7.4. Показатели ремонтпригодности

К обобщенным показателям ремонтпригодности относятся: периодичность ТО, удельная оперативная трудоемкость (ТО), удельная оперативная трудоемкость текущего ремонта (ТР).

Числовые значения основных показателей подлежат включению в технические задания на разработку и последующему контролю в процессе конструирования изделия еще до передачи его в производство.

*Время восстановления* – это календарная продолжительность восстановления работоспособного состояния изделия или календарная продолжительность его технического обслуживания.

При расчете показателей ремонтпригодности учитывают лишь оперативное время обнаружения и устранения отказов. В расчет не берется время на организационные мероприятия (подготовка инструмента, материала и т.д.).

Если на отыскание причин  $m$  отказов и их устранение затрачено время  $T_{в.1}, T_{в.2}, \dots, T_{в.m}$ , то *среднее время восстановления*

$$T_{в.ср} = \frac{\sum_{i=1}^m T_{в.i}}{m}. \quad (3.53)$$

*Гамма-процентное время восстановления* – это время, в течение которого работоспособность изделия будет восстановлена с вероятностью  $\gamma$ , выраженной в процентах.

При законе нормального распределения времени восстановления гамма-процентное время восстановления

$$T_{в.\gamma} = T_{в.ср} - H_K(\gamma) \cdot \sigma. \quad (3.54)$$

При законе распределения Вейбулла

$$T_{в.\gamma} = H_K(1-\gamma) \cdot a + T_{в.см}, \quad (3.55)$$

где  $H_K$  – квантиль закона распределения, соответствующая вероятности  $\gamma/100$ ;

$T_{в.см}$  – величина смещения распределения времени восстановления.

Вероятность восстановления  $P_e(T_e)$  – вероятность того, что время восстановления работоспособного состояния изделия не превысит заданного:

$$P_B(T_B) = P(T_{B,CP} < T_B), \quad (3.56)$$

где  $T_{B,CP}$  – среднее время восстановления;

$T_B$  – заданное время устранения отказа.

Для большинства изделий машиностроения вероятность восстановления подчиняется экспоненциальному закону распределения.

*Интенсивность восстановления* – условная плотность вероятности восстановления работоспособного состояния изделия, определяемая для рассматриваемого момента времени при условии, что до этого момента восстановление не было завершено.

*Средняя трудоемкость восстановления* – математическое ожидание трудоемкости восстановления, определяется аналогично среднему времени восстановления.

*Удельная суммарная трудоемкость технического обслуживания или ремонта*, чел.·ч /ед. наработки

$$t_{TO(P),CP} = \frac{\sum_{i=1}^N t_{TO(P),i}}{\sum_{i=1}^N T_i}, \quad (3.57)$$

где  $t_{TO(P),i}$  – суммарная трудоемкость технического обслуживания или ремонта  $i$ -го изделия за некоторый период эксплуатации;

$T_i$  – суммарная наработка  $i$ -го изделия за тот же период эксплуатации;

$N$  – количество изделий.

*Объединенная удельная трудоемкость технического обслуживания и ремонта*, чел.·ч /ед. наработки:

$$t_{TOP} = \frac{\sum_{i=1}^N t_{TOP,i}}{\sum_{i=1}^N T_i}, \quad (3.58)$$

где  $T_{TOP}$  – объединенная суммарная трудоемкость технического обслуживания и текущего ремонта  $i$ -го изделия за некоторый период эксплуатации.

*Единичные показатели* характеризуют отдельные свойства конструкции автомобиля. Они выражаются в виде безразмерных коэффициентов, изменяющихся в пределах от нуля до единицы.

Считается, что конструкция полностью отвечает предъявляемым к ней требованиям в отношении того или иного ее свойства, если коэффициент, характеризующий это свойство, равен (или близок) единице.

Коэффициент контролепригодности

$$K_K = \frac{N_{BC}}{N_{BC} + N_C}, \quad (3.59)$$

где  $N_{BC}$ ,  $N_C$  – число агрегатов, контролируемых без снятия и со снятием с изделия.

Коэффициент доступности

$$K_d = \frac{T_{\text{осн}}}{T_{\text{осн}} + T_{\text{доп}}}, \quad (3.60)$$

где  $T_{\text{осн}}$ ,  $T_{\text{доп}}$  – трудоемкость выполнения основной работы и дополнительных работ.

Коэффициент легкоъемности

$$K_l = 1 - \frac{\Delta T_{\text{дм}}}{T_{\text{дм}}}, \quad (3.61)$$

где  $T_{\text{дм}}$  – трудоемкость демонтажно-монтажных работ;

$\Delta T_{\text{дм}}$  – превышение трудоемкости демонтажно-монтажных работ агрегата по сравнению с эталонной.

Коэффициент блочности

$$K_b = \frac{N_b}{N_o}, \quad (3.62)$$

где  $N_b$  – число деталей, монтируемых и демонтируемых в блоках;

$N_o$  – общее число деталей в машине.

Коэффициент взаимозаменяемости

$$K_v = \frac{T_{\text{зам}}}{T_{\text{зам}} + T_{\text{подг}}}, \quad (3.63)$$

где  $T_{\text{зам}}$ ,  $T_{\text{подг}}$  – трудоемкость основной работы при замене агрегата и трудоемкость подгоночных работ.

### 3.7.5. Комплексные показатели надежности

Комплексные показатели характеризуют и безотказность, и ремонтпригодность.

*Коэффициент готовности*  $K_g$  – вероятность того, что изделие окажется работоспособным в произвольный момент времени, кроме планируемых перерывов в его работе (плановое техническое обслуживание, перерывы между рабочими сменами).

$$K_g = \frac{T_{\text{раб}}}{T_{\text{раб}} + T_{\text{рем}}}, \quad (3.64)$$

где  $T_{\text{раб}}$  – суммарная наработка всех изделий в единицах времени;

$T_{\text{рем}}$  – суммарное время, затраченное на восстановление работоспособности.

*Коэффициент технического использования*  $K_{\text{ти}}$  – отношение наработки изделия за определенный период эксплуатации к сумме наработки и времени, затраченному на техническое обслуживание, плановые ремонты и неплановое восстановление за тот же период эксплуатации:

$$K_{\text{ти}} = \frac{T_{\text{раб}}}{T_{\text{раб}} + T_{\text{рем}} + T_{\text{ТО}}}, \quad (3.65)$$

где  $T_{\text{ТО}}$  – суммарное время, затраченное на техническое обслуживание.

*Коэффициент оперативной готовности*  $K_{\text{ог}}$  – это вероятность того, что изделие окажется работоспособным в произвольный момент времени, кроме планируемых перерывов в его работе, и, начиная с этого момента, оно будет работать безотказно в течение заданного интервала времени

$$K_{\text{ог}} = K_{\text{г}} \cdot P(T_0, T_1), \quad (3.66)$$

где  $P(T_0, T_1)$  – вероятность безотказной работы изделия в интервале  $(T_0, T_1)$ .

### 3.8. Расчет надежности сложных систем

Расчеты показателей безотказности технических систем обычно проводятся в предположении, что как вся система, так и любой ее элемент может находиться только в одном из двух состояний – работоспособном или неработоспособном и отказы элементов независимы друг от друга. Состояние системы (работоспособное или неработоспособное) определяется состоянием элементов и их сочетанием.

Поэтому теоретически возможно расчет безотказности любой ТС свести к перебору всех возможных комбинаций состояний элементов, определению вероятности каждого из них и сложению вероятностей работоспособных состояний системы. Такой метод (метод прямого перебора) практически универсален и может использоваться при расчете любых ТС. Однако при большом количестве элементов системы  $N$  такой путь становится нереальным из-за большого объема вычислений. Например, при  $N = 10$  число возможных состояний системы составляет:  $2^{10} = 1024$ , при  $N = 20$  превышает  $10^6$ , при  $N = 30$  – более  $10^9$ .

Поэтому на практике используют более эффективные и экономичные методы расчета, не связанные с большим объемом вычислений. Возможность применения таких методов связана со структурой технических систем.

#### 3.8.1. Надежность систем с последовательным соединением элементов

Системой с последовательным соединением элементов называется система, в которой отказ любого элемента приводит к отказу всей системы

(рис. 3.12). Такое соединение элементов в технике встречается наиболее часто, поэтому его называют основным соединением.

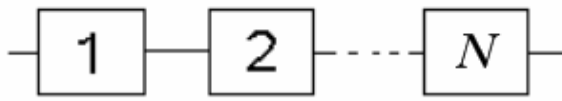


Рис. 3.12. Последовательное соединение элементов технической системы

В системе с последовательным соединением для безотказной работы в течение некоторой наработки  $T$  необходимо и достаточно, чтобы каждый из ее  $N$  элементов работал безотказно в течение этой наработки.

Считая отказы элементов независимыми, вероятность одновременной

безотказной работы  $N$  элементов определяют по теореме умножения вероятностей: вероятность совместного появления независимых событий равна произведению вероятностей этих событий:

$$P_c(T) = P_1(T) \cdot P_2(T) \dots P_N(T). \quad (3.67)$$

Соответственно, вероятность отказа такой технической системы

$$F_c(T) = 1 - P_c(T). \quad (3.68)$$

Если система состоит из равнонадёжных элементов  $P_i(T) = P(T)$ , то

$$P_c(T) = P(T)^N, \quad F_c(T) = 1 - (1 - F(T))^N, \quad (3.69)$$

где  $F(T)$  – вероятность отказа элемента системы.

Очевидно, что даже при высокой надежности элементов надежность системы при последовательном соединении оказывается тем более низкой, чем из большего числа элементов она состоит. Например, при  $P(T) = 0,95$  и  $N = 10$  надежность системы  $P_c(T) = 0,6$ , при  $N = 15$  –  $P_c = 0,46$ , а при  $N = 20$  –  $P_c(T) = 0,36$ .

Вероятность безотказной работы технической системы при последовательном соединении не может быть выше вероятности безотказной работы самого ненадежного из ее элементов. Т.е. из малонадежных элементов нельзя создать высоконадежной системы с последовательным соединением элементов.

Для периода нормальной эксплуатации имеет место простейший поток отказов, при котором наработки элементов и системы подчиняются экспоненциальному закону распределения

$$P(T) = \prod_{i=1}^N e^{(-\lambda_i \cdot T)} = e^{\left[ -\left( \sum_{i=1}^N \lambda_i \right) \cdot T \right]} = e^{(-\Lambda \cdot T)}, \quad (3.70)$$

где  $\Lambda$  – суммарная интенсивность отказов системы,

$$\Lambda = \lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_N = \sum_{i=1}^N \lambda_i = \text{const}. \quad (3.71)$$



Таким образом, интенсивность отказов системы при последовательном соединении элементов и простейшем потоке отказов равна сумме интенсивностей отказов элементов.

Для системы из  $N$  равнонадежных элементов ( $\lambda_i = \lambda$ ) средняя наработка на отказ системы будет равна:

$$\Lambda = N \cdot \lambda, \quad T_{0.C} = \frac{T_0}{N}. \quad (3.72)$$

Следовательно, интенсивность отказов системы в  $N$  раз больше, а средняя наработка в  $N$  раз меньше, чем у отдельного равнонадежного элемента.

### 3.8.2. Надежность систем с параллельным соединением элементов

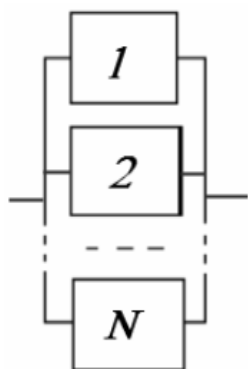


Рис. 3.13. Параллельное соединение элементов технической системы

Системой с параллельным соединением элементов называется система, отказ которой происходит только в случае отказа всех ее элементов (рис. 3.13). Такие схемы характерны для технических систем, в которых элементы дублируются или резервируются, т.е. параллельное соединение используется для повышения надежности.

Для отказа системы с параллельным соединением элементов в течение наработки  $T$  необходимо и достаточно, чтобы все ее элементы отказали в течение этой наработки. Вероятность отказа этой системы, при независимости отказов, может быть найдена по теореме умножения вероятностей отказа ее элементов:

$$F_c(T) = F_1(T) \cdot F_2(T) \dots F_n(T) = \prod_{i=1}^N F_i(T) = \prod_{i=1}^N (1 - P_i(T)). \quad (3.72)$$

Соответственно, вероятность безотказной работы

$$P_c(T) = \prod_{i=1}^N (1 - P_i(T)). \quad (3.74)$$

Для систем из равнонадежных элементов ( $P_i(T) = P(T)$ )

$$F_c(T) = F(T)^N; \quad P_c(T) = 1 - (1 - P(T))^N. \quad (3.75)$$

Надежность системы с параллельным соединением повышается при увеличении числа элементов. Например, при  $P(T) = 0,9$  и  $N = 2$   $P_c(T) = 0,99$ , а при  $N = 3$   $P_c(T) = 0,999$ .

Так как вероятность отказа элемента системы, как правило, меньше единицы, то вероятность отказа этой системы всегда меньше вероятности самого ненадежного ее элемента; поэтому даже из сравнительно ненадежных параллельно соединенных элементов возможно создание достаточно надежной системы.

При экспоненциальном распределении наработки выражение вероятности безотказной работы принимает вид

$$P_c(T) = 1 - [1 - e^{-\lambda \cdot T}]^N. \quad (3.76)$$

После интегрирования и преобразований выражения определена средняя наработка системы с равнонадежными элементами:

$$T_{0.c} = \frac{1}{\lambda} \sum_{i=1}^N \frac{1}{i} = T_0 \sum_{i=1}^N \frac{1}{i}, \quad (3.77)$$

где  $T_0, \lambda$  – средняя наработка и интенсивность отказов равнонадежного элемента,  $T_0 = 1/\lambda$ .

### 3.8.3. Надежность систем типа « $m$ из $N$ »

Система типа « $m$  из  $N$ » является вариантом системы с параллельным соединением элементов, отказ которой произойдет, если из  $N$  элементов, соединенных параллельно, работоспособными окажутся менее  $m$  элементов ( $m < N$ ).

На рис. 3.14 представлена система «2 из 5», которая работоспособна, если из пяти её элементов работают любые два, три, четыре или все пять. На схеме пунктиром обведены функционально необходимые два элемента, причем выделение элементов 1 и 2 произведено условно, в действительности все пять элементов равнозначны.

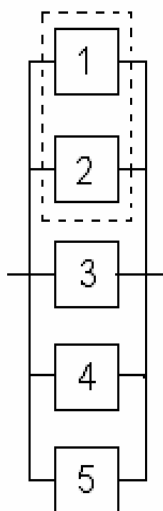


Рис. 3.14. Система «2 из 5»

Примером системы « $m$  из  $N$ » может быть 12-цилиндровый двигатель, который полностью теряет работоспособность при отказе двух и более цилиндров.

Расчет надежности системы « $m$  из  $N$ » может производиться комбинаторным методом, в основе которого лежит формула биномиального распределения.

Биномиальному распределению подчиняется дискретная случайная величина  $k$  – число появлений некоторого события в серии из  $N$  опытов, если в отдельном опыте вероятность появления события (отказа)

составляет  $p$ . При этом вероятность появления события  $k$  раз определяется следующим образом:

$$P_{k,N} = C_{k,N} p^k (1-p)^{N-k}, \quad (3.78)$$

где  $C_{k,N}$  – биномиальный коэффициент, который показывает, сколькими разными способами можно реализовать ситуацию « $k$  из  $N$ »,

$$C_{k,N} = \frac{N!}{k!(N-k)!}. \quad (3.79)$$

Значения биномиальных коэффициентов также приведены в прил. 15.

Поскольку для отказа системы « $m$  из  $N$ » достаточно, чтобы количество неисправных элементов было не меньше  $m$ , то вероятность отказа может быть найдена по теореме сложения вероятностей для  $k = m, m+1, \dots, N$

$$Fc = \sum_{k=m}^N P_{k,N} = \sum_{k=m}^N C_{k,N} p^k \cdot (1-p)^{N-k}. \quad (3.80)$$

Система будет работоспособной, если откажут менее  $m$  элементов, т.е.  $k = 0, 1, \dots, (m-1)$ ; соответственно вероятность безотказной работы будет равна:

$$Pc = \sum_{k=0}^{m-1} P_{k,N} = \sum_{k=0}^{m-1} C_{k,N} \cdot p^k \cdot (1-p)^{N-k}. \quad (3.81)$$

Например, вероятность отказа одного цилиндра 8-цилиндрового двигателя равна 0,1. Определить вероятность безотказной работы двигателя как системы «2 из 8»

$$Pc = 1 \cdot 0,1^0 \cdot (1-0,1)^{8-0} + 2 \cdot 0,1^1 \cdot (1-0,1)^{8-1} + 28 \cdot 0,1^2 \cdot (1-0,1)^{8-2} = 0,813.$$

Система « $m$  из  $N$ » при  $m=1$  превращается в обычную систему с параллельным соединением элементов, а при  $m = N$  – в систему с последовательным соединением.

#### 3.8.4. Надежность систем с мостиковыми схемами

Система с мостиковой структурой (рис. 3.15) представляет собой параллельное соединение последовательных цепочек элементов с диагональными элементами, включенными между узлами различных параллельных ветвей (элемент 3 на рис. 3.15, а, элементы 3 и 6 на рис. 3.15, б). Работоспособность такой системы определяется не только количеством отказавших элементов, но и их положением в структурной схеме. Например, работоспособность технической системы, схема которой приведена на рис. 3.15, а, будет утрачена при одновременном отказе элементов 1 и 4, или

2 и 5, или 4, 3, 2, или 1, 3, 5. В то же время отказ элементов 1 и 5, или 4 и 2, или 1, 3 и 2, или 4, 3 и 5 к отказу системы не приводит.

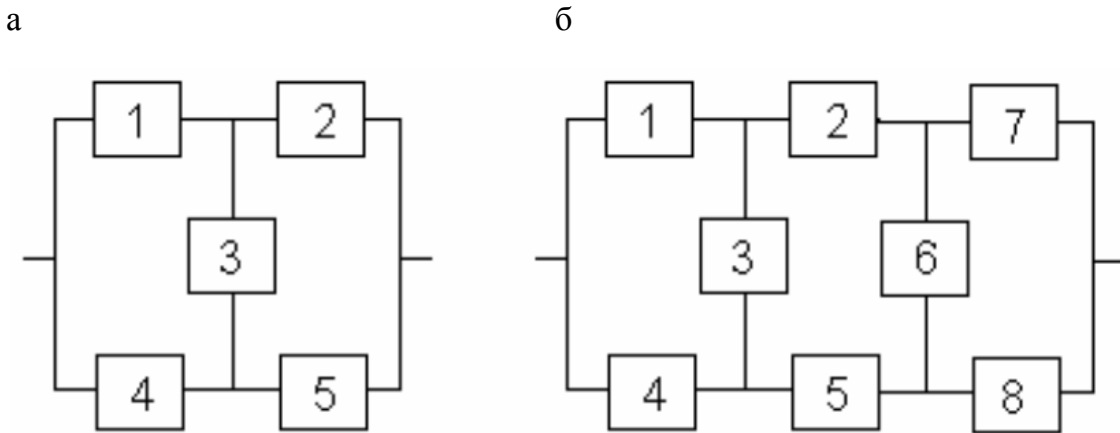


Рис. 3.15. Системы с мостиковыми структурами

Для анализа надежности технических систем с мостиковыми схемами можно использовать *метод разложения относительно базового элемента*, основанный на известной в математической логике теореме о разложении функции логики по любому аргументу, согласно которой можно записать

$$P_c = P_B \cdot P_c(P_B = 1) + F_B \cdot P_c(P_B = 0), \quad (3.82)$$

где  $P_B$  и  $F_B = 1 - P_B$  – вероятности безотказной работы и отказа базового элемента;

$P_c(P_B = 1)$  и  $P_c(P_B = 0)$  – вероятности работоспособного состояния системы при условии, что базовый элемент абсолютно надежен и что базовый элемент отказал.

Для мостиковой схемы (см. рис. 3.15, а) в качестве базового элемента целесообразно выбрать диагональный элемент 3.

При  $P_3 = 1$  мостиковая схема превращается в параллельно-последовательное соединение (рис. 3.16, а), а при  $P_3 = 0$  – в последовательно-параллельное (рис. 3.16, б).

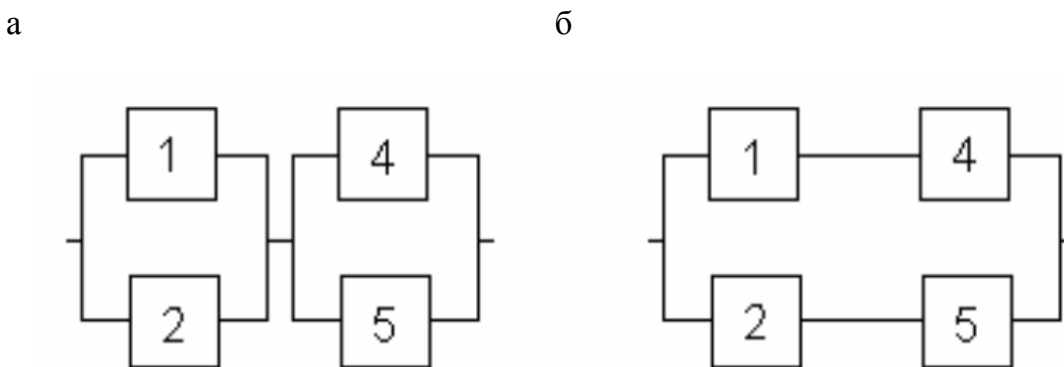


Рис. 3.16. Мостиковая схема (см. рис. 3.15, а) при абсолютно надежном (а) и отказавшем (б) базовом элементе (3)

Для преобразованных схем можно записать:

$$Pc(P_3 = 1) = [1 - (1 - P_1) \cdot (1 - P_2)] \cdot [1 - (1 - P_4)(1 - P_5)],$$

$$Pc(P_3 = 0) = 1 - (1 - P_1 P_4) \cdot (1 - P_2 P_5). \quad (3.83)$$

Тогда получим:

$$Pc = P_3 \cdot [1 - (1 - P_1) \cdot (1 - P_2)] \cdot [1 - (1 - P_4) \cdot (1 - P_5)] + \dots$$

$$\dots + (1 - P_3) \cdot [1 - (1 - P_1 \cdot P_4) \cdot (1 - P_2 \cdot P_5)]. \quad (3.84)$$

Этим методом можно воспользоваться и при разложении относительно нескольких базовых элементов. Например, для двух элементов ( $i, j$ ) выражение примет вид

$$Pc = P_i \cdot P_j \cdot Pc(P_i = 1, P_j = 1) + P_i \cdot F_j \cdot Pc(P_i = 1, P_j = 0) + \dots$$

$$\dots + F_i \cdot P_j \cdot Pc(P_i = 0, P_j = 1) + F_i \cdot F_j \cdot Pc(P_i = 0, P_j = 0). \quad (3.85)$$

Вероятность безотказной работы мостиковой схемы (см. рис. 3.15, б) при разложении относительно диагональных элементов 3 и 6 определится по выражению

$$Pc = P_3 \cdot P_6 \cdot Pc(P_3 = 1, P_6 = 1) + P_3 \cdot F_6 \cdot Pc(P_3 = 1, P_6 = 0) + \dots$$

$$\dots + F_3 \cdot P_6 \cdot Pc(P_3 = 0, P_6 = 1) + F_3 \cdot F_6 \cdot Pc(P_3 = 0, P_6 = 0). \quad (3.86)$$

Уравнения для расчета вероятностей  $Pc(P_3, P_6)$  легко составить, предварительно подготовив преобразованные схемы, подобно приведенным на рис. 3.16, а, б.

### 3.8.5. Надежность систем с комбинированным соединением элементов

Большинство реальных технических систем имеет сложную комбинированную структуру, часть элементов которой образует последовательное соединение, другая часть – параллельное, отдельные ветви элементов или ветви структуры образуют мостиковые схемы или схемы типа « $m$  из  $N$ ».

Метод прямого перебора для таких систем оказывается практически не реализуемым. Поэтому следует воспользоваться следующим алгоритмом. Предварительно необходимо произвести декомпозицию системы, разбив ее на простые подсистемы – группы элементов (мостиковые, с параллельным соединением и т.п.), методика расчета надежности которых известна. Затем эти подсистемы в структурной схеме надежности заменяются квазиэлементами с вероятностями безотказной работы, равными вычисленным вероятностям безотказной работы этих подсистем. При необходимости такую процедуру можно выполнить несколько раз до тех пор, пока оставшиеся квазиэлементы не образуют структуру, методика расчета надежности которой также известна.

В качестве примера рассмотрим комбинированную систему, представленную на рис. 3.17, а.

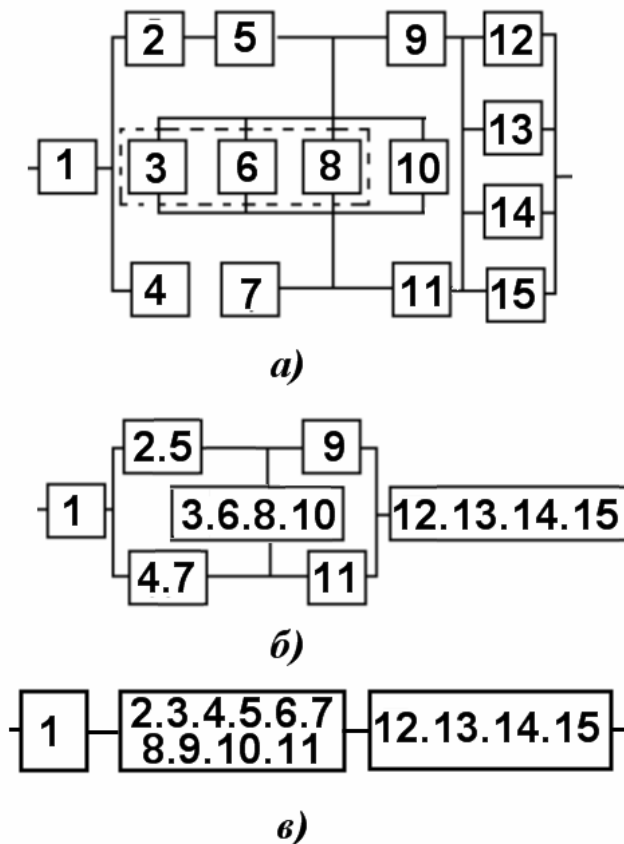


Рис. 3.17. Преобразование системы с комбинированной структурой

Здесь элементы 2 и 5, 4 и 7, 9 и 12, 11 и 14 попарно образуют друг с другом последовательные соединения. Заменяем их соответственно квазиэлементами [2.5], [4.7], [9], [11], для которых расчет надежности элементарно выполняется по формулам последовательного соединения элементов. Элементы 12, 13, 14 и 15 образуют параллельное соединение, заменяем его на квазиэлемент [12.13.14.15], а элементы 3, 6, 8, 10 – на систему «3 из 4», обозначаем это соединение в виде квазиэлемента [3.6.8.10].

В результате преобразованная схема примет упрощенный вид, представленный на рис. 3.17,б. В этой схеме элементы [2.5], [4.7], [9], [11] и [3.6.8.10] образуют мостиковую схему, которую заменяем квазиэлементом [2.3.4.5.6.7.8.9.10,11].

Схема, полученная после последних преобразований (рис. 3.17, в), образует последовательное соединение элементов 1, [2.3.4.5.6.7.8.9.10,11] и [12.13.14.15], вероятность безотказной работы которого рассчитываем путем умножения вероятностей безотказной работы перечисленных элементов.

## 4. ИСПЫТАНИЯ МАШИН НА НАДЕЖНОСТЬ

### 4.1. Цель и разновидности испытаний машин на надежность

Целью испытаний на надежность является получение *достоверной*, т.е. истинной, объективной, без домыслов; *полной*, содержащей все существующие сведения; *однородной*, относящейся к одинаковым изделиям, эксплуатируемым в одинаковых условиях информации, позволяющей выявить причины возникновения отказов технических изделий, определить детали, узлы с низкой надежностью, установить и откорректировать нормируемые показатели надежности, обосновать расход запасных частей, периодичность ТО, оценить влияние условий и режимов эксплуатации на надежность изделия, обосновать эффективность мероприятий повышения надежности.

Источниками информации могут быть рекламации потребителей, экспертные оценки специалистов, испытания, проводимые исследователями.

Испытания машин на надежность подразделяются на *исследовательские* и *контрольные* (рис. 4.1).

Исследовательские						Контрольные				
Стандартные			Специальные							
На износостойкость	На коррозионную стойкость	На усталостную прочность	Стендовые	Полигонные	Эксплуатационные			Предварительные		
										Приемо-сдаточные
										Периодические
			Ускоренные	Натурные	При подконтрольной эксплуатации			При рядовой эксплуатации	Типовые	

Рис. 4.1. Виды испытаний машин на надежность

*Исследовательские испытания* предшествуют всем другим испытаниям. Проведение исследовательских испытаний – обязательное условие разработки принципиально новых конструкций изделий. Результаты этих испытаний позволяют уточнить теоретические положения и расчеты, технические требования на проектируемое изделие, определить его рабочие параметры и характеристики.

Разновидностью *исследовательских испытаний* являются *стандартные*, которые позволяют оценить свойства материалов, от которых зависит надежность деталей и узлов машины: износостойкость, коррозионную стойкость, усталостную прочность. Сложилось несколько *категорий стандартных испытаний*, которые различаются степенью приближения к эксплуатационным условиям. Например, испытания на износостойкость делятся на четыре категории.

*Первая категория.* Испытания проводятся в лабораторных условиях для выявления отдельных свойств материала. В этом случае материалы испытываются путем истирания их о наждачное полотно. Результаты испытаний позволяют оценить прочностные свойства поверхностного слоя, которые в некоторых условиях абразивного изнашивания определяют износостойкость материала. В качестве объекта исследования выделяется какое-либо одно свойство или один процесс.

*Вторая категория.* Испытания проводятся в лабораторных условиях на образцах материала, при этом воспроизводится определенный вид изнашивания за счет регламентирования условий внешнего воздействия и исключается влияние конструктивных факторов и каких-либо побочных явлений. При таких испытаниях можно получить ряд износостойкости, качественно соответствующий эксплуатационным данным, если конструктивные факторы мало сказываются на изнашивании деталей.

*Третья категория.* Испытания деталей и сопряжений проводятся на стендах с целью оценки показателей износостойкости с учетом выявления конструктивных и технологических факторов. Испытываются любые детали и узлы.

*Четвертая категория.* Испытания в эксплуатационных условиях являются заключительными и наиболее достоверными испытаниями на износостойкость узлов и деталей машины.

*Исследовательские специальные испытания* выполняются для оценки показателей надежности технических изделий. Их выполняют на стендах, полигонах и в условиях эксплуатации.

Основой стендовых испытаний является применение специальных стендов, позволяющих осуществлять привод испытываемого изделия и воспроизводить различного рода нагрузки: изменять скорость, давление, частоту приложения воздействий, вводить абразивный материал.

Испытательные стенды могут иметь следующие элементы: привод, изделие, нагружающее устройство и регистрирующую аппаратуру.

Полигонные испытания осуществляются на полигонах (треках), позволяющих увеличить частоту динамических нагрузок к изделию, возникающих от шероховатости пути и от интервала расположения препятствий. Кроме того, на полигоне моделируют спуски, подъемы, крутые повороты. Полигонные испытания наиболее приближены к эксплуата-



ционными условиям, однако для их реализации необходимы значительные капиталовложения, что под силу крупным заводам-изготовителям.

Преимуществами полигонных и стендовых испытаний являются:

- возможность получения более полной и систематизированной информации о надежности изделия;
- стабильность условий испытаний, влияющая на качество получаемой информации,
- возможность ускорения испытаний.

*Натурные испытания* предполагают наиболее полное соответствие режимов испытаний эксплуатационным условиям, т.е. физическое подобие результатов стендовых испытаний результатам, получаемым в условиях эксплуатации. Однако для получения информации требуются значительные затраты времени. Поэтому, как правило, стендовые и полигонные испытания на надежность проводят с ускорением.

*Ускоренные испытания* на надежность выполняются на стендах или полигонах, обеспечивающих возможность увеличения частоты приложения воздействий к испытываемому изделию, уменьшения времени простоя или холостых ходов, повышения нагрузочных режимов. Все это позволяет уменьшить наработку на отказ и, соответственно, сократить продолжительность испытаний.

*Эксплуатационные испытания* технических изделий на надежность могут выполняться *в условиях нормальной подконтрольной эксплуатации*, при которой обеспечивается надлежащая технологическая дисциплина использования технического изделия и поддержания его в работоспособном состоянии, а также *в условиях рядовой эксплуатации*, допускающих отклонение от нормальных условий. При таких испытаниях возможны превышение допустимых нагрузочных режимов, неполное выполнение операций технического обслуживания и т.п.

Эксплуатационные испытания позволяют получить наиболее адекватную оценку надежности испытываемого изделия, но обладают высокой трудоемкостью, отличаются необходимостью привлечения большого количества наблюдателей, в том числе и операторов машин (водителей), которые не в полной мере заинтересованы в результатах испытаний, что увеличивает вероятность потери части информации о надежности машины.

*Контрольные испытания* проводят для контроля качества продукции завода-изготовителя. К ним относятся предварительные, государственные приемосдаточные, периодические и типовые испытания.

Для решения вопроса о возможности предъявления продукции на государственные испытания опытных образцов или опытных партий завод-изготовитель проводит *предварительные испытания*. Государственные испытания проводят с опытными образцами для решения вопроса о целесообразности их производства или передачи в эксплуатацию. *Приемосда-*

*точные испытания* осуществляет завод изготовитель при приемосдаточном контроле, который проходит каждое изделие серийного производства. При контроле проверяют соответствие изделия и его узлов техническим условиям и оформляют технический паспорт.

При *периодических испытаниях* выполняют оценку готовой продукции для контроля стабильности технологического процесса ее изготовления. Объем и сроки таких испытаний устанавливаются технической документацией.

Если в процессе серийного производства в конструкцию технического изделия вводятся изменения или совершенствуется технологический процесс, то для проверки эффективности внесенных изменений и сравнения качества изделий, изготовленных в разное время, проводят  *типовые испытания*.

## 4.2. Стандартные испытания на износостойкость

### 4.2.1. Методика проведения износных испытаний

Испытания на изнашивание 1-2 категорий производят при различных видах трения: трение скольжения, трение качения, трение качения с проскальзыванием. Для этого используют образцы «колодочка – диск» или «диск – диск» из соответствующих материалов (рис. 4.2).

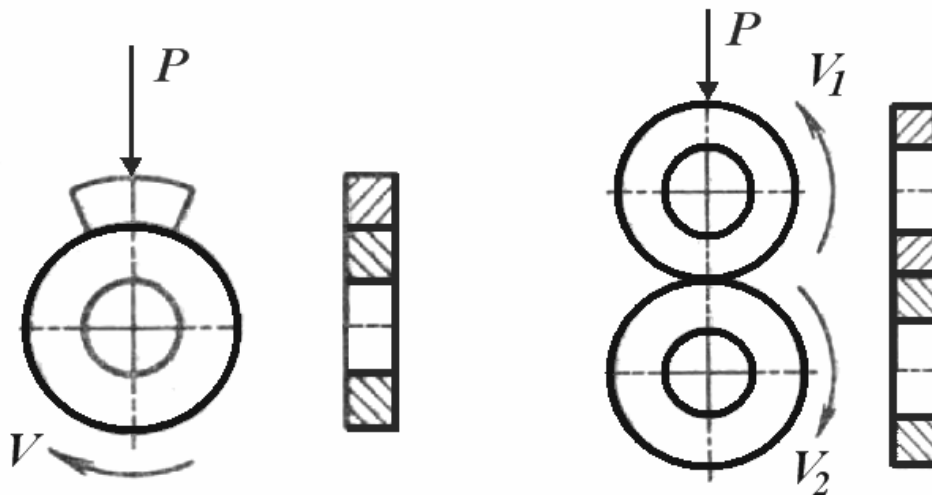


Рис. 4.2. Испытание образцов при трении скольжения и трении качения с проскальзыванием

Для проведения лабораторных испытаний образцов разработано множество различных машин трения. Одной из распространенных моделей является машина МИ-1М, позволяющая проводить испытания при различных видах трения, моделировать нагрузку и условия в зоне трения. На этой машине образцы из конструкционных материалов испытывают следующим

образом: при трении качения один образец (диск) обкатывается по другому (диску) с определенным проскальзыванием (см. рис. 4.2), при трении скольжения диск вращается, а колодочка неподвижна. Давление на колодочку передается через шарик.

В подшипниковом корпусе 1 машины размещается вал 17 (рис. 4.3), на котором устанавливают нижний образец и привод счетчика. Каретка 2 смонтирована на игольчатых подшипниках и может поворачиваться на угол  $100^\circ$  из рабочего положения в нерабочее. В каретке смонтирован вал 18, на котором устанавливают верхний образец. Нагрузку создают специальным механизмом, состоящим из нагрузочного винта 3, тяги 4, шкалы 5, пружины 6 и поджимной гайки 7. Привод нижнего образца представляет собой дифференциальный механизм, водило которого выполнено в виде маятника 8 с грузом 9 и чекой 10.

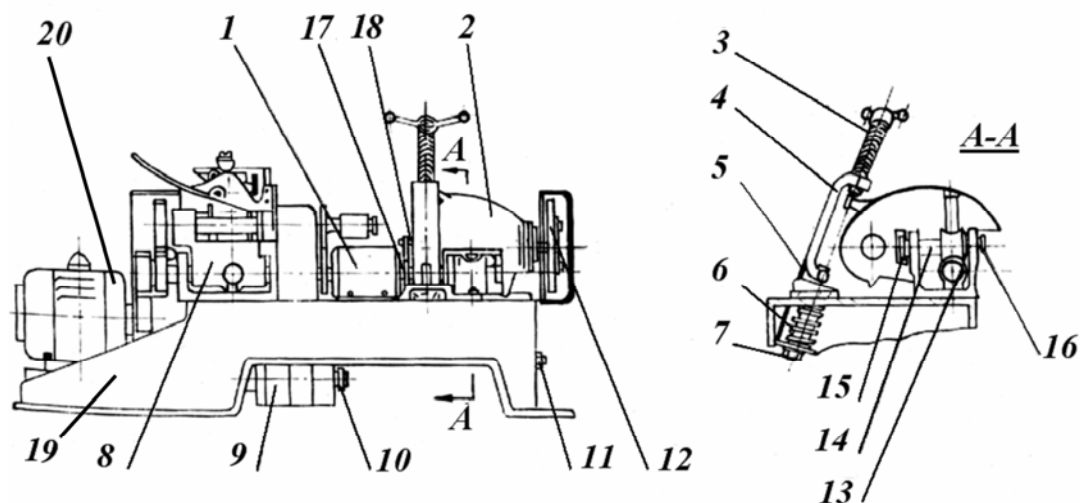


Рис. 4.3. Общий вид машины трения МИ-1М:

- 1 – корпус; 2 – каретка; 3 – нагрузочный винт; 4 – тяга; 5 – шкала нагрузки;  
 6 – пружина; 7 – гайка поджимная; 8 – маятник; 9 – грузы; 10 – чека;  
 11 – выключатель; 12 – штифт стопорный; 13 – муфта кулачковая;  
 14 – вал эксцентриковый; 15 – обойма; 16 – ручка; 17 – вал нижнего образца;  
 18 – вал верхнего образца; 19 – станина, 20 – электродвигатель

Движение передается от двигателя 20 (см. рис. 4.3), закрепленного на станине 19, через зубчатые колеса 1, 2, 3 (рис. 4.4) на зубчатые колеса 4, 5 с внутренним зацеплением. От шестерни 5 через эксцентрик 6 и счетчик 7 регистрируется число оборотов, сделанных нижним образцом. Верхний образец приводится в движение через зубчатые колеса 1, 2, 8, червячный вал 11 и сменные зубчатые колеса  $Z_1$  и  $Z_2$ . Сменные зубчатые колеса обеспечивают разницу чисел оборотов верхнего образца относительно нижнего на 10, 15, 20 %. Число оборотов нижнего образца составляет  $425 \text{ мин}^{-1}$ , а верхнего – 340, 360,  $385 \text{ мин}^{-1}$ . Под кареткой 2 (см. рис. 4.3) расположен механизм возвратно-поступательного движения каретки. Он состоит

(см. рис. 4.4) из червячного вала 11, червячного колеса 12, кулачковой муфты 13 и эксцентрикового вала 14 с обоймой 15.

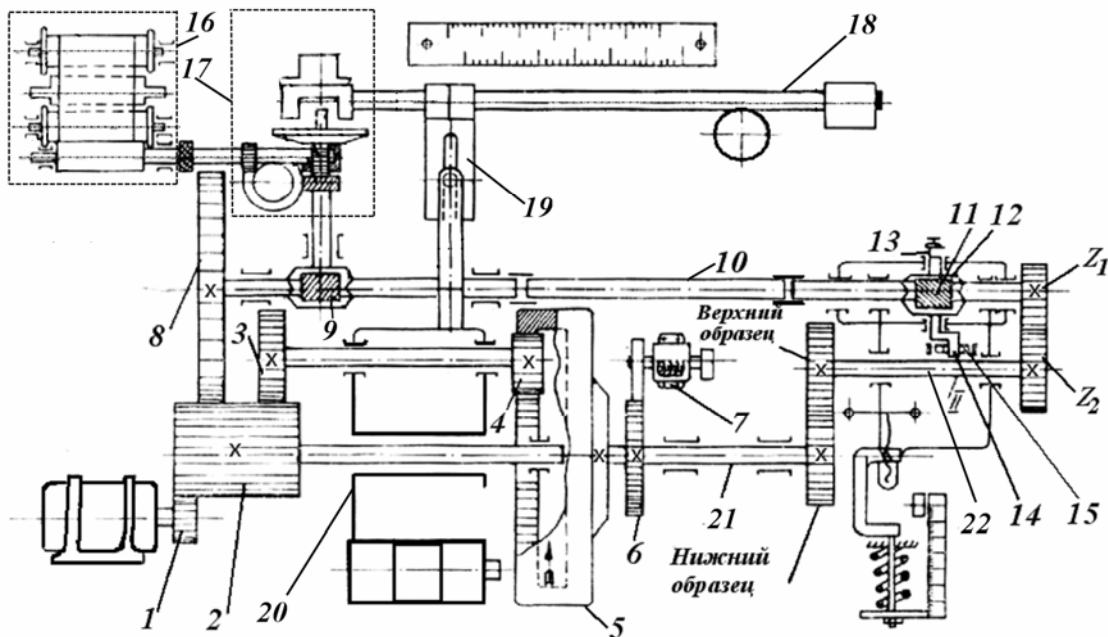


Рис. 4.4. Кинематическая схема машины трения МИ-1М:

- 1, 2, 3, 4, 5, 8 – зубчатые колеса; 6 – эксцентрик; 7 – счетчик оборотов;  
 9 – вал червячный; 10 – вал промежуточный; 11 – вал червячный; 12 – червячное колесо и сменные зубчатые колеса ( $Z_1$ ,  $Z_2$ ); 13 – муфта кулачковая;  
 14 – вал эксцентриковый; 15 – обойма; 16 – механический самописец;  
 17 – интегрирующий механизм; 18 – штанга; 19 – вилка указателя; 20 – маятник;  
 21 – вал нижнего образца; 22 – вал верхнего образца

При испытаниях на трение скольжения испытываемый ролик ставят на нижний вал 17 (см. рис. 4.3), а колодочку – на верхний вал 18.

Механизм регистрации моментов трения состоит из интегрирующего механизма 17 (см. рис. 4.4) и самописца с лентопротяжным устройством 16. Штанга 18 установлена на направляющих роликах таким образом, чтобы вилка указателя 19 вошла в палец маятника 20 и ролик встал на центр диска интегрирующего механизма. Относительное перемещение штанги 18 характеризует силу трения между образцами.

Для обеспечения граничного трения образцы следует поместить в ванночку, температура масла в которой контролируется с помощью электронного термометра, получающего сигнал от встроенной терморпары.

Для измерения износа образцов применяется метод искусственных баз, который заключается в том, что на изнашивающейся поверхности делают углубление строго определенной формы в виде конуса, пирамиды и по уменьшению размеров отпечатка судят о величине износа. Существуют две разновидности данного метода: метод отпечатков и метод вырезанных лунок (рис. 4.5).

а

б

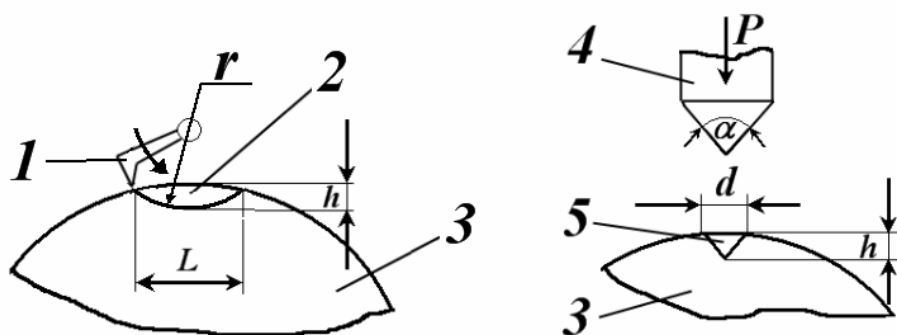


Рис. 4.5. Нанесение искусственных баз на образец «диск»:  
 а – вырезание лунки резцом; б – нанесение отпечатка кернером:  
 1 – резец; 2 – искусственная база (вырезанная лунка); 3 – образец; 4 – кернер;  
 5 – искусственная база (отпечаток)

Широкое распространение получил предложенный М.М. Хрущовым и Е.С. Берковичем метод вырезанных лунок, заключающийся в том, что на исследуемой поверхности вращающимся резцом 1 (см. рис. 4.5) вырезается лунка, по уменьшению ее длины  $L$  при износе судят о величине местного износа.

Глубина лунки  $h$  связана с ее длиной  $L$  зависимостью

$$h = \frac{L^2}{8} \left( \frac{1}{r} \pm \frac{1}{R} \right), \quad (4.1)$$

где  $r$  – радиус, описываемый вершиной резца;

$R$  – радиус цилиндрической поверхности, на которой вырезается лунка («-» – для вогнутой поверхности, «+» – для выпуклой,  $R = \infty$  – для плоскости).

При использовании метода «отпечатков» отпечаток наносится на изнашиваемую поверхность кернером. Диаметр отпечатка  $d$  связан с его глубиной зависимостью

$$h = \frac{d}{2} \cdot \operatorname{tg}\left(90 - \frac{\alpha}{2}\right), \quad (4.2)$$

где  $\alpha$  – угол при вершине кернера.

Метод лунок имеет ряд существенных преимуществ перед методом отпечатков. Во-первых, здесь вдавливание заменено резанием, и явления вспучивания и упругого восстановления сведены к минимуму. Во-вторых, имеется выгодное соотношение между длиной лунки и ее глубиной. В-третьих, усилия, необходимые для вырезания лунки, невелики, что позволяет создать малогабаритные приборы.

На базе метода «лунок» создан ряд приборов для измерения износа плоских, цилиндрических наружных и внутренних, а также фасонных поверхностей деталей в производственных и лабораторных условиях.

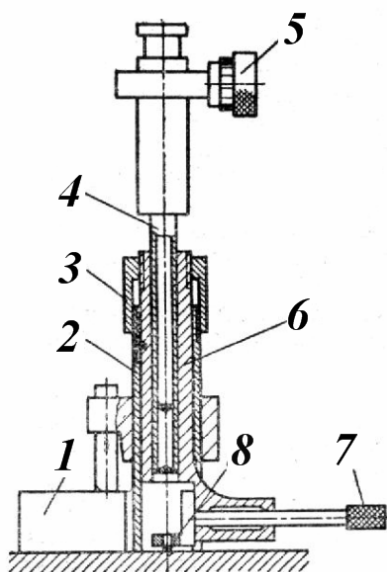


Рис. 4.6. Прибор для измерения износа П-3:  
1 – стойка; 2 – корпус; 3 – гайка;  
4 – микроскоп; 4 – окуляр;  
6 – гильза; 7 – рукоятка;  
8 – резец

Одним из таких приборов является износомер П-3 (рис. 4.6), предназначенный для нанесения и измерения лунок на плоских и выпуклых поверхностях. С помощью стойки 1 корпус прибора 2 крепится к поверхности. При вращении гайки 3 с дифференциальной резьбой внутренняя гильза 6, несущая резцедержавку, перемещается поступательно и при вращении рукоятки 7 резца 8 вырезает лунку.

Так как микроскоп 4 с винтовым окуляром-микрометром 5 и резцедержавка объединены в одном узле, а резец размещен в коленчатом валике, то обеспечивается возможность наблюдения за вырезанием лунок и доведения их до требуемого размера по делениям окуляра.

Перед проведением испытаний определяют диаметр, ширину образцов, твердость, шероховатость поверхности, смазочный материал, абразивную среду и концентрацию абразива, режим испытаний (нагрузка, скорость, температура масла), полученные результаты заносят в протокол испытаний (прил. 15). Далее на образец наносят и измеряют искусственную базу и устанавливают образец на машину трения.

Задают режим испытаний: устанавливают заданную температуру масла, концентрацию абразива и нагрузку. При проведении испытаний измеряют число оборотов образца с помощью счетчика оборотов 7 (см. рис. 4.4).

После испытания замеряют искусственную базу повторно и рассчитывают износ по формулам:

$$\text{метод «лунок»} \quad I = \frac{L_{\text{н}}^2 - L_{\text{к}}^2}{8} \left( \frac{1}{r} + \frac{1}{R} \right), \quad (4.3)$$

$$\text{метод «отпечатков»} \quad I = \frac{d_{\text{н}} - d_{\text{к}}}{2} \cdot \operatorname{tg} \left( 90 - \frac{\alpha}{2} \right), \quad (4.4)$$

где  $L_{\text{н}}$ ,  $L_{\text{к}}$  – длины искусственной базы (лунки) перед опытом и после;

$R$  – радиус образца, мм;

$r$  – радиус, описываемый вершиной резца,  $r = 8.5$  мм;

$d_{\text{н}}$ ,  $d_{\text{к}}$  – диаметры искусственной базы (отпечатка) перед опытом и после.

Вычисляют путь, пройденный образцом  $S = 0,001 \cdot \pi \cdot D \cdot N$  (м), где  $D$  – диаметр образца (диск), мм;  $N$  – число оборотов образца.

Интенсивность изнашивания определяют по выражению  $U = I / S$ .

Повторность опытов определяют в зависимости от требуемой точности и достоверности. После окончания всех опытов находят среднее значение износа, интенсивности изнашивания, их среднеквадратические отклонения и коэффициенты вариации.

Затем изменяют условия проведения опыта, например увеличивают нагрузку, и повторяют опыты. Для получения зависимости изменения износа или интенсивности изнашивания от какого-либо фактора необходимо пять-семь точек (рис. 4.7). Полученный график подвергают анализу с учетом условий проведения опытов.

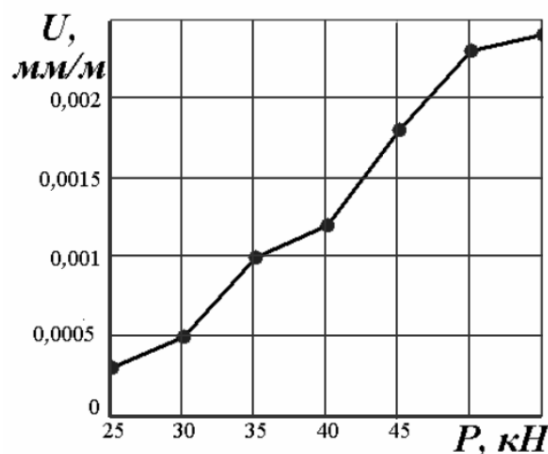


Рис. 4.7. Пример построения графика зависимости интенсивности изнашивания ( $U$ ) от нагрузки ( $P$ )

#### 4.2.2. Методика полнофакторного эксперимента

Полный факторный эксперимент (ПФЭ) используется как один из способов построения математической модели испытываемого изделия. Этот способ предпочтителен в тех случаях, когда отсутствуют априорная информация для обоснования структуры модели с позиций физико-химических представлений процессов, происходящих в изделии, а также количественная оценка степени влияния изучаемых факторов на выходную переменную изделия, его выходной показатель.

Математическая модель изделия в этих условиях может быть получена в виде уравнения связи выходной зависимой переменной  $Y$  и входных независимых переменных  $X_1, X_2, \dots, X_j, \dots, X_k$  и может быть задана функцией отклика  $Y = f(X_1, X_2, \dots, X_k)$ .

План эксперимента может быть образован путем варьирования каждого из факторов на нескольких уровнях относительно базовой точки, представляющей центр эксперимента. Эксперимент, в котором реализуются все возможные сочетания уровней факторов, называется полным факторным экспериментом.

Если выбранная модель включает только линейные члены полинома и их произведения, то для оценки всех параметров модели используется план эксперимента с варьированием всех факторов на двух уровнях. Такие планы принято называть планами типа  $2^k$ , где  $2^k = N$  – число всех возможных опытов;  $k$  – количество варьлируемых факторов.

Выбор области экспериментирования связан с детальным анализом априорной информации, на основании которого принимаются решения относительно основного уровня (центра эксперимента), интервалов варьирования.

Основной (нулевой) уровень рассматривается как исходная точка эксперимента, задаваемая комбинацией нулевых уровней факторов. План  $2^k$  эксперимента задает способ симметричного расположения экспериментальных точек (опытов) относительно нулевого уровня. Симметричное расположение точек достигается выбором интервалов варьирования.

Интервалом варьирования факторов называется некоторое число (свое для каждого фактора), прибавление которого к основному уровню дает верхний и вычитание – нижний уровни фактора.

Для упрощения записи условий каждого опыта и обработки выборочных данных эксперимента масштабы по осям факторов выбираются так, чтобы верхний уровень соответствовал +1, нижний –1, а основной – нулю. Это легко достигается с помощью преобразования  $x_j = (X_j - X_{j0}) / \Delta X_j$ , где  $x_j$  – кодированное значение  $j$ -го фактора;  $X_j$  – натуральное значение фактора;  $X_{j0}$  – натуральное значение основного уровня фактора;  $\Delta X_j$  – интервал варьирования  $j$ -го фактора.

Выбор интервалов варьирования происходит часто в условиях противоречивых требований. Например, низкая точность фиксации уровня факторов требует увеличения интервалов варьирования. При существенной кривизне поверхности отклика требуется уменьшение интервала варьирования.

С использованием кодированных значений –1, +1 могут быть построены матрицы планирования эксперимента  $2^k$ . Варианты опытов эксперимента составляют полный набор комбинаций уровней факторов.

Матрица планирования  $2^k$  для двух факторов показана в табл. 4.1.

Т а б л и ц а 4 . 1

Матрица планирования полнофакторного эксперимента  $2^2$

Номер опыта $i$	Порядок проведения повторностей опытов						Матрица планирования				Результаты эксперимента							
	$k_{i,1}$	$k_{i,2}$	...	$k_{i,j}$	...	$k_{i,m}$	$x_0$	$x_1$	$x_2$	$x_1x_2$	$y_{i,1}$	$y_{i,2}$	...	$y_{i,j}$	...	$y_{i,m}$	$y_{cp,i}$	$S_i^2$
1	$k_{1,1}$	$k_{1,2}$	...	$k_{1,j}$	...	$k_{1,m}$	+1	-1	-1	+1	$y_{1,1}$	$y_{1,2}$	...	$y_{1,j}$	...	$y_{1,m}$	$y_{cp1}$	$S_1^2$
2	$k_{2,1}$	$k_{2,2}$	...	$k_{2,j}$	...	$k_{2,m}$	+1	+1	-1	-1	$y_{2,1}$	$y_{2,2}$	...	$y_{2,j}$	...	$y_{2,m}$	$y_{cp2}$	$S_2^2$
3	$k_{3,1}$	$k_{3,2}$	...	$k_{3,j}$	...	$k_{3,m}$	+1	-1	+1	-1	$y_{3,1}$	$y_{3,2}$	...	$y_{3,j}$	...	$y_{3,m}$	$y_{cp3}$	$S_3^2$
4	$k_{4,1}$	$k_{4,2}$	...	$k_{4,j}$	...	$k_{4,m}$	+1	+1	+1	+1	$y_{4,1}$	$y_{4,2}$	...	$y_{4,j}$	...	$y_{4,m}$	$y_{cp4}$	$S_4^2$

Строки в выделенных столбцах  $x_1$  и  $x_2$  матрицы планирования задают собственно *план эксперимента*, т.е. условия опытов, реализуемых при всех возможных комбинациях уровней факторов.

Проведение любого эксперимента связано с ошибками, определение значений которых необходимо для оценки результатов эксперимента. В



связи с этим порядок проведения опытов должен быть выбран таким, чтобы имелась возможность оценить случайную ошибку эксперимента и избежать влияния возможных систематических ошибок.

Выделить ошибку эксперимента, оцениваемую как  $s_{\text{ош}}^2$ , можно только при дублировании опытов повторением  $m$  раз каждой строки матрицы планирования.

Перед планированием опытов с изделием следует определить возможные факторы, мешающие исследованию, и выполнить рандомизацию порядка проведения опытов с тем, чтобы эти факторы влияли на результаты эксперимента случайным образом.

Рандомизация осуществляется следующим образом: в таблице случайных чисел берутся числа от 1 до  $4m$  и записываются в столбцы  $k_{i,1}, \dots, k_{i,m}$  матрицы планирования (каждое число берется по одному разу). Пусть, например,  $k_{2,1} = 4$ . Это значит, что первая повторность второго опыта реализуется четвертой по порядку. При этом мешающий фактор при случайном порядке проведения опытов не будет вызывать систематической ошибки. Результаты эксперимента для каждой строки опытов записываются в столбцы  $y_{i,1} \dots y_{i,m}$  матрицы планирования, и производится их осреднение:

$$y_{\text{ср}i} = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m y_{i,j}. \quad (4.5)$$

Прежде чем приступать к определению модели эксперимента в виде уравнения регрессии, необходимо осуществить *проверку воспроизводимости эксперимента* для исследуемого изделия. Эта проверка заключается в проверке однородности выборочных построчных дисперсий  $D_i$  в реализованной матрице планирования.

Дисперсии в строках плана находят по известной формуле

$$D_i = \frac{1}{m-1} \sum_{j=1}^m (y_{i,j} - y_{\text{ср}i})^2. \quad (4.6)$$

Проверку гипотезы об однородности оценок дисперсии проводят по критерию Кохрена, который использует выборочный закон распределения отношения максимальной дисперсии  $D_{\text{max}}$  к сумме всех дисперсий:

$$G_{\text{max}} = \frac{D_{\text{max}}}{\sum_{i=1}^N D_i}, \quad (4.7)$$

где  $N$  – число всех опытов в плане;

$m$  – число дублирующих опытов (повторностей).

Если вычисленное значение  $G_{\max}$  окажется меньше значения  $G_{\text{крит}}$ , найденного по прил. 20 для числа степеней свободы  $\nu_1 = m - 1$ ,  $\nu_2 = N$  и для выбранного уровня значимости  $\alpha$ , то данные эксперимента не противоречат проверяемой гипотезе однородности дисперсий. В этом случае дисперсия ошибки эксперимента оценивается с  $N \cdot (m - 1)$  степенями свободы по формуле

$$D_{\text{ош}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N D_i. \quad (4.8)$$

Если проверка воспроизводимости дала отрицательный результат, то остается признать невоспроизводимость эксперимента вследствие наличия в изделии источников неоднородности, для выделения которых следует обратиться к рассматриваемым приемам дисперсионного анализа.

После проверки воспроизводимости эксперимента можно перейти к определению модели эксперимента  $2^2$  в виде уравнения регрессии

$$y = b_0 \cdot x_0 + b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2 + b_{12} \cdot x_1 \cdot x_2. \quad (4.9)$$

Общие формулы для вычисления коэффициентов  $b_j$  имеют вид

$$b_j = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_{i,j} \cdot y_{\text{ср}i}, \text{ т.е.} \quad (4.10)$$

$$b_0 = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 x_{i,0} \cdot y_{\text{ср}i} = \frac{(+1) \cdot y_{\text{ср}1} + (+1) \cdot y_{\text{ср}2} + (+1) \cdot y_{\text{ср}3} + (+1) \cdot y_{\text{ср}4}}{4},$$

$$b_1 = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 x_{i,1} \cdot y_{\text{ср}i} = \frac{(-1) \cdot y_{\text{ср}1} + (+1) \cdot y_{\text{ср}2} + (-1) \cdot y_{\text{ср}3} + (+1) \cdot y_{\text{ср}4}}{4},$$

$$b_2 = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 x_{i,2} \cdot y_{\text{ср}i} = \frac{(-1) \cdot y_{\text{ср}1} + (-1) \cdot y_{\text{ср}2} + (+1) \cdot y_{\text{ср}3} + (+1) \cdot y_{\text{ср}4}}{4}.$$

Коэффициенты при взаимодействиях факторов, например  $(x_1 \cdot x_2)$ , определяют по выражению

$$b_{12} = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 x_{i,1} \cdot x_{i,2} \cdot y_{\text{ср}i} = \frac{(+1) \cdot y_{\text{ср}1} + (-1) \cdot y_{\text{ср}2} + (-1) \cdot y_{\text{ср}3} + (+1) \cdot y_{\text{ср}4}}{4}.$$

Коэффициенты при независимых переменных  $x_j$  указывают на силу влияния факторов. Чем больше численная величина коэффициента, тем большее влияние оказывает фактор. Знак коэффициента указывает направление влияния фактора. Величина коэффициента соответствует вкладу данного фактора в выходную переменную величину при изменении значения фактора в интервале варьирования. Таким образом, величина  $b_j$  может быть интерпретирована как оценка чувствительности выходной переменной  $y$  к вариации соответствующей входной переменной  $x_j$ .

В статистический анализ полученного уравнения регрессии входит проверка статистической значимости вычисленных коэффициентов и пригодности (адекватности) полученного уравнения для описания экспериментальных данных.

Проверка значимости коэффициентов уравнения регрессии производится с помощью  $t$ -статистики Стьюдента, которая вычисляется по формуле для каждого коэффициента

$$t_j = \frac{|b_j|}{\sigma(b_j)}, \quad (4.11)$$

где  $\sigma(b_j)$  – среднеквадратичное отклонение коэффициентов  $b_j$ .

Дисперсия коэффициентов  $b_j$  оценивается с числом степеней свободы  $\nu_b = N \cdot (m - 1)$  и определяется по формуле

$$D(b_j) = \sigma^2(b_j) = D_{\text{ост}} / (N \cdot m). \quad (4.12)$$

Если найденная величина  $t_j$  превышает значение  $t_{\text{крит}}$ , определенное по приложению 13 для числа степеней свободы  $\nu_b = N \cdot (m - 1)$  и выбранной вероятности  $(1 - \alpha)/2$ , то коэффициент  $b_j$  считается значимым. В противном случае (при  $t_j \leq t_{\text{крит}}$ ) коэффициент  $b_j$  считают статистически незначимым.

Незначимость некоторого коэффициента показывает, что в выбранном диапазоне варьирования переменных  $x_j$  отсутствует статистически значимое влияние данного фактора на выходную переменную  $y$ . Поскольку вычисленные оценки коэффициентов являются независимыми, то фактор с незначимым коэффициентом может быть удален из уравнения регрессии без пересчета остальных значимых коэффициентов. В результате получится усеченная модель эксперимента, содержащая только значимые факторы. Например, если второй фактор не значим, то уравнение примет вид

$$y_{yc} = b_0 \cdot x_0 + b_1 \cdot x_1 + b_{12} \cdot x_1 \cdot x_2.$$

После исключения факторов с незначимыми коэффициентами производится проверка адекватности полученной модели.

Рассеяние результатов эксперимента относительно подобранного уравнения регрессии характеризуется остаточной дисперсией  $D_{\text{ост}}$ , оценка которой находится следующим образом:

$$D_{\text{ост}} = \frac{1}{N - d} \sum_{i=1}^N m \cdot (y_{\text{ср}i} - y_{yci})^2, \quad (4.13)$$

где  $d$  – число оцениваемых (значимых) коэффициентов в уравнении регрессии.

Остаточная дисперсия оценивается с числом степеней свободы  $\nu_{\text{ост}} = N - d$ ,  $y_{yc,i}$  – значение выходной зависимой переменной, полученной по усеченному уравнению.

При проверке адекватности выясняется соотношение между остаточной дисперсией  $D_{\text{ост}}$  и дисперсией ошибки эксперимента  $D_{\text{ош}}$ . Если  $D_{\text{ост}}$  не превышает ошибки эксперимента  $D_{\text{ош}}$ , то считается, что модель адекватно представляет результаты эксперимента. Если  $D_{\text{ост}} > D_{\text{ош}}$ , то модель нельзя признать пригодной.

Окончательное решение о пригодности усеченной модели эксперимента можно принять с помощью критерия Фишера ( $F$ ):

$$F = D_{\text{ост}} / D_{\text{ош}}. \quad (4.14)$$

Если вычисленное отношение меньше  $F_{\text{крит}}$ , найденного по прил. 14 для соответствующих степеней свободы числителя  $\nu_{\text{ост}} = N - d$ , знаменателя  $\nu_{\text{ош}} = N(m - 1)$  и выбранной вероятности  $1 - \alpha$ , то усеченная модель принимается адекватной.

Таким образом, полнофакторный эксперимент позволяет оценить влияние нескольких факторов и их взаимодействий на выходную зависимую переменную с помощью полученной модели в отличие от однофакторного (см. подразд. 4.3.1).

Поскольку методика обработки результатов полнофакторного эксперимента весьма трудоемка, целесообразно для этого использовать компьютерный математический пакет MathCad. Пример реализации обработки трехфакторного эксперимента представлен в прил. 17.

### 4.3. Ускоренные испытания на надежность

Ускоренные испытания предназначены для сокращения времени получения достоверной информации о надежности изделия. Их эффективность оценивается коэффициентом ускорения

$$K_y = T_{\text{нэ}} / T_y, \quad (4.15)$$

где  $T_{\text{нэ}}$ ,  $T_y$  – продолжительность эксплуатационных и ускоренных испытаний.

Основными требованиями, предъявляемыми к ускоренным испытаниям, являются физическое подобие отказов и максимально возможное ускорение испытаний.

Физическое подобие состоит в том, чтобы отказ технического изделия при ускоренных и эксплуатационных испытаниях был одинаков по характеру и виду разрушения.

Математическое подобие состоит в том, чтобы вероятности безотказной работы при ускоренных испытаниях и в эксплуатации были одинаковые, что может быть оценено с помощью коэффициентов вариации, которые при ускоренных и эксплуатационных испытаниях должны быть равны.

Математическое выражение условия подобия имеет вид

$$\frac{|V_э - V_y|}{\sqrt{\frac{V_э^2}{2 \cdot n_э} + \frac{V_y^2}{2 \cdot n_y}}} < 3, \quad (4.16)$$

где  $V_э, V_y$  – коэффициенты вариации наработки на отказ в эксплуатации и при ускоренных испытаниях;

$n_э, n_y$  – число изделий при эксплуатационных и ускоренных испытаниях.

Ускоренные испытания различают по способу ускорения.

*Испытания, уплотненные по времени* (рис. 4.8), предусматривают ускорение за счет сокращения холостых ходов, простоев. Они проводятся без интенсификации режимов нагружения, при этом учитывается влияние перерывов в работе на процесс разрушения.

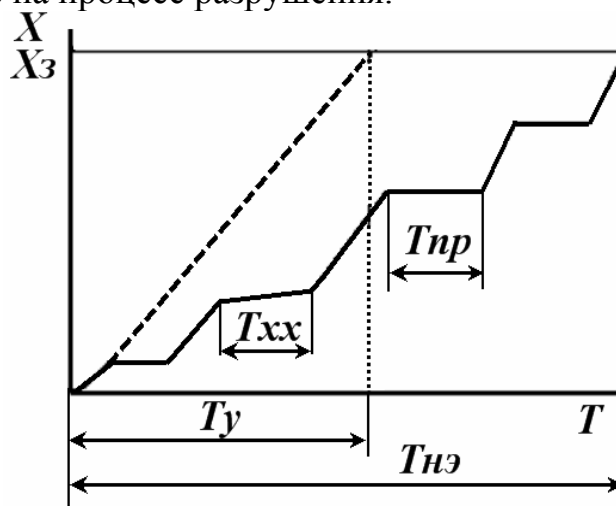


Рис. 4.8. Сокращение времени достижения параметром заданного значения  $X_з$  за счет устранения простоев и холостых ходов машины

Уплотнение времени производится за счет:

➤ *исключения простоев изделия и холостых ходов* в течение суток, соответственно коэффициент ускорения определяется по формуле

$$K_y = (T_p + T_{пр} + T_{хх}) / T_p, \quad (4.17)$$

где  $T_p, T_{пр}, T_{хх}$  – время работы, простоя и холостых ходов технического изделия в течение суток;

➤ *учащения приложения нагрузки к изделию*, коэффициент ускорения в этом случае рассчитывают по выражению

$$K_y = N_y / N_{нэ}, \quad (4.18)$$

где  $N_y, N_{нэ}$  – число циклов нагружения при ускоренных испытаниях и в условиях нормальной эксплуатации;

- имитацией действительного воздействия рабочей среды на машину;
- воспроизведением неблагоприятного, но реального сочетания конструктивных, производственных, силовых, абразивных факторов.

Эти испытания эффективны для оценки надежности изделий, работающих с малой нагрузкой. Достоинством подобных испытаний является наиболее полное физическое подобие отказов, однако ускорение испытаний незначительное и составляет 2–5 раз.

*Испытания, ужесточенные по факторам нагружения*, характеризуются существенным увеличением величин эксплуатационных параметров: нагрузки, скорости, температуры, а также факторов внешней среды.

Коэффициент ускорения в общем виде может быть определен по формуле

$$K_y = \frac{P_{\max} \cdot V_{\max}}{P_{\text{ср}} \cdot V_{\text{ср}}}, \quad (4.19)$$

где  $P_{\max}$ ,  $V_{\max}$  – максимальная нагрузка и скорость при ускоренных испытаниях;

$P_{\text{ср}}$ ,  $V_{\text{ср}}$  – средняя нагрузка и скорость при эксплуатации технического изделия.

Форсирование режимов и ужесточение условий должны производиться на базе анализа физической природы отказов и разработки моделей подобия для возможности пересчета на нормальные условия эксплуатации (рис. 4.9).

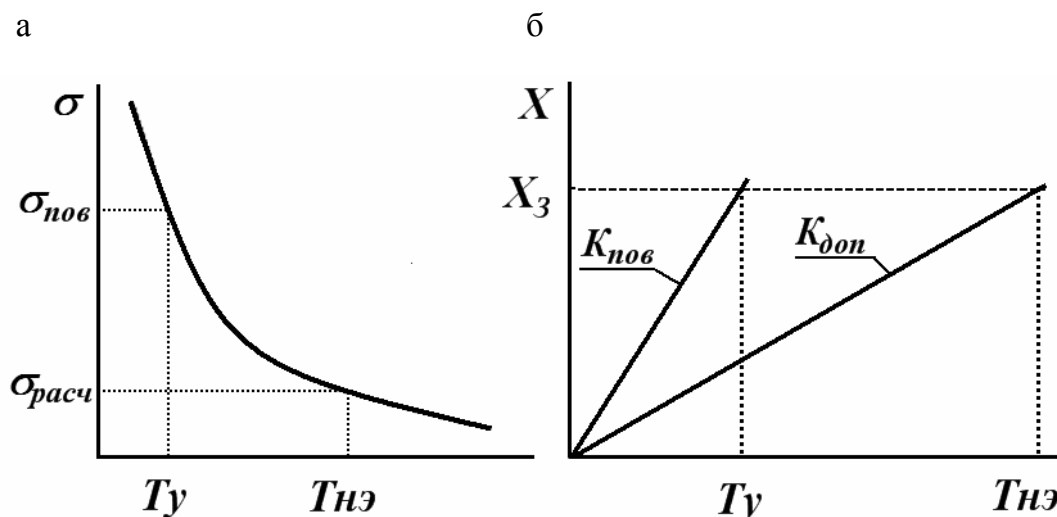


Рис. 4.9. Уменьшение продолжительности испытаний за счет:  
а – повышения напряжения в опасном сечении детали  $\sigma_{\text{пов}}$  в сравнении с расчетным  $\sigma_{\text{расч}}$ ; б – увеличения концентрации абразива в масле  $K_{\text{пов}}$  в сравнении с допустимой  $K_{\text{доп}}$

Ускорение при ужесточенных испытаниях обеспечивается 10–120 раз, что является основным достоинством этих испытаний.

Испытания, ускоренные за счет повышения точности измерения выходных параметров, проводят не до предельного состояния (предельно допустимого), а до более строгого по техническим условиям, что по понятным причинам сокращает продолжительность испытаний (рис. 4.10).

Коэффициент ускорения можно определить по выражению

$$K_y = \frac{\delta}{\delta_y}, \quad (4.20)$$

где  $\delta$  – допуск на параметр;

$\delta_y$  – допуск повышенной строгости.

К недостаткам этих испытаний следует отнести потребность в высоко-точной дорогостоящей аппаратуре и невозможность реализации в период приработки машины.

При ускоренных ступенчатых испытаниях требуется двойное количество изделий. Эти испытания проводятся в следующей последовательности. Первое изделие испытывают при эксплуатационной нагрузке за время  $T_{э1}$ . Затем нагрузку увеличивают и доводят изделие до предельного состояния за время  $T_{y1}$ . Второе изделие испытывают только на ужесточенном режиме и получают информацию о надежности за время  $T_{y2}$ .

Испытания повторяют на нескольких парах образцов и определяют средние значения  $T_{э1.сп}$ ,  $T_{y1.сп}$ ,  $T_{y2.сп}$ .

В результате испытаний первого образца он достигает предельного состояния за время  $(T_{э1} + T_{y1})$ , повреждаясь пропорционально отношениям

$$\frac{T_{э1}}{T_э} + \frac{T_{y1}}{T_{y2}} = 1, \quad (4.21)$$

где  $T_э$  – наработка до предельного состояния только в эксплуатационном режиме;

$T_{y2}$  – наработка до предельного состояния только в ужесточенном режиме.

Соответственно наработка до предельного состояния в эксплуатации будет равна:

$$T_{э.сп} = \frac{T_{э1.сп}}{1 - \frac{T_{y1.сп}}{T_{y2.сп}}}. \quad (4.22)$$

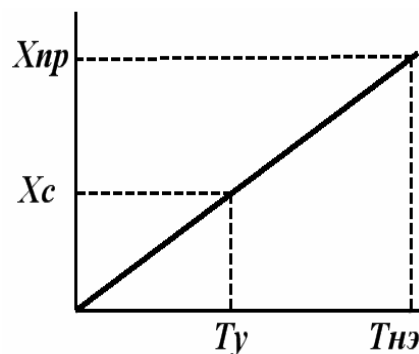


Рис. 4.10. Зависимость продолжительности испытаний от точности измерений параметра состояния технического (X)

Используя выражение (4.22), определяют коэффициент ускорения:

$$K_y = \frac{T_{э.ср}}{T_{y2.ср}} = \frac{T_{э1.ср}}{T_{y2.ср} - T_{y1.ср}}. \quad (4.23)$$

Недостаток ступенчатых испытаний – необходимость увеличения числа изделий в 2 раза, достоинство – исключение эксплуатационных испытаний и возможность определения коэффициента ускорения.

#### 4.4. Эксплуатационные испытания машин на надежность

##### 4.4.1. Разновидности эксплуатационных испытаний

Эксплуатационные испытания применяют для оценки надежности как опытных образцов, так и серийных.

Эксплуатационным испытаниям подвергают не все изделия, образующие генеральную совокупность, а лишь часть их, называемую выборкой.

Ограниченность объема выборки, приводящая к статистической погрешности, и потери части информации о надежности при эксплуатационных испытаниях, увеличивающие систематическую погрешность, существенно снижают точность и достоверность этих испытаний.

Существуют различные методы получения информации о надежности изделия в определенных условиях его эксплуатации (рис. 4.11).

Объекты испытания		
Серийные		Опытные
Продолжительность испытаний		
Полные	С ограниченной продолжительностью	Со случайной продолжительностью
Вид сбора информации		
Непрерывные		Дискретные
Информационный параметр		
Наработка до отказа	Параметр технического состояния	Параметр нагружения

Рис. 4.11. Разновидности эксплуатационных испытаний

*Полные испытания* – это испытания, при которых исследователи получают необходимую информацию обо всех поставленных под наблюдение изделиях.

*Испытания с ограниченной продолжительностью* проводят до наперед заданной наработки. Испытания со случайной продолжительностью



проводят до наступления определенного количества отказов испытываемых изделий.

При испытаниях с ограниченной продолжительностью возможно получение однократно усеченной и многократно усеченной информации.

*Однократно усеченная информация* – это информация о надежности изделий, которая содержит ресурсы части машин и приостановленные наработки машин, по величине превосходящие максимальный ресурс.

*Приостановленная наработка* – это наработка, при которой еще работоспособное изделие было снято с испытаний.

*Многократно усеченная информация* – это информация, в которой в произвольном порядке чередуются как приостановленные наработки, так и ресурсы.

Информационными параметрами, определяемыми в процессе эксплуатационных испытаний, могут быть наработка на отказ, продолжительность ремонтно-обслуживающих воздействий, параметр технического состояния, параметр нагружения технического изделия.

*Испытания на отказ* представляют собой наблюдения с фиксацией моментов отказов изделий. В настоящее время, согласно ГОСТ 27402–95, установлено несколько планов испытаний, а также возможность или невозможность замены в ходе испытаний отказавших элементов.

*Испытания по параметру состояния* изделия предполагают периодические измерения значений параметра технического состояния с целью получения зависимости изменения параметра технического состояния от наработки  $X=f(L)$  (рис. 4.12, а) и дисперсии  $D$  (рис. 4.12, б) от наработки.

а

б

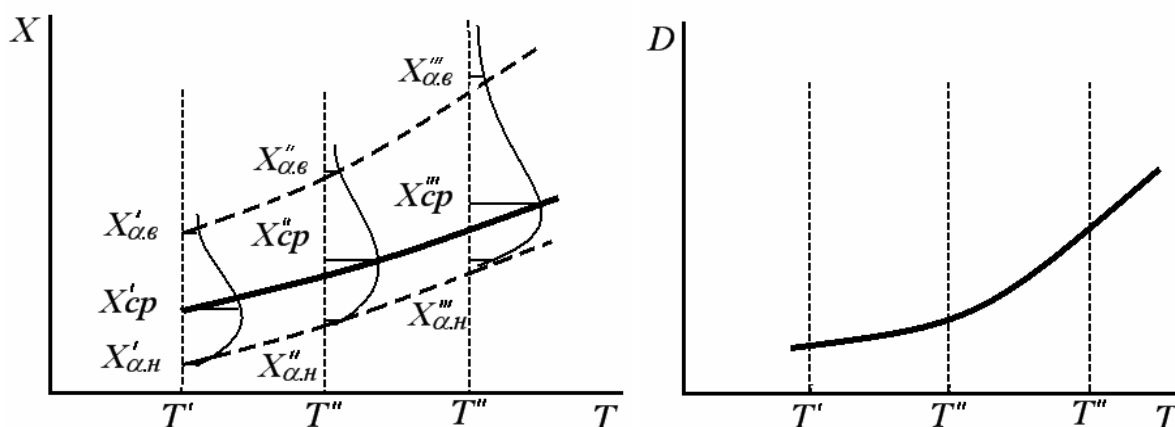


Рис. 4.12. Зависимости изменения параметра технического состояния ( $X$ ) и дисперсии ( $D$ ) от наработки ( $T$ )

При *испытании по параметру нагружения* регистрируют изменение эксплуатационной нагрузки в процессе работы изделия  $P=f(T)$  (рис. 4.13), а затем по известному коэффициенту пропорциональности, полученному в

лабораторных условиях, определяют изменение параметра технического состояния от наработки:

$$X(T) = P(T) \cdot K_{\text{тп}}$$

где  $X(T)$  – параметр технического состояния;

$P(T)$  – нагрузка.

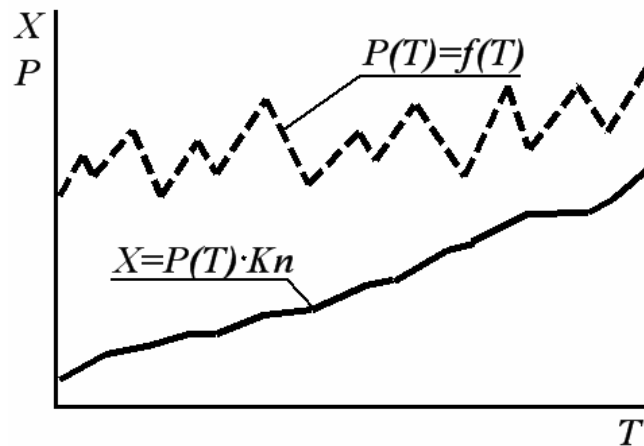


Рис. 4.13. Оценка изменения параметра технического состояния ( $X$ ) от изменения нагрузки ( $P$ ) на испытываемый изделие при эксплуатации

#### 4.4.2. Планы испытаний

Различают следующие планы испытаний: [NUN], [NUT], [NUr], [NRT], [NRr] и др.

Во всех планах введены следующие обозначения:  $N$  – количество изделий, поставленных под наблюдение;  $U$  – планы, в которых отказавшие элементы не заменяют новыми;  $R$  – планы, в которых предусматривается замена отказавших изделий;  $M$  – планы в которых изделия восстанавливают;  $T$  – установленная наработка или продолжительность испытаний;  $r$  – число отказов или предельных состояний, до возникновения которых ведутся наблюдения.

Планы расшифровываются нижеследующим образом.

[NUN] – под наблюдением находится  $N$  технических изделий, наблюдение ведется за всеми изделиями до отказа, отказавшие элементы не заменяются, применяется для оценки ресурса недолговечных изделий.

[NUT] – под наблюдением находится  $N$  технических изделий, наблюдение ведется до момента времени  $T$ , отказавшие элементы могут ремонтироваться, но данные об их отказах не учитываются, используются для определения гамма-процентного ресурса долговечных машин, результаты достоверны при наличии информации о ресурсах 50 % машин.

[NUr] – отличается от предыдущего тем, что испытания прекращаются после отказа  $r$  изделий, применяются для изделий с низкой долговечностью.

[NRT] – предусматривает возможность замены отказавших элементов в процессе испытаний, испытания проводят до наработки  $T$ , с помощью этого плана оцениваются безотказность и ремонтпригодность.

[NRr] – испытание прекращается при отказе  $r$  элементов, отказавшие элементы заменяются или ремонтируются, и данные об отказах учитываются при обработке информации, используется при определении коэффициента готовности технических изделий.

[NMT] – испытания прекращают после истечения наработки  $T$  каждого изделия, отказавшие изделия восстанавливают и продолжают их испытание, применяется для оценки безотказности восстанавливаемых изделий (параметр потока отказов, наработка на отказ).

[NMT $_{\Sigma}$ ] – испытания заканчивают тогда, когда суммарная наработка достигнет ранее установленной величины  $T_{\Sigma}$ .

Таким образом, при оценке безотказности изделий используют план [NRT], при оценке долговечности автомобилей – [NUT]. Ремонтпригодность оценивают при испытаниях по планам [NUN] и [NRT], а оценка комплексных показателей надежности в целом осуществляется с помощью планов [NUN], [NUT] и [NRT].

При выборе плана учитываются определяемый показатель надежности и долговечность изделия.

Для каждого из планов разработаны методики определения числа изделий, порядка проведения испытаний и критерии их прекращения: достижение определенного числа отказов ( $r$ ), достижение определенной наработки изделий ( $T$ ), выполнение суммарной наработки всеми изделиями ( $T_{\Sigma}$ ).

При выборе количества изделий для испытаний руководствуются относительной ошибкой, доверительной вероятностью, длительностью наблюдений. Для нормального закона распределения определяемого параметра объем выборки определяют по формуле

$$N = \frac{V^2 \cdot t_{\alpha}^2}{\delta^2}, \quad (4.24)$$

где  $V$  – коэффициент вариации;

$\delta$  – допустимая относительная ошибка;

$t_{\alpha}$  – коэффициент Стьюдента, определяемый в зависимости от доверительной вероятности  $\alpha$  (см. прил. 7).

Если информация о законе распределения отсутствует, то число испытаний вычисляется по выражению

$$N = \frac{\ln(1 - \alpha)}{\ln(P(T))}, \quad (4.25)$$

где  $P(T)$  – вероятность безотказной работы в течение наработки  $T$ .

Количество информации находится в пределах 15...50, если коэффициент вариации равен 0,3...0,5. Относительная ошибка переноса составит  $\delta \approx 10...20\%$  при умеренной стоимости испытаний.

#### 4.4.3. Методы сбора информации

При эксплуатационных испытаниях технических изделий информация может быть получена одним или несколькими перечисленными ниже способами.

*Опрос оператора* проводится для получения точной и достоверной информации по разработанной методике: предварительный опрос, уточнение информации, планомерный опрос по всем агрегатам с зондированием отказов и осмотром изделия. Сведения вносятся в специальную форму.

Недостатком этого способа является возможность потери информации из-за памяти оператора.

*Ведение операторами листов наблюдений*, бортовых журналов осуществляется совместно с опросом и осмотром. Каждый отказ регистрируется и по нему составляется донесение в соответствии с разработанной формой.

*Инструментальный метод* заключается в периодическом диагностировании технического изделия и сохранении результатов диагностирования в виде диагностической карты.

*Хронометраж* позволяет определить оперативные затраты труда на выполнение операций технического обслуживания, ремонта изделия. Результаты хронометража заносятся в хронокарту, которая также содержит полные сведения об изделии, рабочем месте, исполнителе.

*Анализ документации учета и отчетности предприятия* позволяет получить информацию о надежности по отчетной информации (путевые, ремонтные листы и т.п.) о пробеге автомобилей, о расходе топливосмазочных материалов и запчастях, об издержках на ремонт автомобилей, о выполнении ремонтов и ТО подвижного состава предприятия.

#### 4.4.4. Методика обработки полной информации о показателе надежности

Общая методика математической обработки опытной информации о показателях надежности включает следующие этапы:

- построение вариационного ряда информации;
- расчет статистического ряда исходной информации;
- определение величины смещения начала рассеивания  $t_{см}$ ;
- определение точечных характеристик распределения показателя надежности: среднего значения и среднеквадратического отклонения  $\sigma$  показателя надежности (ПН);
- проверка информации на выпадающие точки;

- построение графиков распределения показателя надежности: гистограммы, полигона и кривой накопленной опытной вероятности;
- расчет коэффициента вариации и предварительный выбор теоретического закона распределения (ТЗР), определение его параметров;
- графическое изображение интегральной  $F(t)$  и дифференциальной  $f(t)$  функций;
- проверка совпадения опытных и теоретических законов распределения ПН по критериям согласия;
- определение доверительных границ рассеивания одиночных, средних значений показателя надежности и наибольших возможных ошибок переноса.

1. В качестве исходной информации примера реализации методики принята *трудоемкость технического обслуживания* ТО-2, определенная у 37 автомобилей КамАЗ-5320 в чел.-ч: 15,08, 14,52, 13,05, 13,72, 13,22, 14,25, 16,43, 14,84, 15,48, 15,91, 14,47, 15,03, 14,81, 15,31, 13,6, 13,18, 20,29, 13,96, 12,07, 15,94, 13,75, 12,21, 12,53, 14,46, 14,56, 15,00, 15,43, 14,95, 13,2, 11,43, 17,18, 16,35, 12,3, 14,77, 17,72, 13,89, 10,64.

2. *Вариационный ряд информации* представляет собой ряд информации, расположенной в порядке возрастания:

10,64, 11,43, 12,07, 12,21, 12,3, 12,53, 13,05, 13,18, 13,2, 13,22, 13,6, 13,72, 13,75, 13,89, 13,96, 14,25, 14,46, 14,47, 14,52, 14,56, 14,77, 14,81, 14,84, 14,95, 15,00, 15,03, 15,08, 15,31, 15,43, 15,48, 15,91, 15,94, 16,35, 16,43, 17,18, 17,72, 20,29. Общее количество информации  $N = 37$ .

3. *Статистический ряд информации* составляют для упрощения дальнейших расчетов, в том случае, когда повторность исходной информации  $N$  больше 25 значений показателей надежности.

3.1. *Количество интервалов статистического ряда  $n$*  определяют из уравнения

$$n = \sqrt{N} = \sqrt{37} = 6,083.$$

Полученный результат округляют в сторону увеличения до ближайшего целого числа. Количество интервалов не должно выходить за пределы 6–20, поэтому окончательно  $n = 7$ .

3.2. Все интервалы статистического ряда должны быть равны один другому по величине и не иметь разрывов. *Величину интервала  $A$*  определяют по уравнению

$$A = \frac{t_{\max} - t_{\min}}{n} = \frac{20,29 - 10,64}{7} = 1,38 \text{ чел.-ч},$$

где  $t_{\max}$  и  $t_{\min}$  – соответственно наибольшее и наименьшее значения трудоемкости ТО-2 в вариационном ряду.

Величину интервала  $A$  следует округлять в большую сторону до удобного для дальнейших расчетов значения.

3.3. Начальное, среднее и конечное значения показателя надежности для каждого интервала рассчитывают по выражениям

$$t_{H,i} = t_{\text{MIN}} + (i-1) \cdot A,$$

$$t_{K,i} = t_{\text{MIN}} + i \cdot A,$$

$$t_{C,i} = (t_{H,i} + t_{K,i})/2,$$

где  $i$  – номер интервала,  $i = 1, \dots, n$ .

Например, для 1 интервала статистического ряда

$$t_{H,1} = 10,64 + (1-1) \cdot 1,38 = 10,64 \text{ чел.-ч},$$

$$t_{K,1} = 10,64 + 1 \cdot 1,38 = 12,02 \text{ чел.-ч},$$

$$t_{C,1} = (t_{H,1} + t_{K,1})/2 = (10,64 + 12,02)/2 = 11,33 \text{ чел.-ч}.$$

3.4. Для каждого интервала определяют частоту, т.е. количество точек информации, попадающих в интервал. Для этого сравнивают вариационный ряд с начальным и конечным значениями каждого интервала. Результаты заносят в статистический ряд (табл. 4.2).

Таблица 4.2

Статистический ряд информации о распределении трудоемкости ТО-2 автомобиля КамАЗ-5320

Показатель	Начальное и конечное значения интервалов, чел.-ч						
	10,64–12,02	12,02–13,40	13,40–14,78	14,78–16,16	16,16–17,54	17,54–18,92	18,92–20,30
1. Среднее значение в интервале $t_{C,i}$	11,33	12,71	14,09	15,47	16,85	18,23	19,61
2. Частота, $m_i$	2	8	11	11	3	1	1
3. Опытная вероятность (частость) $P_i$	0,054	0,216	0,297	0,297	0,081	0,027	0,027
4. Накопленная опытная вероятность $\sum m_i/N$	0,054	0,27	0,568	0,865	0,946	0,973	1,000

3.5. Опытную вероятность  $P_i$  определяют как отношение числа случаев  $m_i$  появления показателя надежности в каждом интервале к повторности информации  $N$ .

Так, например, в первом интервале частость (опытная вероятность) равна:

$$P_1 = \frac{m_1}{N} = \frac{2}{37} \approx 0,054.$$

3.6. *Накопленная опытная вероятность* показывает вероятность попадания показателя надежности в интервал от 0 до конца соответствующего интервала статистического ряда.

Например, для третьего интервала накопленная опытная вероятность будет равна:

$$\sum P_3 = \sum_{k=1}^3 \frac{m_k}{N} = \frac{2}{37} + \frac{8}{37} + \frac{11}{37} \approx 0,568.$$

4. У многих показателей надежности технических изделий начало рассеивания смещено относительно их нулевого значения.

В инженерных расчетах показателей надежности при определении *величины смещения* начала рассеивания  $t_{см}$  используется выражение

$$t_{см} = t_{мин} - 0,5 \cdot A.$$

Для предлагаемого примера величина смещения равна:

$$t_{см} = 10,64 - 0,5 \cdot 1,38 = 9,95 \text{ чел.-ч.}$$

5. *Среднее значение*  $t_{ср}$  является важной характеристикой показателя надежности. По средним значениям планируют работу изделий, определяют объемы ремонтно-обслуживающих работ.

При наличии статистического ряда среднее значение показателя надежности находят по уравнению

$$t_{ср} = \sum_{i=1}^n t_{C,i} \cdot P_i,$$

где  $n$  – количество интервалов в статистическом ряду;

$t_{C,i}$  – значение середины  $i$ -го интервала;

$P_i$  – опытная вероятность  $i$ -го интервала.

$$t_{ср} = (11,33 \cdot 0,054 + 12,71 \cdot 0,216 + \dots + 19,61 \cdot 0,027) = 14,47 \text{ чел.-ч.}$$

6. Наиболее удобной для расчетов характеристикой рассеивания служит *среднеквадратическое отклонение*

$$\sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^n (t_{C,i} - t_{ср})^2 \cdot P_i}.$$

В расчете среднеквадратическое отклонение трудоемкости ТО-2 автомобиля будет равно:

$$\sigma = \sqrt{(11,33 - 14,47)^2 \cdot 0,054 + \dots + (19,61 - 14,47)^2 \cdot 0,027} = 1,83 \text{ чел.-ч.}$$

7. *Проверка информации на выпадающие точки.* В опытной информации о показателях надежности, полученной в процессе наблюдения за изделиями, могут быть ошибочные точки, выпадающие из общего закона

распределения. Поэтому перед окончательной математической обработкой информацию проверяют на выпадающие точки.

Проверку информации проводят по правилу «3σ», т.е. полученное расчетным путем среднее значение показателя надежности последовательно уменьшают и увеличивают на 3σ. Если крайние точки информации не выходят за пределы ( $t_{cp} \pm 3\sigma$ ), все точки информации действительны с вероятностью 99,7 %.

В расчете нижняя и верхняя границы достоверности информации будут соответственно равны:  $14,47 - 3 \cdot 1,83 = 8,98$  чел.-ч (нижняя граница) и  $14,47 + 3 \cdot 1,83 = 19,96$  чел.-ч (верхняя граница). Наименьшее значение трудоемкости в вариационном ряду  $t_{min} = 10,64$  чел.-ч больше, чем нижняя граница (8,98 чел.-ч); следовательно, эта точка информации действительна. Наибольшее значение трудоемкости  $t_{max} = 20,29$  чел.-ч выходит за верхнюю границу достоверности (19,96 чел.-ч). Поэтому она не должна учитываться в дальнейших расчетах.

Так как при проверке выявлены выпадающие точки информации, то необходимо вновь перестроить статистический ряд и пересчитать среднее значение и среднее квадратическое отклонение показателя надежности и вновь проверить информацию на выпадающие точки.

В результате пересчета определены новое значение величины интервала  $A=1,18$  чел.-ч, величина смещения  $t_{cm}=10,05$  чел.-ч, все показатели статистического ряда (табл. 4.3), а также среднее значение  $t_{cp}=14,31$  чел.-ч и среднее квадратическое отклонение  $\sigma=1,56$  чел.-ч. Повторная проверка выпадающих точек не выявила.

Таблица 4.3

Уточненный статистический ряд распределения трудоемкости ТО-2 автомобиля КамАЗ-5320

Показатель	Начальное и конечное значения интервалов, чел.-ч					
	10,64–11,82	11,82–13,00	13,0–14,18	14,18–15,36	15,36–16,55	16,55–17,73
1. Среднее значение в интервале $t_{c,i}$	11,23	12,41	13,59	14,77	15,96	17,14
2. Частота $m_i$	2	4	9	13	6	2
3. Опытная вероятность (частость) $P_i$	0,056	0,111	0,25	0,361	0,167	0,056
4. Накопленная опытная вероятность $\sum m_i/N$	0,056	0,167	0,417	0,778	0,944	1,000

8. Построение гистограммы, полигона и кривой накопленной опытной вероятности показателя надежности. Составленный по данным



исходной информации уточненный статистический ряд (см. табл. 4.3) дает полную характеристику опытного распределения показателя надежности.

По данным уточненного статистического ряда строят гистограмму, полигон и кривую накопленной опытной вероятности (рис. 4.14), которые дают представление об опытном распределении показателя надежности и позволяют в первом приближении решать ряд инженерных задач, связанных с оценкой надежности технических изделий.

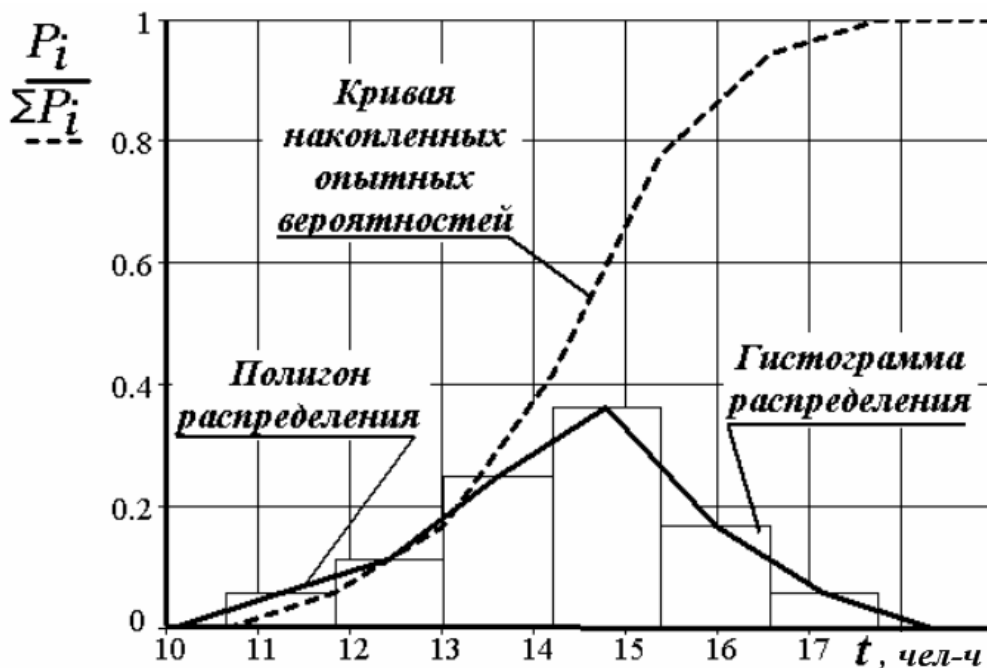


Рис. 4.14. График распределения трудоемкости ТО-2 автомобиля КамАЗ-5320

По оси абсцисс откладывают в масштабе значение показателя надежности  $t$ , а по оси ординат — частоту или опытную вероятность  $P_i$  (для гистограммы и полигона) и накопленную опытную вероятность  $\sum P_i$  (для кривой накопленной опытной вероятности).

Точки полигона образуются пересечением ординаты, равной вероятности интервала, и абсциссы, равной середине этого интервала. Точки кривой накопленной опытной вероятности образуются пересечением ординаты, равной сумме вероятностей предыдущих интервалов, и абсциссы конца данного интервала.

Начальная и конечная точки полигона на оси абсцисс смещены на половину величины интервала относительно начала первого и конца последнего интервалов соответственно влево и вправо.

9. *Определение коэффициента вариации.* Коэффициент вариации представляет собой относительную (безразмерную) характеристику рассеивания показателя надежности, более удобную при выборе и оценке теоретического закона распределения, чем среднее квадратическое отклонение  $\sigma$ .

Коэффициент вариации  $V$  с учетом смещения  $t_{см}$ , коэффициент вариации определяют по выражению

$$V = \frac{\sigma}{t_{cp} - t_{см}} = \frac{1,56}{14,31 - 10,05} = 0,366.$$

10. *Выбор теоретического закона распределения для выравнивания опытной информации.* Для повышения точности расчета показателей надежности опытную информацию выравнивают (заменяют) теоретическим законом распределения. На первом этапе теоретический закон распределения подбирают в соответствии с областью его применения. Для показателей надежности автомобилей и их элементов используют закон нормального распределения или закон распределения Вейбулла. Далее в первом приближении выбирают закон по величине коэффициента вариации  $V$ : если  $V < 0,33$ , выбирают закон НР, в случае  $V > 0,50$  – закон РВ.

Так как значение коэффициента вариации  $V = 0,366$ , т.е. находится в интервале от 0,33 до 0,50, то выбирают тот закон распределения (ЗНР или ЗРВ), который обеспечивает лучшее совпадение с распределением опытной информации.

Это можно оценить визуально путем сравнения полигона опытного распределения с кривой дифференциальной функции ЗНР и ЗРВ или по совпадению кривой накопленной опытной вероятности с интегральной функцией ЗНР и ЗРВ.

*Расчет параметров законов распределения.* У закона нормального распределения два параметра: среднее значение  $t_{cp}$  и среднее квадратическое отклонение  $\sigma$ , у закона распределения Вейбулла – три: величина смещения  $t_{см}$ , параметры  $a$  и  $b$ .

Параметры закона нормального распределения определены ранее в рассматриваемом примере:  $t_{cp}=14,31$  чел.-ч и  $\sigma=1,56$  чел.-ч.

Параметры закона распределения Вейбулла определяют следующим образом:

- по прил. 11 и известному значению коэффициента вариации  $V=0,366$  находят параметр  $b=3,27$  и коэффициент  $K_b=0,896$ ;
- параметр  $a$  вычисляют по уравнению

$$a = \frac{t_{cp} - t_{см}}{K_b} = \frac{14,31 - 10,05}{0,896} = 4,75 \text{ чел.-ч};$$

- если значение коэффициента вариации  $V$  находится в пределах 0,33...0,72, то параметры закона Вейбулла можно определить по приближенным уравнениям

$$b = \frac{1}{V^{1,06}} = \frac{1}{0,366^{1,06}} = 2,9,$$

$$a = 1,11 \cdot (t_{cp} - t_{см}) = 1,11 \cdot (14,31 - 10,05) = 4,73 \text{ чел.-ч.}$$

Расчет интегральных и дифференциальных функций теоретических законов распределения.

Для определения значений функций можно применять различные способы: *табличный способ* с использованием прил. 1 (ЗНР) и 12 (ЗРВ), *расчетный способ* с использованием известных выражений соответствующих функций и *пакетный способ* с использованием встроенных функций различных математических пакетов (Excel, MathCad, Statistika), реализация которого приведена в прил. 16.

Интегральная функция ЗНР определяется по центрированной табулированной функции ЗНР  $\Phi_{\text{ЗНР}}[(t_{к.і}-t_{ср})/\sigma]$  (см. прил. 1)

$$F_{\text{ЗНР}}(11,82) = \Phi[(11,82-14,31)/1,56] = \Phi(-1,6) = 0,055.$$

Применение расчетного способа из-за наличия в формуле знака интеграла возможно при использовании пакета MathCad (см. прил. 16).

Интегральная функция ЗРВ определяется по табулированной функции  $\Phi_{\text{ЗРВ}}[(t_{к.і}-t_{ср})/a]$  (см. прил. 11)

$$F_{\text{ЗРВ}}(11,82) = \Phi[(10,05-11,82)/4,73] = \Phi(-0,374) = 0,056.$$

Значение интегральной функции ЗРВ определяют также и по формуле

$$F(t_{к.і}) = 1 - e^{-\frac{t_{к.і}-t_{ср}}{a}} = F(13) = 1 - e^{-\frac{13-10,05}{4,73}} = 0,225.$$

Значение дифференциальной функции любого теоретического закона для соответствующего интервала рассчитывают по выражению

$$f(t_{с.і}) = F(t_{к.і}) - F(t_{н.і}),$$

$$f_{\text{ЗНР}}(12,41) = 0,201 - 0,055 = 0,146.$$

Результаты расчетов сводят в табл. 4.4 и используют для построения графиков (рис. 4.15).

Т а б л и ц а 4 . 4

Значения интегральных и дифференциальных функций ТЗР

Показатель	Начальное и конечное значения интервалов, чел.-ч						
	9,08–10,64	10,64–11,82	11,82–13,0	13,0–14,18	14,18–15,36	15,36–16,55	16,55–17,73
1	2	3	4	5	6	7	8
1. Опытная вероятность (частость) $P_i$	0	0,056	0,111	0,25	0,361	0,167	0,056
2. Накопленная опытная вероятность $\sum m_i/N$	0	0,056	0,167	0,417	0,778	0,944	1,00
3. Среднее значение в интервале $t_{с.і}$	–	11,23	12,41	13,59	14,77	15,96	17,14

1	2	3	4	5	6	7	8
4. Интегральная функция ЗНР $F_{ЗНР}(t_{к.i})$	0,009	0,055	0,201	0,467	0,75	0,924	0,986
5. Интегральная функция ЗРВ $F_{ЗРВ}(t_{к.i})$	0,002	0,056	0,225	0,491	0,754	0,918	0,983
6. Дифференциальная функция ЗНР $f_{ЗНР}(t_{с.i})$	–	0,046	0,146	0,266	0,283	0,174	0,068
7. Дифференциальная функция ЗРВ $f_{ЗРВ}(t_{с.i})$	–	0,054	0,169	0,266	0,263	0,164	0,065
8. Расхождение накопленной опытной вероятности и интегральной функции ЗНР, $D_{ЗНР}$	0,009	0,001	0,034	0,050	0,028	0,020	0,014
9. Расхождение накопленной опытной вероятности и интегральной функции ЗРВ, $D_{ЗРВ}$	0,002	0	0,058	0,074	0,024	0,026	0,017

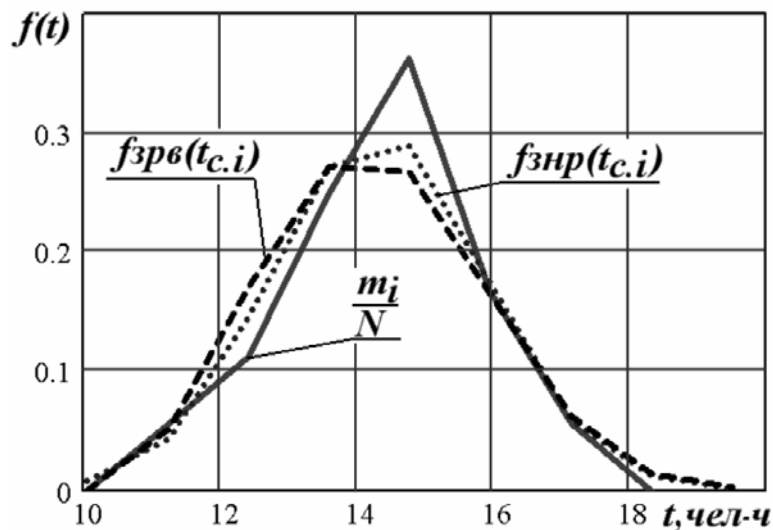


Рис. 4.15. Графики дифференциальных функций ЗНР и ЗРВ и кривая накопленной опытной вероятности

Визуально сравнивая теоретические зависимости с опытной кривой, достаточно трудно сделать выбор в пользу закона нормального распределения или закона распределения Вейбулла. В таком случае ТЗР выбирают по критериям согласия.

Выбор ТЗР по критерию согласия опытных и теоретических распределений показателей надежности.

Критерий согласия Пирсона  $\chi^2$  определяется как сумма квадратов отклонений опытных вероятностей и дифференциальных функций в каждом интервале статистического ряда информации:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^n \frac{\left[ \frac{m_i}{N} - f(t_{с.i}) \right]^2}{f(t_{с.i})}.$$

Расчет критерия Пирсона для ЗНР

$$\chi_{\text{ЗНР}}^2 = \frac{(0,056 - 0,046)^2}{0,046} + \frac{(0,111 - 0,146)^2}{0,146} + \frac{(0,25 - 0,266)^2}{0,266} + \dots$$

$$\dots + \frac{(0,361 - 0,283)^2}{0,283} + \frac{(0,167 - 0,174)^2}{0,174} + \frac{(0,056 - 0,068)^2}{0,068} = 0,05.$$

Расчет критерия Пирсона для ЗРВ

$$\chi_{\text{ЗРВ}}^2 = \frac{(0,056 - 0,054)^2}{0,054} + \frac{(0,111 - 0,169)^2}{0,169} + \frac{(0,25 - 0,266)^2}{0,266} + \dots$$

$$\dots + \frac{(0,361 - 0,263)^2}{0,263} + \frac{(0,167 - 0,164)^2}{0,164} + \frac{(0,056 - 0,065)^2}{0,065} = 0,07.$$

Пользуясь критерием согласия  $\chi^2$ , по прил. 7, 21 определяют вероятность совпадения опытных и теоретических данных. Вероятность совпадения при прочих равных условиях зависит и от повторности использованной информации. Поэтому для входа в прил. 7, 21 необходимо определить число степеней свободы  $r = n - k$ , где  $k$  – количество обязательных связей;  $k = z + 1$  ( $z$  – число параметров ТЗР).

Для закона распределения Вейбулла, как и для закона нормального распределения, число обязательных связей равно:

$$r_{\text{ЗРВ}} = r_{\text{ЗНР}} = 6 - (2+1) = 3.$$

Вероятность совпадения закона нормального распределения ( $\chi^2 = 0,05$ ) составляет 0,92, а вероятность совпадения закона распределения Вейбулла ( $\chi^2 = 0,07$ ) – 0,88.

Так как полученные вероятности выше критической, за которую принято считать  $[P(\chi^2)] = 0,1$ , то оба закона вполне согласуются с опытными данными. Однако в данном примере наилучшее согласие у закона нормального распределения.

При малом количестве информации (до 40–50 значений) целесообразно использовать критерий Колмогорова для выбора теоретического закона распределения.

Для проверки совпадения опытных данных по критерию Колмогорова следует определить расхождения между значениями накопленной опытной вероятности и интегральных функций ТЗР по абсолютной величине для каждого интервала статистического ряда (см. табл. 4.4)

$$D_{\text{ТЗР}} = |\sum m_i/N - F(t_{k,i})|.$$

Например, для 2-го интервала (закон НР)

$$D_{\text{ЗНР}2} = |0,056 - 0,055| = 0,001.$$

Затем нужно определить максимальное расхождение для каждого закона

$$D_{\text{ЗНР.max}} = 0,050; D_{\text{ЗРВ.max}} = 0,074.$$

Критерий Колмогорова вычисляется по выражению

$$\lambda_{\text{к}} = D_{\text{max}} \cdot \sqrt{N};$$

$$\lambda_{\text{к.ЗНР}} = 0,050 \cdot \sqrt{36} = 0,3; \lambda_{\text{к.ЗРВ}} = 0,074 \cdot \sqrt{36} = 0,444.$$

Вероятность совпадения опытных данных с теоретическими по критерию Колмогорова определяют по прил. 5:

$$P(\lambda_{\text{к.ЗНР}}) = 0,997, P(\lambda_{\text{к.ЗРВ}}) = 0,988.$$

Так как полученные вероятности превышают критическое значение  $[P(\lambda_{\text{к}})] = 0,05$ , а вероятность совпадения у нормального закона распределения выше, чем у закона Вейбулла, то выбирают закон нормального распределения.

*Определение интервальных характеристик распределения трудоемкости ТО-2 автомобиля КАМАЗ-5320,*

Для того чтобы распространить данные, полученные по выборке автомобилей (36 ед.) на генеральную совокупность, т.е. на все автомобили данной модели, эксплуатирующиеся в регионе, необходимо воспользоваться интервальными оценками. Для этого задаются доверительной вероятностью  $\alpha$  – степенью доверия к предлагаемым показателям, в примере  $\alpha = 0,9$ .

Интервальные характеристики одиночного значения показателя надежности для ТЗР определяют по формулам:

➤ для закона ЗНР

– нижняя доверительная граница одиночного значения

$$t_{\alpha}^{\text{H}} = t_{\text{cp}} - t_{\alpha} \cdot \sigma = 14,31 - 1,68 \cdot 1,56 = 11,69 \text{ чел.-ч};$$

– верхняя доверительная граница одиночного значения

$$t_{\alpha}^{\text{B}} = t_{\text{cp}} + t_{\alpha} \cdot \sigma = 14,31 + 1,68 \cdot 1,56 = 16,93 \text{ чел.-ч};$$

– доверительный интервал для одиночного значения

$$I_{\alpha} = t_{\alpha}^{\text{B}} - t_{\alpha}^{\text{H}} = 16,93 - 11,69 = 5,24 \text{ чел.-ч},$$

где  $t_{\alpha}$  – коэффициент Стьюдента, табулированный в прил. 2, зависящий от количества информации и от доверительной вероятности, для данного примера  $t_{\alpha} = 1,68$ ;

➤ для закона ЗРВ

– нижняя доверительная граница одиночного значения

$$t_{\alpha}^H = H_{\kappa}^{ЗРВ} \left( \frac{1 - \alpha}{2} \right) \cdot a + t_{\text{см}} = H_{\kappa}^{ЗРВ} \left( \frac{1 - 0,9}{2} \right) \cdot 4,73 + 10,05 = 11,82 \text{ чел.-ч};$$

– верхняя доверительная граница одиночного значения

$$t_{\alpha}^B = H_{\kappa}^{ЗРВ} \left( \frac{1 + \alpha}{2} \right) \cdot a + t_{\text{см}} = H_{\kappa}^{ЗРВ} \left( \frac{1 + 0,9}{2} \right) \cdot 4,73 + 10,05 = 17,15 \text{ чел.-ч};$$

– доверительный интервал для одиночного значения

$$I_{\alpha} = t_{\alpha}^B - t_{\alpha}^H = 17,15 - 11,82 = 5,33 \text{ чел.-ч}.$$

Интервальные характеристики среднего значения показателя надежности для ТЗР определяют по формулам

➤ для закона ЗНР

– нижняя доверительная граница среднего значения

$$t_{\text{ср}\alpha}^H = t_{\text{ср}} - t_{\alpha} \cdot \frac{\sigma}{\sqrt{N}} = 14,31 - 1,68 \cdot \frac{1,56}{\sqrt{36}} = 13,87 \text{ чел.-ч};$$

– верхняя доверительная граница среднего значения

$$t_{\text{ср}\alpha}^B = t_{\text{ср}} + t_{\alpha} \cdot \frac{\sigma}{\sqrt{N}} = 14,31 + 1,68 \cdot \frac{1,56}{\sqrt{36}} = 14,75 \text{ чел.-ч};$$

– доверительный интервал для среднего значения

$$I_{\alpha.\text{ср}} = t_{\text{ср}\alpha}^B - t_{\text{ср}\alpha}^H = 14,75 - 13,87 = 0,88 \text{ чел.-ч};$$

➤ для закона ЗРВ

– нижняя доверительная граница среднего значения

$$t_{\text{ср}\alpha}^H = (t_{\text{ср}} - t_{\text{см}}) \cdot \sqrt[2]{r_3} + t_{\text{см}} = (14,31 - 10,05) \cdot \sqrt[2]{0,82} + 10,05 = 14,03 \text{ чел.-ч};$$

– верхняя доверительная граница среднего значения

$$t_{\text{ср}\alpha}^B = (t_{\text{ср}} - t_{\text{см}}) \cdot \sqrt[2]{r_1} + t_{\text{см}} = (14,31 - 10,05) \cdot \sqrt[2]{1,25} + 10,05 = 14,65 \text{ чел.-ч},$$

где  $r_1$  и  $r_3$  – коэффициенты распределения Вейбулла, определяемые по прил. 8 в зависимости от заданной величины доверительной вероятности  $\alpha$  и повторности информации  $N$ ;

– доверительный интервал для среднего значения

$$I_{\alpha.\text{ср}} = t_{\text{ср}\alpha}^B - t_{\text{ср}\alpha}^H = 14,65 - 14,03 = 0,62 \text{ чел.-ч}.$$

Относительную ошибку переноса следует рассчитывать при односторонней доверительной вероятности  $\alpha_0=0,9$ . Расчет односторонних границ

аналогичен расчету двухсторонних границ. Однако коэффициенты для расчета берут из прил. 8, в котором все рассчитано для двухсторонних границ. Поэтому коэффициенты  $t_{\alpha}$ ,  $r_1$ ,  $r_3$  следует принимать из столбца с доверительной вероятностью  $\alpha' = 2 \cdot \alpha_0 - 1$ . Для данного примера  $\alpha' = 2 \cdot 0,9 - 1 = 0,8$ , тогда коэффициент  $t_{\alpha} = 1,3$ .

Верхняя односторонняя доверительная граница среднего значения для закона нормального распределения

$$t_{\text{ср}\alpha_0}^{\text{во}} = t_{\text{ср}} + t_{\alpha} \cdot \frac{\sigma}{\sqrt{N}} = 14,31 + 1,3 \cdot \frac{1,56}{\sqrt{36}} = 14,65 \text{ чел.-ч.}$$

Относительную предельную ошибку  $\delta$  определяют в процентах от среднего значения показателя надежности, ее значение не должно превышать 15 %:

$$\delta = \frac{t_{\text{ср}\alpha_0}^{\text{во}} - t_{\text{ср}}}{t_{\text{ср}} - t_{\text{см}}} \cdot 100 = \frac{14,65 - 14,31}{14,31 - 10,05} \cdot 100 = 7,98 \text{ \%}.$$

#### 4.4.5. Обработка однократно усеченной информации

Испытания изделий, связанные с определением ресурса, весьма продолжительны, и, за счет большого рассеяния ресурсов, наработка до отказа последнего изделия в подконтрольной группе может быть в несколько раз больше наработки до отказа первого изделия. Такая продолжительность наблюдения отказов и привела к необходимости разработки методов определения числовых характеристик случайных величин на основе приостановленных (усеченных) испытаний.

При обработке результатов полностью завершенных испытаний вначале находят числовые характеристики случайной величины и по ним строят кривую закона распределения вероятностей (подразд. 4.3.3). При обработке результатов усеченных испытаний вначале строят кривую вероятности отказа и по ней находят числовые характеристики (средний ресурс или гамма-процентный ресурс).

Без существенного снижения точности определения среднего ресурса испытания долговечности автомобилей можно прекращать после отказа 60...70 % числа испытываемых автомобилей.

Располагая результаты испытаний  $T_1, T_2, \dots, T_n$  в порядке нарастания ресурсов, можно рассчитать вероятности отказов, соответствующие полученным значениям случайных величин. Чтобы исключить смещение кривой закона распределения вероятностей следует рассчитывать вероятности по формуле

$$F(T) = i / (N+1). \quad (4.26)$$



Нанося на график точки вероятностей и проводя через них кривую, можно получить закон распределения вероятностей, по которому определить гамма-процентный ресурс.

Гамма-процентный ресурс ( $T_\gamma$ ) можно определить и без построения графика, предварительно вычислив его расчетный номер ( $Z_\gamma$ ) по формуле

$$Z_\gamma = N \cdot (1 - \gamma/100) + 0,5. \quad (4.27)$$

А затем значение этого ресурса

$$T_\gamma = T_z + (T_{z+1} - T_z) \cdot (Z_\gamma - Z), \quad (4.28)$$

где  $T_z, T_{z+1}$  – ресурсы в вариационном ряду, расположенные перед гамма-процентным ресурсом и после;

$Z$  – номер ресурса, расположенного перед гамма-процентным ресурсом, определяется округлением в меньшую сторону от расчетного номера  $Z_\gamma$ .

*Например*, следует определить гамма-процентный ресурс  $T_{\gamma=80}$  при наличии однократно усеченной информации о ресурсах, полученной при испытании 36 изделий: 4034, 4124, 4356, 4470, 4560, 4620, 4700, 4850, 4920, 5020. После определения этих ресурсов испытания были прекращены по не зависящим от исследователей обстоятельствам.

*Графический способ.* Вероятности возникновения отказа при соответствующих значениях ресурсов рассчитывают и заносят в табл. 4.5. Например, для 4-го ресурса  $F(T_4) = 4 / (36 + 1) = 0,108$ .

Т а б л и ц а 4 . 5

Опытные значения вероятности отказа изделий

$i$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$T_i, \text{ч}$	4034	4124	4356	4470	4560	4620	4700	4850	4920	5020
$F(T_i)$	0,027	0,054	0,081	0,108	0,135	0,162	0,189	0,216	0,243	0,270

По данным табл. 4.5 строят график вероятности возникновения ресурсного отказа (рис. 4.16). Для определения  $T_\gamma$  проводят горизонтальную линию на уровне

$$F(T_{\gamma=80}) = 1 - \gamma/100 = 1 - 80/100 = 0,2,$$

затем опускают перпендикуляр на ось абсцисс и получают  $T_{\gamma=80} = 4750$  ч.

*Расчетный способ.* Предварительно определяют расчетный номер гамма-процентного ресурса:

$$Z_\gamma = 36 \cdot (1 - 80/100) + 0,5 = 7,7.$$

Искомый гамма-процентный ресурс составит:

$$T_\gamma = 4700 + (4850 - 4700) \cdot (7,7 - 7) = 4805 \text{ ч.}$$

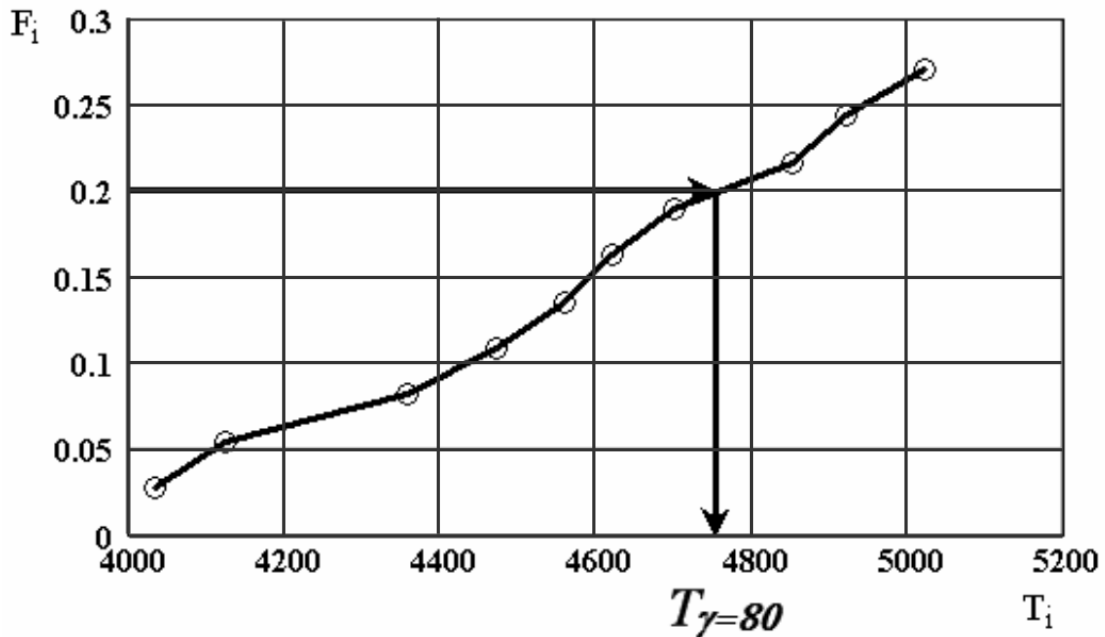


Рис. 4.16. Пример графического определения гамма-процентного ресурса по однократно усеченной информации

#### 4.4.6. Обработка многократно усеченной информации

При определении ресурса агрегатов и деталей в эксплуатационных условиях возможны вынужденные прекращения испытаний некоторых изделий. Момент прекращения испытаний обычно случайный, и приостановленная наработка незавершенных испытаний различна для разных изделий. Это является существенным отличием от усеченных испытаний, когда они прекращаются по заранее продуманному плану и все неотказавшие изделия имеют приостановленную наработку, одинаковую для всех автомобилей. В результате таких испытаний информация содержит приостановленные наработки автомобилей и ресурсы, которые чередуются в произвольном порядке.

Поэтому предлагается определять расчетный номер каждого ресурса по формуле

$$N_{p,i}^0 = N_{p,i-1}^0 + \frac{N + 1 - N_{p,i-1}^0}{N + 1 - N_{пр} - N_o}, \quad (4.29)$$

где  $N$  – количество изделий, поставленных под наблюдение;  
 $N_{p,i}^0, N_{p,i-1}^0$  – расчетные номера  $i$ -го и предыдущего ресурсов;  
 $N_o, N_{пр}$  – количество отказавших и снятых с испытания работоспособных изделий до наработки, соответствующей  $i$ -му ресурсу.

После расчета номеров вычисляется вероятность отказа, соответствующая каждому ресурсу:

$$F(T_{p,i}) = N_{p,i} / (N+1). \quad (4.30)$$

Гамма-процентный ресурс определяется по графику с учетом принятой величины  $\gamma$  %.

Например, имеется многократно усеченная информация: 4034, 4124, [4356], 4470, 4560, 4620, 4700, [4850], 4920, 5020. В этом вариационном ряду приостановленные наработки представлены в квадратных скобках.

Для удобства расчета информацию из вариационного ряда заносим в табл. 4.6.

Т а б л и ц а 4 . 6

Расчетные номера ресурсов

№ п/п	Ресурс	Приостанов- ленная наработка	Расчетный номер ресурса $N_{p,i}$	Вероятность отказа $F(T_{p,i})$
1	4034	–	1	0,027
2	4124	–	2	0,054
3	–	[4356]	–	–
4	4470	–	3,029	0,082
5	4560	–	4,029	0,109
6	4620	–	5,028	0,136
7	4700	–	6,027	0,163
8	–	[4850]	–	–
9	4920	–	7,059	0,191
10	5020	–	8,092	0,219

Рассчитываем номер 6-го ресурса:

$$N_{p,6} = N_{p,5} + \frac{36+1 - N_{p,5}}{36+1 - N_{np} - N_o} = 4,029 + \frac{36+1 - 4,029}{36+1 - 1 - 4} = 6,027.$$

Определяем вероятность отказа для 6-го ресурса

$$F(T_{p,i}) = 6,027 / (36+1) = 0,163.$$

Расчеты для остальных ресурсов сводят в табл. 4.6, на основании которой строят график вероятности отказа изделия от наработки, аналогичный приведенному на рис. 4.16. С помощью графика определяют 80 и 90-процентные ресурсы, которые соответствуют вероятностям отказа 0,2 и 0,1, соответственно.

## 4.5. Контрольные испытания

В процессе производства технических изделий вероятно воздействие субъективных и объективных факторов, снижающих их надежность. К ним относятся грубые нарушения норм технологического процесса (ошибки монтажа, скрытые дефекты в комплектующих изделиях) и частичные изменения первоначальных свойств элементов и материалов.

Дефекты первой группы обнаруживают путем проверки систем на соответствие требованиям технических условий.

Контроль дефектов второй группы связан с существенной выработкой ресурса и разрушением контролируемых изделий.

Если контроль прост и стоимость его невелика, то применяют сплошной контроль (рис. 4.17), подвергая испытаниям все изделия партии ( $N$ ) и не разрушая их.

Контрольные испытания			
Сплош- ные	Выборочные		
	По альтернативному признаку		По количественному признаку
	Однократная выборка	Многократная выборка	Последовательный контроль

Рис. 4.17. Виды контрольных испытаний

Однако в некоторых случаях требуется разрушение изделий, тогда применяют выборочный контроль (см. рис. 4.17), при котором проверяется часть изделий (выборка) ( $n$ ), т.е.  $n < N$ . По результатам контроля выборки делают заключение о надежности всей партии изделий.

При контроле партии изделий по альтернативному признаку все изделия разбивают на две группы: годные (кондиционные) и негодные (дефектные). Оценку партии проводят по числу дефектных деталей, попадающих в выборку.

При использовании количественного признака качества у контролируемых изделий проверяют один или несколько количественных параметров. Оценку партии производят по характеристикам распределения контролируемых параметров в выборке.

Контрольные испытания могут быть *одноступенчатые*, если решение о приемке партии принимается на основе проверки одной выборки, и *многоступенчатые*, при которых контролируется две или более выборки изделий.

При выборе вида испытаний учитываются трудности организационного характера, расходы на контроль единичной продукции.

### 4.5.1. Альтернативные испытания

Альтернативные испытания применяются для малогабаритных деталей массового производства, например пружины, манжеты, подшипники качения.

Выборка из  $n$  деталей может содержать  $m$  дефектных деталей при допустимом числе дефектных деталей  $c$ .

Вероятность приемки партии с уровнем качества  $q$ , представляющим долю дефектных деталей в партии,  $P(q)=P(m < c)$  называется оперативной характеристикой испытаний.

Перед испытаниями задаются границы приемки партии  $(1-\alpha)$  – верхний уровень,  $\beta$  – нижний уровень, которым соответствуют доли дефектных деталей: приемочный уровень качества ( $q_0$ ) и браковочный уровень качества ( $q_m$ ) (рис. 4.18)

$$P(q_0) \geq 1-\alpha; P(q_m) \leq \beta. \quad (4.31)$$

Так как  $(1 - \alpha)$  – вероятность приемки, то  $\alpha$  является вероятностью браковки с приемлемым уровнем качества, представляющим собой *риск изготовителя*. *Риск потребителя* – это вероятность приемки партии с браковочным уровнем ( $\beta$ ). Вероятности  $\alpha$  и  $\beta$  принимают равными 0,1, 0,05, 0,01.

Доля дефектных деталей при приемочном уровне качества и доля дефектных деталей при браковочном уровне качества должны соответствовать соотношению  $q_0 > q_{cp}$ , а  $q_m < q_r$ , где  $q_{cp}$  – средняя доля дефектных деталей в нормально изготовленной партии,  $q_r$  – предельное значение доли дефектных деталей.

Для малых выборок ( $n \leq 0,1N$ ) и малых долей дефектных деталей ( $q \leq 0,1$ ) вероятность целесообразно определять по закону Пуассона:

$$P(q) = \sum_{k=0}^c \frac{(n \cdot q)^k}{k!} \cdot e^{-n \cdot q}.$$

При допустимом числе дефектных деталей в партии  $c = 0$   $P(q) = e^{-nq}$ .

Соответственно

$$P(q_0) = e^{-nq_0} = 1 - \alpha, P(q_m) = e^{-nq_m} = \beta. \quad (4.32)$$

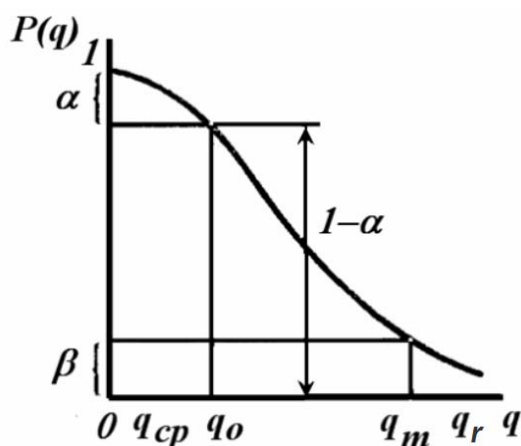


Рис. 4.18. Оперативные характеристики контроля по альтернативному признаку

Задавая  $\alpha$  и  $\beta$ , можно определить объем выборки, которую следует испытать и не получить ни одного отказа, а также определить приемочный уровень  $q_0$ . Например, при контроле партии деталей заданы риски  $\alpha=\beta=0,01$  и браковочный уровень  $q_m=0,1$ . Используя вышеприведенные формулы, получают  $e^{-nq_m} = 0,01$ . Логарифмируя обе части уравнения  $\ln e^{-nq_m} = \ln(0,01)$ , находят объем выборки  $n = -\ln(0,01)/q_m = -\ln(0,01)/0,2 = 23$ .

Приемочный уровень будет равен:

$$q_0 = \ln(1-\alpha) / n = -\ln(0,99) / 23 = 0,00044.$$

Таким образом, следует проконтролировать выборку из 23 деталей и, если будет не выявлено ни одной дефектной детали, принять всю партию деталей.

По приемочному уровню можно оценить приемку: при  $q < q_0$  – хорошая вероятность приемки продукции, при  $q_0 < q < q_m$  – допустимая, при  $q > q_m$  – непригодная вероятность приемки.

Возможен другой вариант, при котором задаются объемом выборки и определяют допустимое количество дефектных деталей в ней. Например, имеется партия деталей  $N = 800$  шт., задан риск потребителя  $\beta=0,1$ , допустимый уровень брака  $q_m=0,05$ . Необходимо определить объем выборки и допустимое количество дефектных деталей в партии.

Объем выборки вычисляют из условия малых выборок:

$$n = 0,1 \cdot N = 0,1 \cdot 800 = 80 \text{ шт.}$$

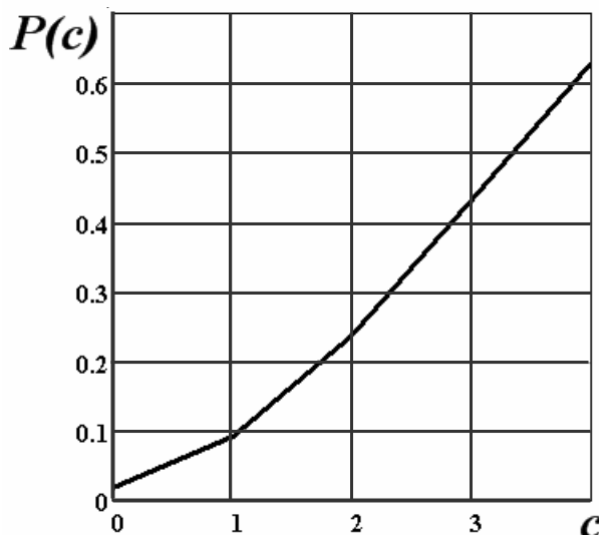


Рис. 4.19. Зависимость вероятности браковки от допустимого количества дефектных деталей в выборке

Для определения допустимого количества дефектных деталей в выборке по формуле Пуассона строят график зависимости вероятности браковки партии от допустимого количества дефектных деталей (c) (рис. 4.19). По графику видно, что принятому риску потребителя ( $\beta = 0,1$ ) соответствует одна дефектная деталь в выборке. Т.е. из партии деталей следует взять 80 деталей, проконтролировать их, и, если будет выявлено более одной дефектной детали, вся партия должна быть забракована.

#### 4.5.2. Контроль по количественному признаку

При контроле по количественному показателю определяется параметр, характеризующий одно из свойств надежности, например средняя наработка на отказ. Для этого контролируют  $n$  изделий выборки, находят значения наработки на отказ каждого из изделий, а затем находят точечные характеристики:  $T_{cp}$ ,  $\sigma$ ,  $\sigma_{cp} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$  по известным методикам (см. разд. 2).

Для контроля необходимо определить объем выборки  $n$  и приемочный норматив  $T_{пр}$ . Если  $T_{cp} \geq T_{пр}$ , то партия принимается, в противном случае бракуется.

*Оперативная характеристика контроля* – это вероятность приемки партии в соответствии с оперативной характеристикой  $P(T_{cp}) = P(T_{cp} \geq T_{пр})$ .

Риск изготовителя и риск потребителя соответственно равны:  $1 - \alpha = P(T_0)$ ,  $\beta = P(T_m)$ .

Приняв нормальный закон распределения наработки на отказ и рассмотрев интервал, в котором должен находиться приемочный норматив  $T_m \dots T_0$ , получают:

$$\Phi\left(\frac{T_0 - T_{пр}}{\sigma/\sqrt{n}}\right) = 1 - \alpha; \quad \Phi\left(\frac{T_{пр} - T_m}{\sigma/\sqrt{n}}\right) = 1 - \beta. \quad (4.33)$$

Далее преобразуют эти выражения с использованием квантилей ( $H_k$ ) и с учетом соотношения  $H_k(1 - \beta) = -H_k(\beta)$ :

$$T_0 - T_{пр} = H_k(1 - \alpha) \cdot \frac{\sigma}{\sqrt{n}}; \quad T_{пр} - T_m = H_k(1 - \beta) \cdot \frac{\sigma}{\sqrt{n}}. \quad (4.34)$$

Складывают эти выражения и преобразуют относительно объема выборки  $n$ :

$$n = \left[ \frac{\sigma \cdot (H_k(1 - \alpha) + H_k(1 - \beta))}{T_0 - T_m} \right]^2, \quad (4.35)$$

где  $T_0$  – средняя наработка до отказа, при которой должна приниматься партия с вероятностью  $(1 - \alpha)$ ;

$T_m$  – средняя наработка до отказа, при которой должна приниматься партия с вероятностью  $\beta$  (рис. 4.20).

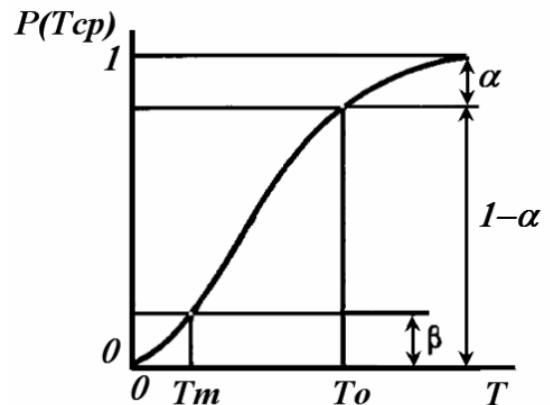


Рис. 4.20. Оперативная характеристика контроля по количественному показателю

Приемочный норматив определяют с учетом полученных выражений

$$T_{\text{пр}} = T_0 - H_{\kappa}(1 - \alpha) \cdot \frac{\sigma}{\sqrt{n}}; T_{\text{пр}} = T_m + H_{\kappa}(1 - \beta) \cdot \frac{\sigma}{\sqrt{n}}. \quad (4.36)$$

Более точно приемочный норматив можно установить по формуле

$$T_{\text{пр}} = \frac{T_0 - T_m}{2} - \frac{H_{\kappa}(1 - \alpha) + H_{\kappa}(1 - \beta)}{2} \cdot \frac{\sigma}{\sqrt{n}}. \quad (4.37)$$

Например, необходимо определить объем выборки и приемочный норматив наработки на отказ изделия, если  $T_m = 700$  ч,  $\sigma = 350$  ч,  $T_0 = 1000$  ч, а риски производителя и потребителя равны  $\alpha = 0,1$ ,  $\beta = 0,05$ .

Используя прил. 1, определяют квантили:

$$H_{\kappa}(1 - \alpha) = H_{\kappa}(1 - 0,1) = 1,283 \text{ и } H_{\kappa}(1 - \beta) = H_{\kappa}(1 - 0,05) = 1,645.$$

Рассчитывают количество изделий в выборке:

$$n = \left[ \frac{360 \cdot (1,283 + 1,645)}{1000 - 700} \right]^2 = 11,67. \text{ Принимают } n = 12.$$

Приемочный норматив будет равен:

$$T_{\text{пр}} = \frac{1000 - 700}{2} - \frac{1,283 + 1,645}{2} \cdot \frac{350}{\sqrt{12}} = 868 \text{ ч.}$$

Таким образом, если при контрольных испытаниях 12 изделий средняя наработка на отказ будет не менее 868 часов, то партию изделий принимают.

#### 4.5.3. Последовательный контроль

При последовательном контроле не устанавливается заранее число изделий, которые следует поставить под наблюдение. Их берется столько, сколько потребуется для принятия решения – удовлетворяет партия изделий техническим условиям или нет.

В качестве примера реализации метода используются формулы для контроля по средней наработке на отказ при условии, что она подчинена закону нормального распределения.

Изделия испытываются последовательно один за другим, после каждого испытания выполняется расчет:

$$R = n \cdot \ln \left( \frac{\sigma_1}{\sigma_2} \right) + \frac{1}{2} \left[ \sum_{i=1}^n \left( \frac{T_i - T_1}{\sigma_1} \right)^2 - \left( \frac{T_i - T_2}{\sigma_2} \right)^2 \right], \quad (4.38)$$

где  $T_i$  –  $i$ -е значение наработки на отказ, полученное при испытаниях;  
 $n$  – количество испытанных изделий к моменту расчета;



$T_{cp1}, \sigma_1, T_{cp2}, \sigma_2$  – среднее значение наработки на отказ и среднеквадратическое отклонение, отвечающие техническим условиям (1) и не отвечающие техническим условиям (2).

Условие неудовлетворения техническим условиям соответствует выражению  $R < \ln\left(\frac{1-\beta}{\alpha}\right)$ , удовлетворения –  $R > \ln\left(\frac{\beta}{1-\alpha}\right)$ , условие продолжения испытаний  $\ln\left(\frac{\beta}{1-\alpha}\right) < R < \ln\left(\frac{1-\beta}{\alpha}\right)$ .

Метод последовательного контроля сокращает число испытаний, т.к. в процессе контроля принимается решение о прекращении испытаний. Например, необходимо проконтролировать партию изделий по наработке на отказ. Риски потребителя и производителя равны  $\alpha=\beta = 0,1$ . Нарботка на отказ и среднеквадратическое отклонение, соответствующие техническим условиям  $T_{cp1} = 1000$  ч,  $\sigma_1 = 300$  ч, а несоответствующие –  $T_{cp2} = 800$  ч,  $\sigma_2 = 330$  ч.

Определяют граничные условия

$$\ln\left(\frac{\beta}{1-\alpha}\right) = \ln\left(\frac{0,1}{1-0,1}\right) = -2,2, \quad \ln\left(\frac{1-\beta}{\alpha}\right) = \ln\left(\frac{1-0,1}{0,1}\right) = 2,2.$$

Проводят восемь испытаний изделий и получают значения наработки на отказ ( $T_i$ ): 923, 976, 955, 912, 983, 947, 932, 898 и делают вывод о необходимости продолжения контрольных испытаний данной партии изделий.

Проводят девятое испытание, получают наработку на отказ  $T_9 = 977$ . Выражение  $R = -2.266$ , что соответствует окончанию испытаний с приемкой контролируемой партии.

## 5. ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ ТЕХНИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ

### 5.1. Конструкторские мероприятия повышения надежности

Основными направлениями повышения надежности машин при их конструировании являются:

1. Упрощение конструкции, устранение элементов, ограничивающих надежность, или проектирование их легкоъемными и доступными.

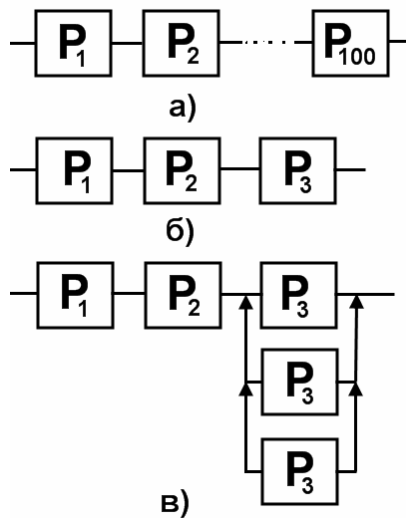


Рис. 5.1. Схемы изделий

Сложная система даже с очень надежными элементами, как правило, имеет низкую надежность. С увеличением количества элементов, обеспечивающих функционирование системы, вероятность безотказной работы системы стремится к нулю даже в том случае, когда вероятность безотказной работы каждого элемента достаточно высокая. Например, если система состоит из 100 высоконадежных элементов (вероятность безотказной работы каждого 0,99 при наработке 1000 часов) (рис. 5.1, а), то общая ее надежность будет достаточно низкой:

$$P_C(1000) = [P_1(1000)]^{100} = (0,99)^{100} = 0,37.$$

Т.е. при конструировании не следует безосновательно повышать сложность системы, увеличивая число элементов.

В системе даже с высоконадежными элементами определяющим элементом является самый ненадежный. Вероятность безотказной работы всей системы всегда меньше, чем вероятность безотказной работы входящего в нее элемента с наименьшим значением. Например, надежность системы, состоящей из трех элементов (рис. 5.1, б), имеющих вероятность безотказной работы при наработке 1000 часов соответственно 0,9, 0,9, 0,1, будет равна:

$$P_C(1000) = P_1(1000) \cdot P_2(1000) \cdot P_3(1000) = 0,9 \cdot 0,9 \cdot 0,1 = 0,081.$$

Следует отметить, что иногда конструктивное изменение одного-двух элементов влечет за собой резкое повышение надежности всего узла, агрегата и даже машины. Кроме того, надежность системы можно повысить, если сделать ненадежные элементы легкоъемными для быстрой замены и применить резервирование замещением этих элементов (см. рис. 5.1).

2. Замена трущихся поверхностей на корпусных деталях на поверхности трения на отдельных, легкозаменяемых деталях.

Трущиеся и подверженные износу части целесообразно выполнять в виде отдельных легкосменяемых деталей. Для изготовления деталей в этом случае можно применять материалы со специальными свойствами, какими не обладает основной материал детали. Например, установка клапана двигателя внутреннего сгорания в направляющей втулке (рис. 5.2, б), выполненной из материала повышенной износостойкости, и введение съемного седла из материала высокой жаропрочности позволяют повысить долговечность указанных сопряжений и существенно снизить трудоемкость и продолжительность восстановления головки блока цилиндров.

Для удобства обработки, увеличения долговечности, повышения ремонтпригодности и обеспечения возможности замены выгоднее направляющую станка в виде Т-образного паза (рис. 5.2 в) выполнить отдельно из твердого материала и укрепить на станине, зафиксировав ее (рис. 5.2, г).

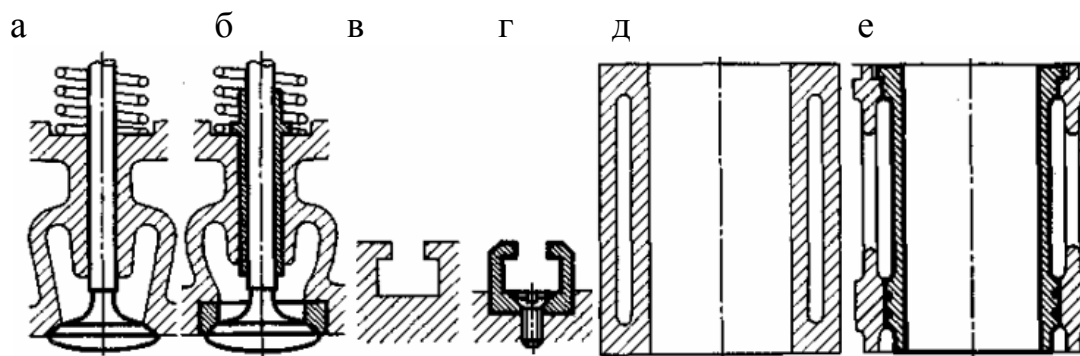


Рис. 5.2. Применение дополнительных легкосъемных деталей для повышения надежности соединений

Например, конструкция блока цилиндров двигателя внутреннего сгорания как одно целое с отливкой блока (рис. 5.2, д) нецелесообразна, так как ресурс базовой детали двигателя – блока цилиндров – непосредственно связан с состоянием цилиндров. Для увеличения долговечности блоков цилиндров необходимо применять съемные гильзы цилиндров (рис. 5.2, е), которые можно изготавливать из износостойкого и жаропрочного материала, а при достижении ими предельного состояния заменять.

3. *Исключение операций выверки, регулирования деталей и узлов по месту; предусмотрение в конструкции фиксирующих элементов, обеспечивающих правильную установку деталей и узлов при сборке; обеспечение возможности самонастройки и самоустановки.*

Детали, нуждающиеся в точной взаимной фиксации, предпочтительно устанавливаются в одном корпусе при минимальном числе переходных сопряжений и посадок.

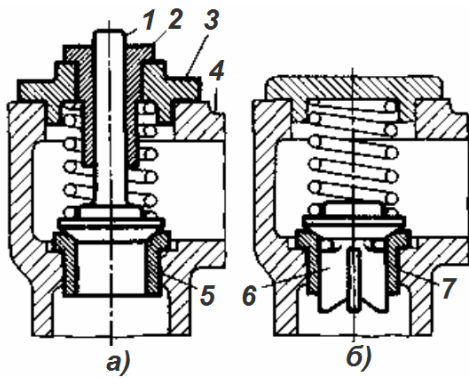


Рис. 5.3. Редукционный клапан

В качестве примера приведен узел редукционного клапана (рис. 5.3, а). Наиболее важное, определяющее надежность работы узла сопряжение конической фаски клапана с гнездом осуществляется через ряд переходных сопряжений, каждое из которых является источником неточностей: между штоком 1 клапана и направляющей втулкой 2; между втулкой 2 и крышкой 3; между крышкой 3 и корпусом 4; между седлом 5 клапана и корпусом 4. Конструкция требует соблюдения строгой

соосности следующих элементов: в клапане – направляющей поверхности клапана и фаски тарелки.

В более рациональной конструкции клапан центрирован непосредственно в седле (рис. 5.3, б). Точность направления клапана определяется только одним сопряжением – посадкой между направляющим хвостовиком 6 клапана и седлом 7.

Для обеспечения правильной работы необходимо соблюсти соосность только следующих элементов: в клапане – направляющей поверхности хвостовика и фаски; в седле – фаски и посадочной поверхности.

Все остальные элементы узла можно выполнить с пониженной точностью. При притирке клапан центрируется в седле; переборки узла не влияют на достигнутую герметичность.

4. *Реализация принципа агрегатности (блочности), т.е. конструирование узлов в виде независимых агрегатов, устанавливаемых на машину в собранном виде.*

Применение блочных конструкций позволяет повысить точность при сборке узла, снизить трудоемкость обслуживания и ремонта при эксплуатации. Например, при изготовлении угловой передачи с колесами, смонтированными в разных корпусах 1 и 2 (рис. 5.4, а), стыковые поверхности корпусов должны быть обработаны строго параллельно оси малого колеса и перпендикулярно к оси большого. При этом точность установки нарушается при затяжке прокладки на стыке. Другим недостатком является невозможность осмотра колес в сборе. Осевое их положение можно отрегулировать только по краске с несколькими повторными пробами, каждый раз с демонтажем большого колеса. Точность регулировки нарушается при ремонтах в результате неодинаковой затяжки прокладки.

При установке колес в одном корпусе (рис. 5.4, б) точность их расположения не нарушается при монтаже и ремонтах. Колеса доступны для проверки в сборе. Регулировка зацепления упрощается.

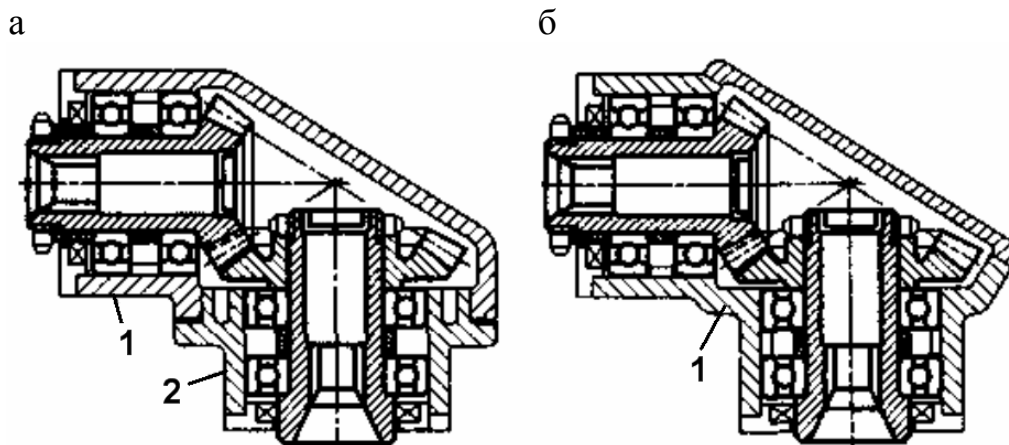


Рис. 5.4. Угловая передача

5. Создание конструкций узлов трения с обеспечением равномерности изнашивания деталей позволяет исключить неравномерность изнашивания и, как следствие, повысить ресурс сопряжения. Например, введение механизма вращения тарелки клапана при его работе (рис. 5.5, а), обеспечение вращения толкателя ГРМ за счет смещения точки касания относительно оси толкателя (рис. 5.5, б).

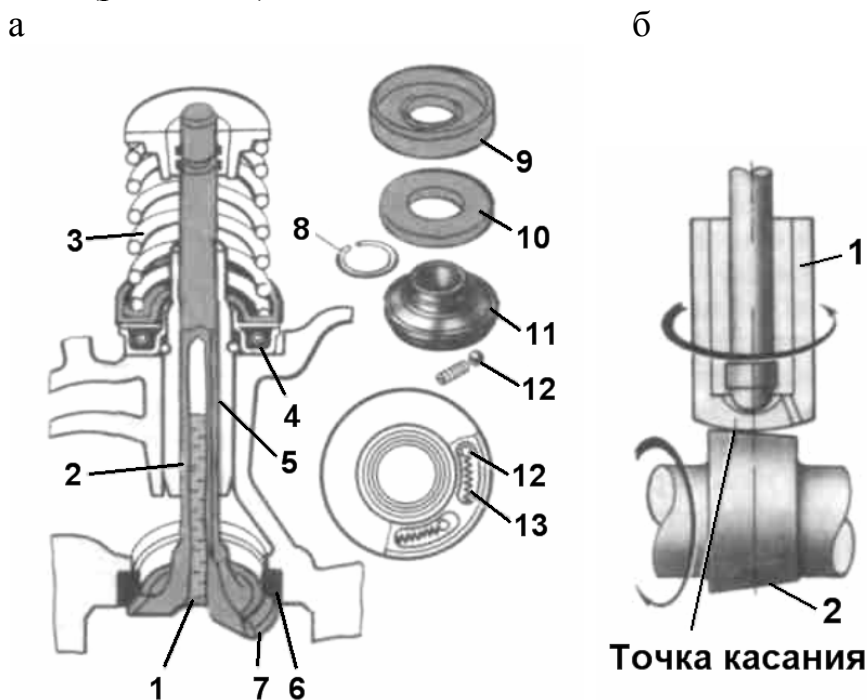


Рис. 5.5. Механизмы, обеспечивающие равномерный износ деталей:  
 а – выпускной клапан с механизмом вращения в сборе:  
 1 – заглушка; 2 – полость; 3 – пружина клапана; 4 – механизм вращения;  
 5 – втулка клапана; 6 – седло; 7 – рабочая фаска; 8 – замочное кольцо;  
 9 – упорная шайба; 10 – дисковая пружина; 11 – корпус механизма вращения;  
 12 – шарик; 13 – возвратная пружина;  
 б – привод толкателя:  
 1 – толкатель, 2 – кулачок распредвала

6. *Конструктивное предотвращение возможных аварий технической системы из-за отказа элемента системы.* Следует учитывать возможность выхода из строя наиболее напряженных деталей и принимать меры к предотвращению вызываемых ими серьезных аварий. Примером может служить клапан двигателя внутреннего сгорания (рис. 5.6, а). При поломке клапанной пружины клапан провисает в направляющей втулке и начинает ударяться в днище поршня. Если к тому же выходят из своих гнезд конические сухари 1 крепления клапанной тарелки, то клапан проваливается в цилиндр. Тогда неизбежна серьезная авария в результате упора штока клапана в потолок камеры сгорания.

В конструкции (рис. 5.6, б) авария исключена за счет установки на штоке кольцевого стопора 2 на расстоянии  $h$  от торца направляющей, несколько превышающем рабочий ход клапана.

В системы смазки необходимо вводить аварийные устройства, обеспечивающие подачу масла хотя бы в минимальных количествах, при выходе из строя главной системы.

Безопасная шина ТМТ (рис. 5.7, б) по внешнему виду и внутреннему строению близка к обычной бескамерной радиальной шине (рис. 5.7, а), но имеет широкую беговую дорожку и усиленную надбортную часть.

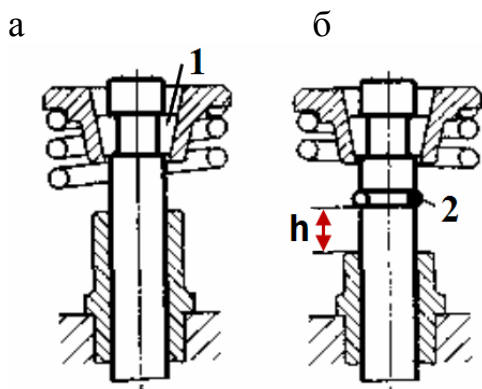


Рис. 5.6. Защита от последствий поломок

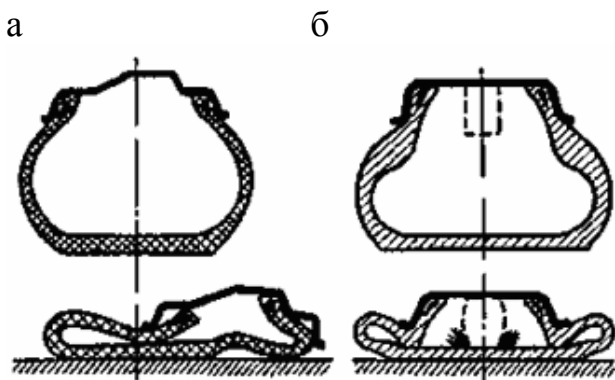


Рис. 5.7. Обычная и безопасная шины

При выходе воздуха из шины закраины обода опираются через надбортную часть на беговую часть шины, вследствие чего их борта не сходят с полков обода. Боковины и беговая часть шины амортизируют и обеспечивают возможность безопасной остановки автомобиля. Для уменьшения трения резины надбортной части по резине беговой части внутри шины на ободу (рис. 5.7, б) располагают специальные баллончики со смазывающей жидкостью, которая выдавливается внутрь шины по мере снижения давления. Дополнительно к указанному жидкость герметизирует место прокола и за счет испарения создает давление около 0,03 МПа, что улучшает ездовые качества проколотой шины.

*7. Обеспечение рационального нагрузочного, скоростного, теплового режима работы.*

Эффективным способом увеличения износостойкости, а соответственно, и повышения долговечности является уменьшение давления в трущихся соединениях. Этого можно достичь уменьшением нагрузок (рациональная раздача сил) или снижением степени цикличности и ударности нагрузок. Простым способом является увеличение площади поверхности трения, реализуемое, как правило, без существенного увеличения габаритных размеров деталей сопряжения. Например, долговечность направляющей станины металлорежущего станка, испытывающей нагрузку одностороннего действия (рис. 5.8, а), можно повысить путем изменения профиля направляющей (рис. 5.8, б) при неизменных габаритах, увеличив опорную поверхность и снизив давление в два раза.

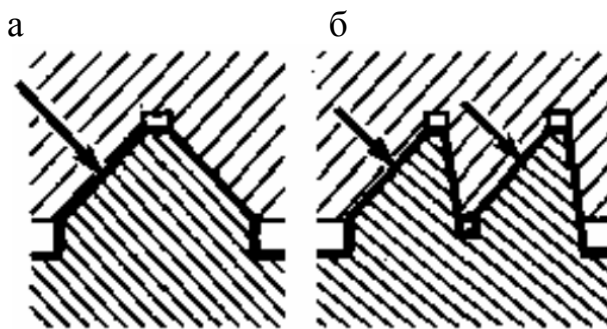


Рис. 5.8. Уменьшение давления в направляющих станины

Во всех случаях, когда допускает конструкция, точечный контакт следует заменять линейным, линейный – поверхностным, трение скольжения – трением качения.

В современных машинах температурный режим играет важную роль для повышения их долговечности. В ряде работ отмечено, что температурные условия процесса оказывают прежде всего влияние на износ деталей и форму изнашивания.

В зависимости от температуры трения могут наблюдаться принципиально различные условия изнашивания: до 100 °С – изнашивание при схватывании первого рода; до 500 °С – окислительное изнашивание; более 500 °С – тепловое изнашивание (изнашивание при схватывании второго рода).

Особое внимание следует уделять тепловому режиму работы уплотнительных и тормозных устройств, деталей двигателей, для которых характерна, например, максимальная интенсивность кавитации гильз цилиндров при 50...60 °С воды.

Температуру в узлах трения и нагрев деталей в двигателях можно регулировать охлаждением водой (или воздухом) и картерным маслом, созданием теплоизолирующих прорезей (в головках блоков и на поршнях), установкой в бобышках поршней пластинок из инвара, а также заполнением пустотелых впускных клапанов жидким натрием. Важно обеспечить рациональную емкость баков под рабочие жидкости.

Применение для современных двигателей мобильных машин предпусковых подогревателей жидкостного типа или электрофакельных позволяет существенно уменьшить износы их деталей при пусках в зимнее время.

*8. Применение бесступенчатого регулирования за счет использования гидро-, пневмо- или электропривода вместо сложных механических передач.*

Применение бесступенчатого гидро-, пневмо-, электропривода вместо механического позволяет обеспечить наиболее рациональный режим работы изделия. Например, гидромеханическая трансмиссия применяется в машинах, работающих при значительных и частых изменениях нагрузки на городских автобусах, где передачи переключают каждые 15...30 с, что занимает 5...15 % времени движения, а физические нагрузки при переключении передач составляют 25...40 % общей физической работы.

Гидромеханическая трансмиссия состоит из гидродинамического преобразователя вращающего момента (гидротрансформатора) и механической коробки передач. Гидротрансформатор (ГТ) обладает свойством бесступенчато и автоматически в зависимости от нагрузки на ведущих колесах автомобиля изменять (преобразовывать) ведущий момент, передаваемый от двигателя на трансмиссию.

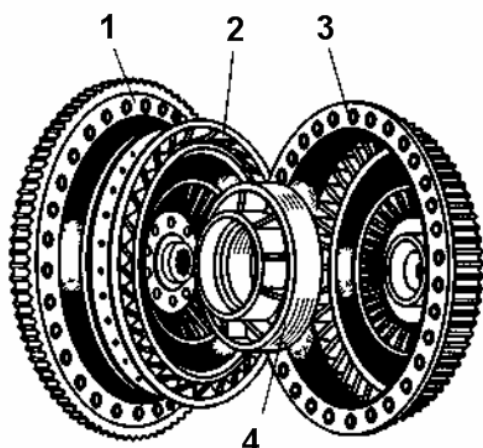
Одновременно изменяется частота вращения валов. При этом двигатель продолжает работать в стационарном режиме или в незначительно от него отличающемся.

Между двигателем и трансмиссией нет жесткой связи, а только гидравлическая; поэтому ГТ демпфирует динамические нагрузки, благодаря чему значительно повышаются показатели надежности трансмиссии автомобилей и их двигателей. Однако у гидротрансформатора относительно низкий максимальный КПД (0,85...0,90). При отклонении нагрузки от номинальной значение КПД резко снижается. Чтобы компенсировать этот недостаток и во время работы использовать зону наибольшего значения КПД, гидротрансформатор комплектуют со ступенчатым механическим редуктором. Вместе они составляют гидромеханическую трансмиссию (ГМТ). Сложность конструкции, большая масса, габаритные размеры и стоимость ограничивают применение гидротрансформаторов в конструкции автомобилей.

Гидротрансформатор представляет собой, как минимум, трехколесную гидравлическую машину (рис. 5.9), состоящую из близкорасположенных (с зазором около 1 мм) лопастных колес: насосного Н, турбинного Т и реактора Р. Пространство внутри колес заполнено жидкостью. Насосное колесо приводится во вращение непосредственно от двигателя. Турбинное колесо соединено с ведущим валом коробки передач. Реактор заблокирован жестко на корпус ГТ.



а



б

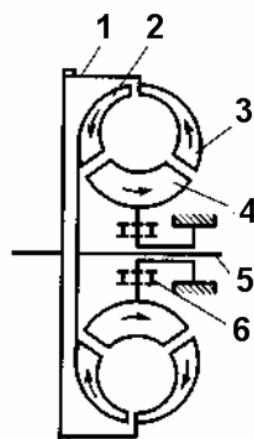


Рис. 5.9. Гидротрансформатор:  
а – детали гидротрансформатора; б – схема;  
1 – маховик; 2 – турбинное колесо; 3 – насосное колесо; 4 – реактор;  
5 – вал; 6 – муфта

Гидротрансформатор автоматически устанавливает необходимое передаточное число между коленчатым валом двигателя и ведомым валом.

9. *Предупреждение возможности перенапряжения машины в эксплуатации; введение автоматических регуляторов, предохранительных и предельных устройств, исключающих возможность эксплуатации машины на опасных режимах.*

Необходимо предупреждать возможность перенапряжения машины в эксплуатации, вводить автоматические регуляторы: реле-регуляторы в системе электрооборудования автомобиля, предохранительные клапаны в гидropневмосистемах, предохранительные и предельные устройства, исключающие возможность использования машины на опасных режимах.

Система должна быть спроектирована так, чтобы параметры, характеризующие работоспособность системы, имели возможность находиться и изменяться в широких пределах.

Спроектированная техническая система должна сохранять работоспособность при значительных отклонениях в характеристиках элементов и их связей.

Например, с помощью паровоздушного клапана внутренняя полость радиатора сообщается с атмосферой. Клапан смонтирован в крышке (рис. 5.10) заливной горловины радиатора. Кла-

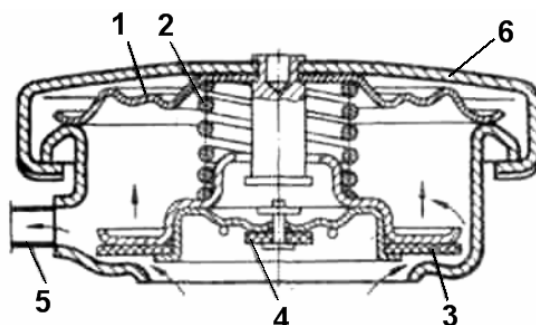


Рис. 5.10. Крышка радиатора с паровоздушным клапаном:  
1 – пружина крышки; 2 – пружина парового клапана; 3 и 4 – паровой и воздушный клапаны;  
5 – паротводная трубка; 6 – крышка заливной горловины радиатора

пан состоит из парового клапана 3 и размещенного внутри него воздушного клапана 4. Паровой клапан под действием пружины 2 плотно закрывает горловину радиатора. Если температура воды в радиаторе повышается до предельного значения, то под давлением паровой клапан открывается и избыток пара выходит наружу. Когда при охлаждении воды и конденсации пара в радиаторе создается разрежение, открывается воздушный клапан и в радиатор входит атмосферный воздух. Воздушный клапан закрывается под действием пружины, когда давление воздуха внутри радиатора становится равным атмосферному. Посредством воздушного клапана вода сливается из системы охлаждения при закрытой крышке горловины. При этом трубки радиатора предохраняются от разрушения под влиянием атмосферного давления в процессе остывания двигателя.

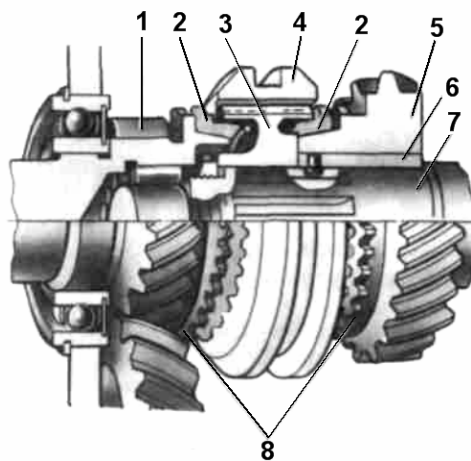


Рис. 5.11. Синхронизатор:  
1 – шестерня первичного вала и четвертой передачи;  
2 – блокирующее конусное кольцо; 3 – ступица; 4 – муфта;  
5 – ведомая шестерня третьей передачи; 6 – втулка;  
7 – вторичный вал; 8 – зубчатые венцы шестерен

*Синхронизатор* с помощью блокирующих конических колец 4 (рис. 5.11) позволяет выравнивать угловые скорости соединяемых валов коробки передач и снижает износ зубчатых колес при переключении передач, в результате повышается ресурс.

В пневмоприводах тормозных систем автомобилей используются влагомаслоотделители, которые предохраняют потребителей сжатого воздуха от попадания в них масла и влаги, предотвращая их преждевременные отказы.

Влагоотделитель (рис. 5.12) предназначен для охлаждения воздуха, поступающего от компрессора в пневмосистему автомобиля, отделения и автоматического слива образующейся капельной влаги. Влажный воздух от компрессора поступает в охладитель 10, охлажденный воздух из

охладителя – во внутреннюю полость влагоотделителя, приобретает здесь вращательное движение, проходит направляющее устройство и через осевое отверстие в корпусе 1 поступает к регулятору давления и далее в тормозную систему.

Выделившаяся в полости направляющего аппарата влага через сетку 7 поступает в полость сборника конденсата и собирается у закрытого клапана 6. По мере увеличения давления во внутренней полости диафрагма 5 прогибается, клапан 6 приоткрывается и скопившаяся влага вместе с воздухом попадает в полость под диафрагмой. После того как давление

воздуха в баллонах тормозной системы достигнет верхнего предела, срабатывает регулятор давления, и давление воздуха в полости над диафрагмой снижается до атмосферного. Верхний клапан 6 закрывается и разъединяет полость под диафрагмой и магистраль. При этом диафрагма 5 поднимается вверх и открывает клапан 2. Конденсат продувается через отверстие корпуса конденсатосборника в атмосферу.

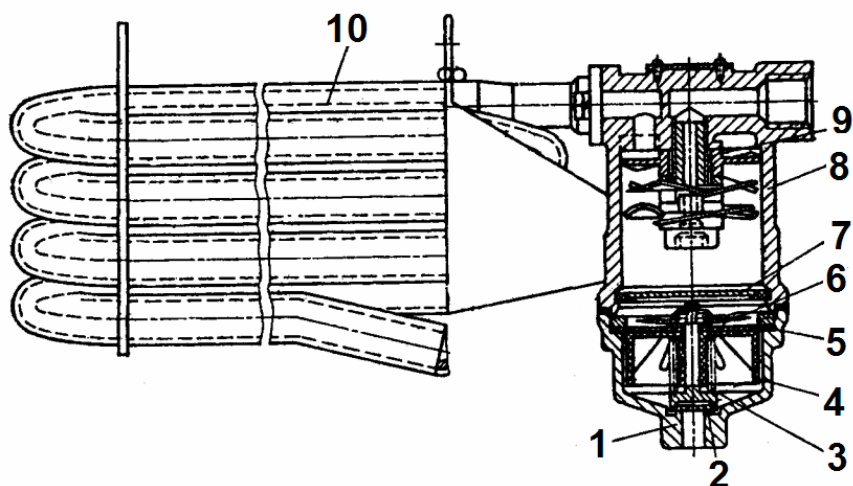


Рис. 5.12. Влагомаслоотделитель:

1 – корпус конденсатосборника; 2 – нижний клапан; 3 – пружина; 4 – поршень;  
5 – диафрагма; 6 – верхний клапан; 7 – сетка; 8 – корпус; 9 – лепестковая шайба;  
10 – охладитель

Введение *упругих муфт* (рис. 5.13) дает возможность обеспечить работоспособность соединяемых агрегатов при большем отклонении от соосности, чем это допускают жесткие муфты.

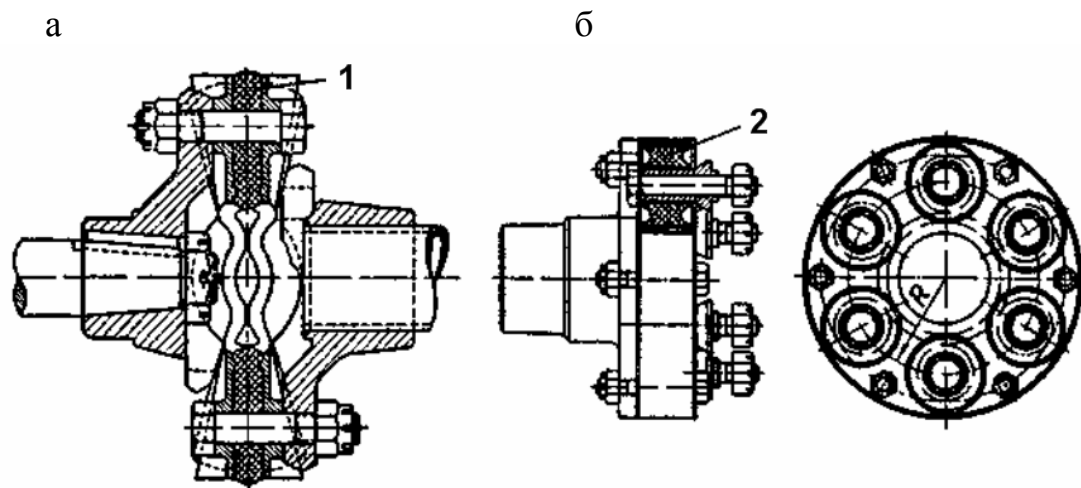


Рис. 5.13 – Мягкий кардан:

а – с упругим диском; б – с резинометаллическими втулками;  
1 – диск; 2 – резинометаллическая втулка

Компенсация износа деталей регулированием и саморегулированием снижает динамические нагрузки и увеличивает срок службы до предельного состояния, например самопритирающиеся конические пробковые краны, торцовые уплотнения, V-образные и треугольные направляющие, фрикционные передачи.

10. *Применение эффективных средств очистки воздуха, топлива и масел.*

Для снижения интенсивности изнашивания и увеличения ресурса сопряжений агрегатов необходимо сократить количество абразивных частиц, попадающих в зону трения. Это возможно путем применения эффективных фильтров, например ресурс двигателя увеличивается на 20...25 % при замене инерционного масляного воздухоочистителя (рис. 5.14, а), обеспечивающего уровень фильтрации 98,5 %, на двухступенчатый сухой типа с эжекторным отсосом с уровнем фильтрации 99,6 % (рис. 5.14, б).

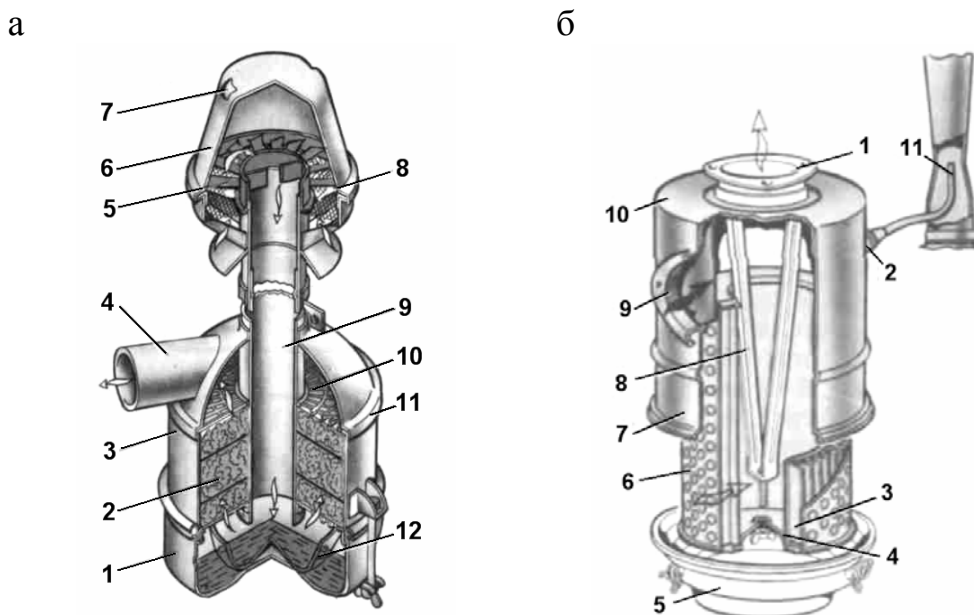


Рис. 5.14 – Воздушные фильтры дизельных двигателей:

а – тракторный трехступенчатый воздухоочиститель:

1 – поддон; 2 и 14 – фильтрующие элементы; 3 и 18 – корпуса; 4 – выходной патрубков очищенного воздуха; 5 – завихритель; 6 – инерционный очиститель; 7 – окно для удаления пыли; 8 – сетка; 9 – заборная труба; 10 – опорная обойма; 11 – головка; 12 – чашка для направления потока воздуха и масла;

б – автомобильный эжекторный воздухоочиститель сухого типа:

1 – выходной патрубков; 2 – патрубков отсоса пыли эжектором; 3 – фильтрующий элемент; 4 – внутренний защитный кожух; 5 – нижняя крышка; 6 – наружный защитный кожух; 7 – корпус; 8 – кронштейн крепления фильтрующего элемента; 9 – входной патрубков; 10 – крышка; 11 – трубка эжектора очистителя

Комбинированная система очистки масла: бумажный фильтр и частично поточная центрифуга в сравнении с полнопоточной центрифугой уменьшает в 2 раза изнашивание коленчатого вала.

Внедрение закрытой вентиляции картера двигателя на легковых автомобилях позволило повысить ресурс двигателей и увеличить срок службы масла.

11. *Использование высоконадежных элементов, проверенных, стандартизованных и унифицированных элементов.*

Унификация способствует сокращению номенклатуры деталей, узлов и агрегатов и уменьшению стоимости их изготовления, упрощению эксплуатации и ремонта машин. Унификация и стандартизация позволяют организовать производство элементов конструкции на специализированных предприятиях, что приводит к увеличению надежности выпускаемых изделий.

12. *Исключение в конструкции открытых механизмов и передач; проектирование механизмов в закрытых корпусах, предотвращающих проникновение грязи, пыли и влаги на трущиеся поверхности и позволяющих организовать непрерывную смазку; улучшение конструкции и материалов уплотнительных устройств и обеспечение необходимой герметизации узлов и агрегатов.*

Конструкция и материалы уплотнительных устройств для машин имеют большое значение в деле повышения их долговечности, поскольку мобильные машины длительный период работают в атмосфере, насыщенной абразивными частицами. Попадая во внутренние полости двигателей, агрегатов трансмиссии и ходовой части, они вызывают ускоренное изнашивание их деталей.

В машинах используются различные типы уплотнений: радиальные, самоподжимные, резиновые, каркасные, кольца-сальники, полугрубошерстные, торцевые с набивкой, лабиринтные. Наиболее надежны манжеты принудительного или гидродинамического действия, в которых вытекающее масло возвращается в уплотняемую полость за счет винтовой линии или специальных ребристых выступов у контактной кромки.

Для улучшения герметизации узлов и агрегатов заводы-изготовители все шире используют специальные прокладочные материалы (фторкаучуки, силиконовые резины), эластомеры, герметизирующие пасты и клеи. Например, защитный чехол карданного шарнира (рис. 5.15).

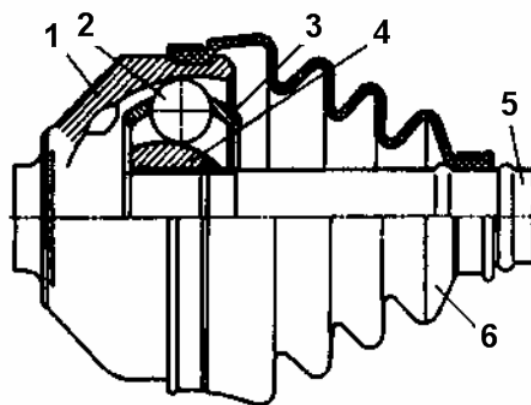


Рис. 5.15. Шестишариковый карданный шарнир: 1 – корпус; 2 – шарик; 3 – сепаратор; 4 – кулачок; 5 – вал; 6 – защитный чехол

13. Обеспечение надежных условий смазывания трущихся поверхностей деталей; устранение периодической смазки; проектирование непрерывной автоматической подачи смазочного материала к трущимся соединениям.

Все основные ответственные сопряжения современных двигателей мобильной техники, как правило, смазываются под давлением. Подача смазки под давлением и ее фильтрация все шире применяются и в узлах трения трансмиссий.

В большинстве двигателей используют комбинированную смазочную систему (рис. 5.16). К наиболее нагруженным деталям (коренные и шатунные подшипники коленчатого вала, клапанный механизм, втулки распределительных шестерен) масло подается под давлением, а к остальным – разбрызгиванием и самотеком.

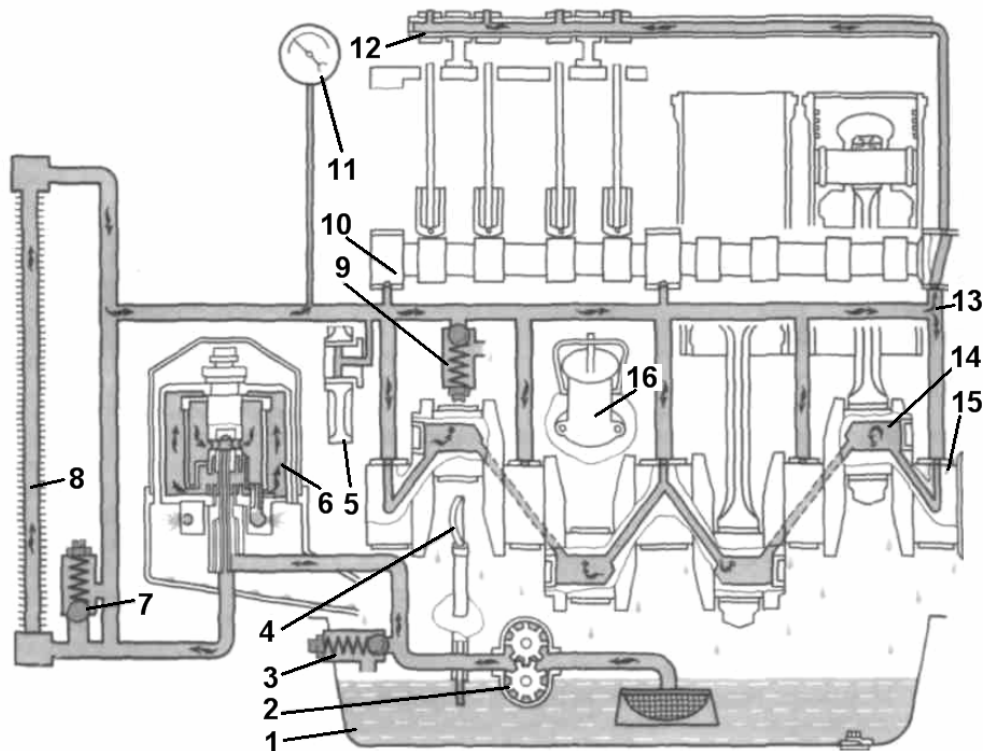


Рис. 5.16. Принципиальная схема смазочной системы двигателя:  
 1 – масляный поддон; 2 – масляный насос; 3, 7 и 9 – соответственно редукционный, температурный (радиаторный) и сливной клапаны;  
 4 – масломерный щуп; 5 – промежуточная шестерня; 6 – масляный фильтр;  
 8 – масляный радиатор; 10 и 15 – распределительный и коленчатый валы;  
 11 – манометр; 12 – ось коромысел; 13 – главный масляный канал;  
 14 – полость шатунной шейки; 16 – маслосливная горловина

Наиболее эффективным решением с точки зрения повышения износостойкости является полное устранение металлического контакта между рабочими поверхностями. Примерами безыносных узлов являются электромагнитные опоры с «витающими» валами, электромагнитные муфты и насосы (передача крутящего момента и осевого движения электро-

магнитными силами), муфты жидкостного трения (передача крутящего момента силами вязкого сдвига силиконовой жидкости), гидравлические трансформаторы (передача крутящего момента гидродинамическими силами потока жидкости).

Жидкостное трение может быть обеспечено в подшипниках скольжения с гидродинамической смазкой. При непрерывной подаче масла и наличии клиновидности масляного зазора, обуславливающей нагнетание масла в нагруженную область, в таких подшипниках на устойчивых режимах работы металлические поверхности полностью разделяются масляным слоем, что обеспечивает теоретически безызносную работу узла. На их долговечность не влияют нагрузка и скорости вращения. Однако в их работе возможен металлический контакт и нарушение жидкостной смазки на нестационарных режимах, особенно в периоды пуска и остановки, когда из-за снижения частоты вращения нагнетание масла прекращается и между цапфой и подшипником.

Для устранения этого получили применение гидростатические подшипники с подачей в зазор масла под давлением от автономного насоса. В таких подшипниках трущиеся поверхности разделяются масляным слоем еще до пуска машины; изменение частоты вращения не влияет на работоспособность подшипника.

В гидростатических подшипниках возможно увеличение толщины масляного слоя до 100...120 мкм вместо обычных в гидродинамических подшипниках значений 10...20 мкм, что снижает (примерно на один порядок) коэффициент трения подшипника и общие затраты мощности на трение (с учетом мощности привода насоса).

В гидростатической опоре (рис. 5.17) масло из насоса через дроссель 1 поступает в карман 2 с запорной кольцевой кромкой 3. Давление в кармане зависит от соотношения между сечением дросселя и переменным сечением между запорной кромкой и пятой. С увеличением нагрузки это сечение уменьшается и давление в кармане возрастает, становясь в пределе равным давлению, создаваемому насосом. При ударных нагрузках давление в кармане, благодаря «закупорке» дросселя в результате повышения его гидравлического сопротивления, может значительно превзойти давление, создаваемое насосом.

В цилиндрических опорах, нагруженных силами переменного направления, применяют систему нескольких радиально расположенных карманов (рис. 5.17, б). При указанном направлении нагрузки несущим является нижний карман. Давление в верхнем кармане отсутствует вследствие истечения масла через увеличенный зазор на верхней дуге подшипника. Боковые карманы, давление в которых взаимно уравновешено, нагрузку не воспринимают. Масло, вытекающее через верхний и боковые карманы, выполняет обычную функцию охлаждения подшипника.

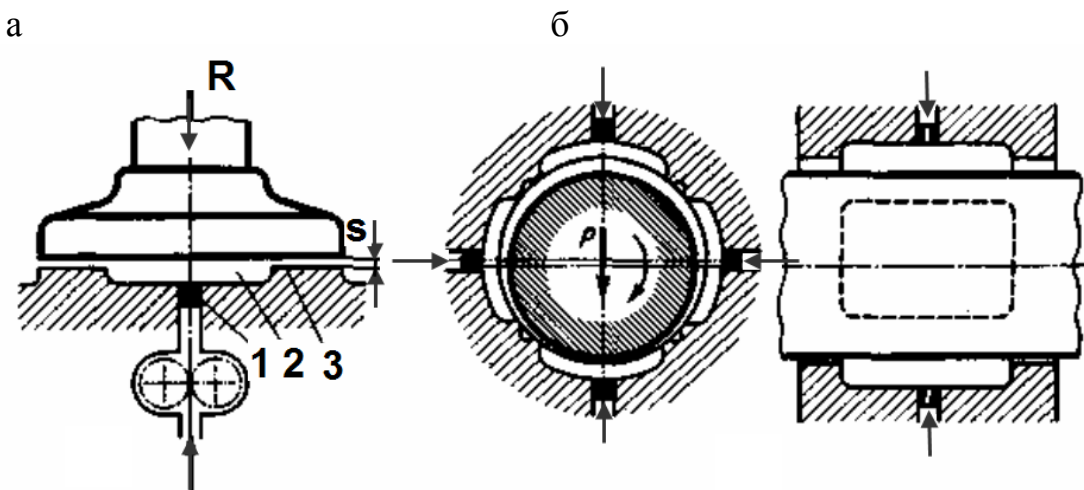


Рис. 5.17. Гидростатические подшипники:  
а – упорный; б – радиальный

Существенно усложняет эксплуатацию машин нерациональная система смазки, требующая постоянного внимания со стороны обслуживающего персонала. Периодической смазки следует избегать. Если этого сделать нельзя по конструктивным условиям, то необходимо применять самосмазывающиеся опоры или вводить систему централизованной подачи смазочного материала ко всем трущимся узлам с одного поста.

Наилучшее решение с точки зрения надежности и удобства эксплуатации – это полностью автоматизированная система смазки, не требующая периодической смены масла. Это достижимо, если предусмотреть меры, противодействующие окислению и тепловому перерождению масла и обеспечивающие непрерывную очистку и регенерацию масла.

14. *Использование материалов с высокими и стабильными характеристиками и рациональных их сочетаний в парах трения.*

Изменение характеристик прочности материала в большинстве случаев подчиняется нормальному закону распределения. Материалы со стабильными характеристиками имеют меньший разброс параметров прочности, т.е. меньшее среднее квадратическое отклонение, что снижает вероятность разрушения и увеличивает ресурс детали из этого материала. Ограничение только минимально возможных характеристик прочности материала, усечение распределения слева приводит к снижению вероятности разрушения детали.

Использование материалов с высокими механическими характеристиками дает существенную экономию материалов, так как масса деталей, рассчитываемых на прочность по опасным сечениям, обычно обратно пропорциональна допускаемым напряжениям (детали, работающие на растяжение; зубчатые колеса, рассчитываемые на изгибную прочность зубьев); масса деталей, рассчитываемых на контактную прочность (зубчатые колеса, подшипники качения), обратно пропорциональна квадрату



допускаемого напряжения. Допускаемое напряжение определяется для различных случаев нагружения пределом текучести или пределом прочности для хрупких материалов, пределом выносливости и твердостью поверхностного слоя.

Материалы с высокими показателями механических характеристик могут потребоваться только для деталей, критических по размерам и (или) массе. В то же время использование материалов с низкими показателями механических свойств увеличивает размеры этих деталей и, следовательно, размеры всего агрегата или конструкции.

Существенное значение для повышения прочности имеет применение материалов с пониженной чувствительностью к концентрации напряжений.

К материалам, работающим при трении и изнашивании, предъявляются требования высокой износостойкости и стабильного коэффициента трения, что достигается высокой твердостью материалов, высоким сопротивлением схватыванию, хорошей теплопроводностью, теплоустойчивостью.

Для антифрикционных материалов важны прирабатываемость, смачиваемость смазочным материалом, возможность самосмазывания.

Таким образом, стабильные характеристики применяемых материалов в течение заданного срока работы и срока хранения являются важным условием повышения надежности.

Долговечность большинства деталей технических систем определяется сопротивляемостью их изнашиванию при воздействии абразивных частиц, а также прочностью на изгиб и скручивание.

Большая группа ответственных деталей (коленчатые валы, коленчатые оси, поворотные цапфы и др.) в работе подвергаются циклическим динамическим нагрузкам, в связи с чем к материалам этих деталей наряду с износостойкостью предъявляются дополнительные требования высокой усталостной прочности и ударной вязкости. К материалам таких деталей, как шестерни, подшипники скольжения и качения, кулачковые валы, крестовины карданных валов и дифференциалов, предъявляются требования высокой контактной усталостной прочности.

Примеры применения различных материалов для конкретных деталей современных машин приведены в табл.5.1.

Детали современных машин в зависимости от назначения изготавливают из конструкционных износостойких, антифрикционных, фрикционных, коррозионно-стойких и других материалов. Материалы деталей и рациональные их сочетания подбираются на основе главных требований: получения заданной долговечности, необходимой технологичности и минимальных затрат при производстве.

Таблица 5.1

## Рекомендуемые материалы для деталей машин

Наименование детали	Рекомендуемый материал
Блоки цилиндров	Чугун СЧ15, СЧ18, СЧ21, СЧ24, специальные низколегированные чугуны
Коленчатые валы	Стали 45, 45А, 45Г2, 40Х, 45Х, 50Г, 65Г, 50ГСШ, 50ХФАШ, 45ХМФА, 45ГРФЕ, 40Х14ВА, а также высокопрочный чугун ВЧ50
Поршни	Литейные алюминиевые сплавы АЛ-25, АЛ-30, деформируемые АК-4
Гильзы цилиндров	Чугуны СЧ21, СЧ24, СЧ18, специальный легированный чугун, а также вставки из высоколегированного антикоррозионного чугуна
Поршневые пальцы	Стали 12ХНЗА, 15Х, 20Х, 45
Распределительные валы	Стали 15Х, 15НМ, 40, 45 и легированный чугун
Шатуны	Стали 40, 40Х, 40Г, 40Р, 451 2, 45Х, 40ХГАФЕ
Впускные клапаны	Стали 40ХН, 40Х, Х9С2, 4Х10С2М (в том числе с наплавленными тарелками и торцами стержней)
Головки цилиндров	СЧ21, ХНЧ-40, АЛ9, АЛ9В
Подшипники коленчатых валов	Сплав на алюминиевой основе АСМ (с добавками сурьмы и магния), баббит Б-83, свинцовистая бронза Бр С-30, сплав АО-20, малосурмянистый свинцовый сплав СОС-6-6-3
Валы сцеплений и коробок передач	Стали 45, 40Х, 18ХГТ, 20ХНР, 25ХГМ, 50Г, 38ХГСА, 20ХНТЦ
Шестерни коробок передач, задних мостов и других агрегатов	Стали 20ХНЗА, 25ХГМ, 25ХГТ, 20ХНРИ, 20ГСНТ, 18ХНТФ, 25ХГНМТ, 40Х
Корпуса коробок передач	Чугуны СЧ 15, СЧ 21
Картеры редукторов, главных передач, ступицы колес, коробки сателлитов	Чугуны КЧ 35, КЧ 37, КЧ 50
Крестовины карданных шарниров и дифференциалов и оси сателлитов	20х, 18ХГТ, 20ХНМ, 20ХНР, 40Х
Рессорные листы	Стали 50ГХ, 55С2, 60С2, 60С2А, 55С2ГФ
Материал для манжет	Резина ИРП-1314 на основе фторкаучука СКФ-32,
Втулки, подшипники скольжения, сальники, шестерни, крышки, ручки, детали тормозных устройств	Полимерные материалы

Для каждой конкретной детали (сопряжения) учитываются: условия работы, вид изнашивания, применение термической, химико-термической и других видов упрочняющей обработки, требования к точности изготовления.

Пластмассы заменяют сплавы в подшипниках скольжения и в элементах кузовов. Долговечность повышается за счет коррозионной стойкости и хороших антифрикционных свойств пластмасс при работе без смазки.

При выборе материалов пар трения нужно, чтобы максимальному износу подвергались дешевые, простые детали, например вкладыши коленчатого вала, изготавливаемые из бабита Б-83, свинцовистой бронзы, сплава на алюминиевой основе АСМ (сурьма и магний).

Рекомендуемые пары трения: сталь – антифрикционный цветной сплав (бронзы, бабиты), сталь – антифрикционный чугун, металл – полимерный материал, электролитический хром – чугун, закаленный чугун – алюминиевый сплав.

*15. Обеспечение высокой и оптимальной жесткости конструкции за счет исключения элементов большой податливости, применения деталей, работающих на растяжение и сжатие, вместо деталей, работающих на изгиб и кручение, рациональных форм сечений, например для кручения – тонкие кольцевые сечения, уменьшения местных деформаций за счет установки перегородок и развития ребер.*

Рассматриваемое требование относится к таким деталям, как рамы, блоки цилиндров, коленчатые валы, корпуса коробок передач и задних мостов. Указанные детали определяют работоспособность других деталей, и для них необходимо обеспечение достаточной жесткости, устойчивости и стабильности размеров, особенно взаимного расположения рабочих поверхностей.

Для современных машин, отличающихся повышенными скоростями, нагрузками и требованиями к точности рабочих характеристик, требования к жесткости возрастают. Жесткость деталей влияет на вероятность их разрушения по критериям статической и усталостной прочности, на виброустойчивость (способность системы и ее элементов нормально функционировать в условиях вибраций). Недостаточная жесткость одних деталей может привести к перегрузке и потере работоспособности других, например, недостаточная жесткость рам и станин приводит к нарушению центровки сочлененных агрегатов и узлов. Выбором необходимой жесткости может быть предотвращено попадание в область резонанса при вынужденных колебаниях и в условиях автоколебаний.

Однако не всегда следует стремиться к повышению жесткости – ударные нагрузки лучше воспринимаются не абсолютно жесткими телами, контактные упругие деформации приводят к выравниванию распределения нагрузки и увеличению площади контакта. Например, чтобы поршень не заклинивало на юбке делают Т- и П-образные вырезы.

Модуль упругости у большинства применяемых материалов отличается незначительно; поэтому необходимую жесткость обеспечивают, оптимизируя форму и размеры детали и конструкции.

Основные направления повышения общей жесткости машин и собственной жесткости деталей:

- исключение элементов большой податливости, если в целом к системе предъявляются требования общей жесткости (бесполезны жесткие детали корпуса, если они соединены слабыми болтами на тонких фланцах);

- если есть выбор, то целесообразно применять детали, работающие на растяжение и сжатие, вместо деталей, работающих на изгиб и кручение;
- выбор рациональных форм сечений, например для кручения – наиболее подходят тонкие кольцевые сечения, для изгиба – сечения с максимальным отнесением площади от нейтральной оси;
- уменьшение местных деформаций за счет установки перегородок и развития ребер;
- рациональный выбор опор, т.е. переход от шарнирных опор к заземленным, и оптимальное их расположение по длине корпусной детали. Так как прогиб двухопорной балки пропорционален третьей степени пролета, то сближение опор является весьма эффективным средством повышения жесткости.

Во многих случаях жесткость системы удастся увеличить введением дополнительных опор (рис. 5.18). В конструкции (рис. 5.18, а) коленчатый вал закреплен в трех подшипниках. Система имеет малую жесткость; для ее увеличения щекам и шейкам вала необходимо придать большие сечения. Жесткость резко возрастает при введении опор между каждым коленом. Конструкция (рис. 5.18, б) применяется почти всегда.

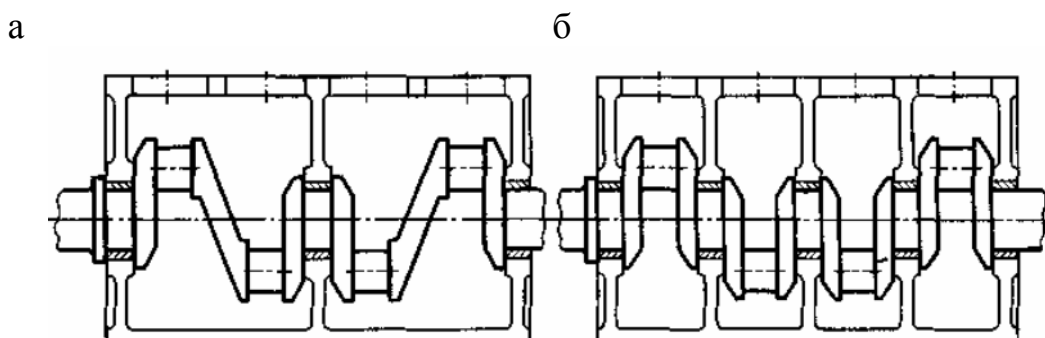


Рис. 5.18. Расположение опор коленчатого вала

16. Упрощение сборки машины, ее систем, отдельных агрегатов и узлов. При сборке целесообразно исключать необходимость индивидуального подбора, подгонки, пригонки деталей. Желательно обеспечивать полную взаимозаменяемость деталей. Необходимо исключать операции выверки, регулирования деталей и узлов по месту; предусматривать в конструкции фиксирующие элементы, обеспечивающие правильную установку деталей и узлов при сборке.

Например, затруднительное надевание мягкого рукава на трубу в конструкции (рис. 5.19, а) облегчено в конструкции (рис. 5.19, б) введением направляющего участка с закругленными входными кромками.

В уплотнениях с разрезными пружинными кольцами (рис. 5.19, в) для упрощения сборки корпус должен быть снабжен пологой заходной фаской

диаметра  $D$ , превышающего диаметр  $d$  колец в свободном состоянии (рис. 5.19, г).

В труднодоступных соединениях, особенно когда сборка производится «вслепую», детали, вводимые в отверстие (вид д), целесообразно снабжать конусами-искателями, а в отверстиях предусматривать конусы-ловители (рис. 5.19, е).

Применение откидных болтов существенно облегчает сборку узлов. Достаточно отвернуть гайку на высоту, обеспечивающую ее проход через угол крышки, после этого болты откидывают и освобождают крышку (рис. 5.19, ж).

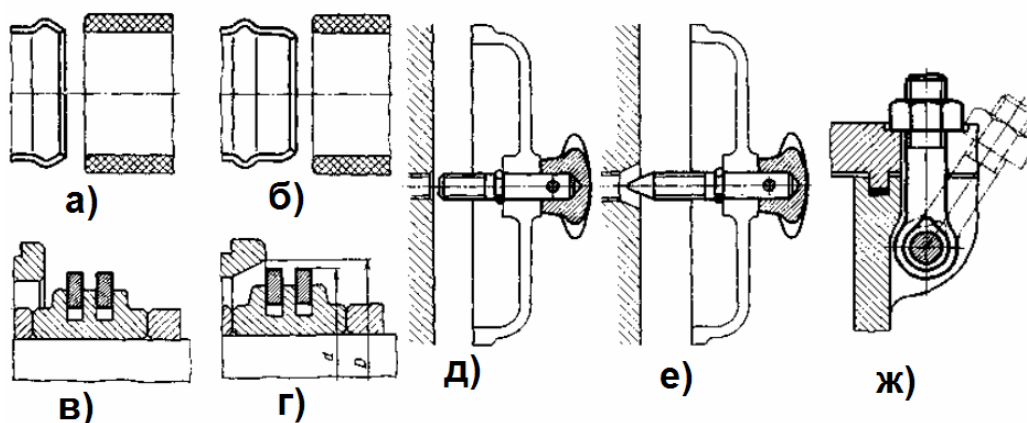


Рис. 5.19. Способы облегчения монтажа

*Рациональная компоновка оборудования.* Необходимо делать доступными и удобными для осмотра узлы, механизмы, нуждающиеся в периодических осмотрах, проверках, регулировках. При этом улучшается ремонтпригодность, упрощается обслуживание.

#### 17. Упрощение правил эксплуатации.

Необходимо устранять возможность возникновения отказов вследствие неправильных действий обслуживающего персонала, для чего следует вводить блокировки, предупреждающие возможность возникновения вредных последствий при ошибочности действий.

При создании машин надо избегать назначения сложного технического обслуживания, сокращать объем операций технического обслуживания и увеличивать периодичность их проведения, выполнять механизмы без необходимости периодической их регулировки.

#### 18. Введение в конструкцию типовых решений, снижающих коррозию.

Для уменьшения вероятности возникновения коррозии необходимо исключать возможность накопления влаги в полостях и на поверхностях, в порах или в щелях технических изделий (рис. 5.20).

Предупреждать коррозию деталей, в особенности у машин, работающих на открытом воздухе или соприкасающихся с химически активными средами,

следует путем использования стойких лакокрасочных и гальванических покрытий и изготовления деталей из коррозионно-стойких материалов.

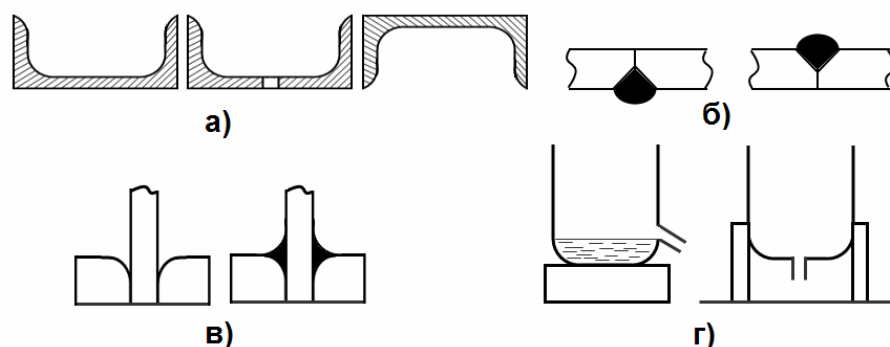


Рис. 5.20. Конструктивные схемы, снижающие коррозию

### 19. Резервирование технических систем.

Резервированием называется метод повышения надежности за счет обеспечения функциональной, временной избыточности, а также путем введения в систему избыточных элементов. Это означает, что наряду с основными элементами или запасами работоспособности, необходимыми для выполнения заданных функций, предусматриваются избыточные элементы (запасы работоспособности), которые не являются функционально необходимыми.

## 5.2. Особенности методов резервирования технических систем

Классифицируют методы резервирования по различным признакам (рис. 5.21). *Функциональное резервирование* – это обеспечение функциональной избыточности элементов машин, в результате чего облегчается режим их нагружения, например за счет применения системы ремонтных размеров, повышения производительности, мощности двигателей, по сравнению с необходимой для нормального функционирования, повышение запаса прочности по отношению к воспринимаемой нагрузке.

*Временное резервирование* предусматривает использование избыточного времени в случае возникновения отказа. Реализуется этот вид резервирования в период организации выполнения производственных процессов.

*Структурное резервирование* заключается во вводе избыточных одинаковых элементов в техническую систему. Данное резервирование позволяет создать работоспособные системы из элементов, надежность которых меньше надежности всей системы.

По способу резервирования различают постоянное и отдельное резервирование. *Постоянное резервирование* – это резервирование, при котором все элементы находятся в одинаковом рабочем режиме, например сдвоенные шины грузового автомобиля, сдвоенный ремень вентилятора, двухконтурная тормозная система автомобиля (рис. 5.22).

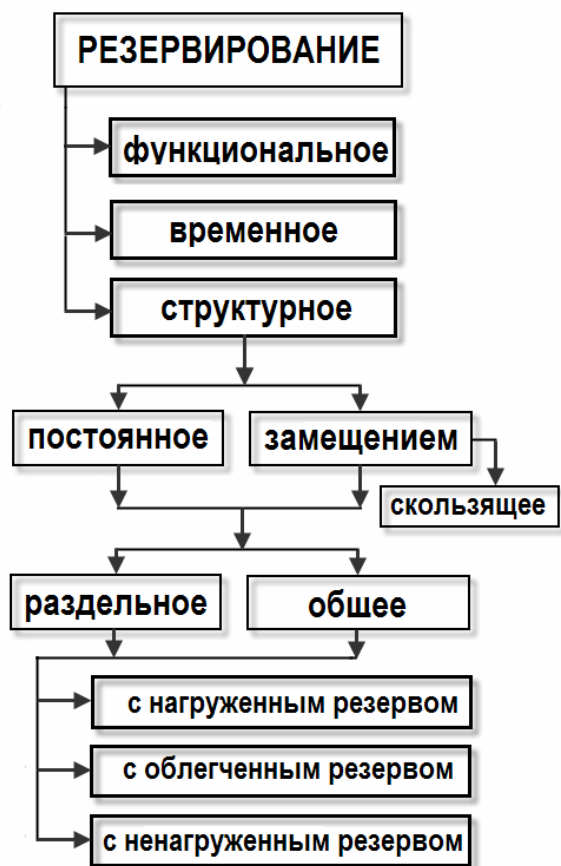


Рис. 5.21. Разновидности резервирования

Вероятность безотказной работы системы при данном виде резервирования (рис. 5.23, а) рассчитывают по выражению

$$P_c(t) = 1 - F_c(t) = 1 - F_0(t) \cdot F_p(t) = 1 - (1 - P_0(t)) \cdot (1 - P_p(t)), \quad (5.1)$$

где  $F_c(t)$ ,  $F_0(t)$ ,  $F_p(t)$  – вероятности отказа системы, основного и резервного элементов;

$P_0(t)$ ,  $P_p(t)$  – вероятности безотказной работы основного и резервного элементов.

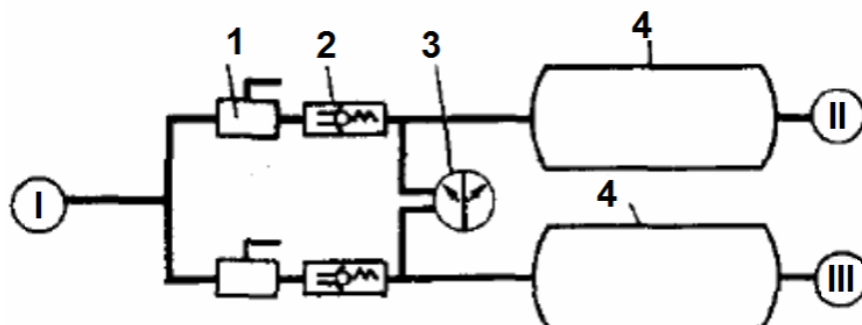


Рис. 5.22. Принципиальная схема разделения контуров пневмопривода автомобиля ЗИЛ-133Г2:

I – вход от компрессора; II – выход 1-го контура; III – вход 2-го контура; 1 – разобщительный кран; 2 – обратный клапан; 3 – манометр; 4 – ресиверы

Достоинством постоянного резервирования является возможность эксплуатации системы без перерыва на ввод резервного элемента при отказе основного. К недостаткам относятся усложнение системы, расходование ресурса резервным элементом, т.к. он постоянно включен в работу, и, как следствие, снижение надежности всей системы.

Резервирование замещением – это резервирование, при котором резервный элемент до включения его в работу находится вне системы в ненагруженном состоянии, например: двигатель автомобиля резервируется двигателем на складе (рис. 5.23, б).

В этом случае вероятность безотказной работы определяют по формуле

$$P_c(t) = e^{-\lambda t} \cdot \sum_{k=0}^n \frac{(\lambda \cdot t)^k}{k!}, \quad (5.2)$$

где  $n$  – число резервных элементов;

$\lambda$  – интенсивность отказов элементов.

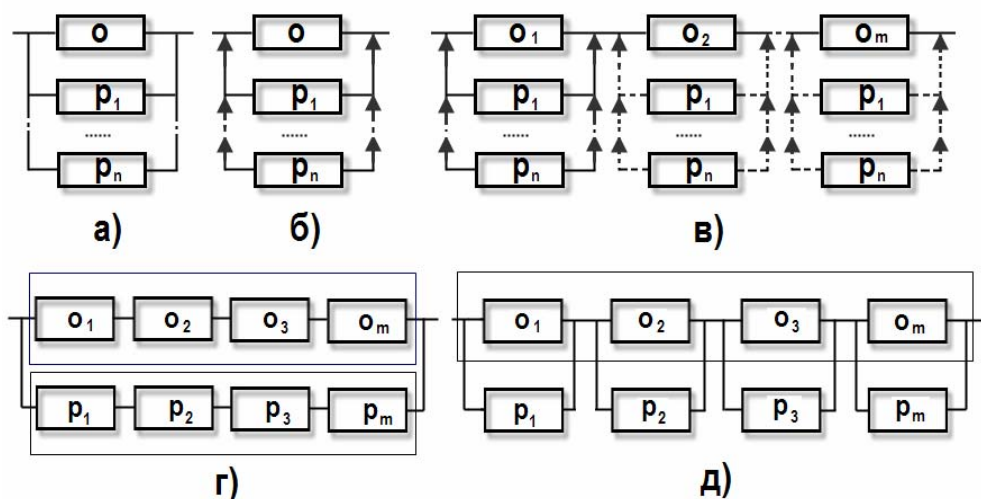


Рис. 5.23. Структурные схемы методов резервирования: а – постоянно; б – замещением; в – скользящее; г – общее; д – отдельное

Преимуществами резервирования замещением является то, что резервный элемент находится в ненагруженном состоянии, что сохраняет его надежность и повышает надежность системы в целом, кроме того, конструкция технического изделия менее сложна по сравнению с конструкцией изделия, имеющего постоянное резервирование.

К недостаткам относятся повышенные затраты времени на ввод в работу резервного элемента, приводящие к значительным простоям машины, а также ужесточение требований к легкосъемности и доступности изделия.



Скользящее резервирование – это разновидность резервирования замещением, предполагает замещение одним резервным элементом нескольких элементов основной системы, например: один карбюратор на складе может резервировать карбюраторы нескольких автомобилей.

Вероятность безотказной работы системы со скользющим резервированием (рис. 5.23, в) определяют по формуле

$$P_c(t) = e^{-m \cdot \lambda \cdot t} \sum_{k=0}^n \frac{(m \cdot \lambda \cdot t)^k}{k!}, \quad (5.3)$$

где  $m$  – число элементов основной системы;

$n$  – число резервных элементов.

Достоинством данного вида резервирования является то, что нет необходимости иметь резерв на каждый основной элемент системы, а недостатком – несколько меньшая общая надежность системы в сравнении с резервированием замещением.

По изделию резервирования различают общее и отдельное резервирование. При общем резервировании техническая система резервируется другой аналогичной системой, например: автобус резервируется другим автобусом.

Вероятность безотказной работы системы при полном резервировании (рис. 5.23, г) рассчитают по выражению

$$P_c = 1 - F_c = 1 - (1 - P_1 \cdot P_2) (1 - P_1 \cdot P_2) = 1 - (1 - P_1 \cdot P_2)^2. \quad (5.4)$$

К достоинству общего резервирования следует отнести быстрый ввод в работу резервного изделия. Недостатками являются несколько пониженная надежность системы и усложнение ее конструкции при постоянном резервировании.

При отдельном резервировании в технической системе резервируются только отдельные, как правило, наименее надежные элементы. Вероятность безотказной работы системы при отдельном резервировании (рис. 5.23, д) рассчитают по выражению

$$P_c = P_{1c} \cdot P_{2c} = (1 - F_{2c}) (1 - F_{1c}) = [(1 - (1 - P_1)^2) (1 - (1 - P_2)^2)]. \quad (5.5)$$

Достоинством отдельного резервирования является более высокая надежность технической системы в сравнении с применением общего резервирования. Недостатком является увеличенное время на ввод в работу резервных элементов в случае резервирования замещением, так как требуются значительные затраты времени на замену отказавшего элемента резервным.

Раздельным способом резервируют фильтры, подшипники, золотниковые распределители, уплотнительные узлы, источники питания и др.

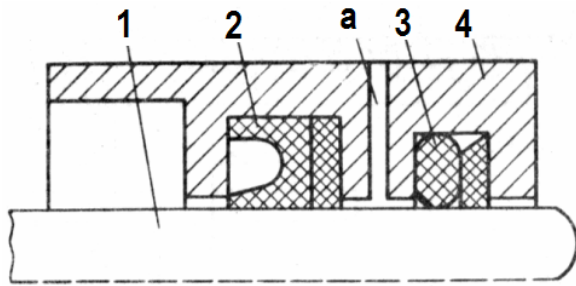


Рис. 5.24 Схема резервирования уплотнения штока гидроцилиндра

Например, на рис. 5.24 показана схема резервирования уплотнения штока гидродвигателя. Первая (основная) ступень – манжета 2 с усом, прижимаемым к штоку 1 давлением жидкости в полости цилиндра. Вторая (резервная) ступень – резиновое кольцо 3 круглого сечения. Канал а в корпусе 4 цилиндра соединяет полости между двумя уплотнениями.

Как раздельное, так и общее резервирование может быть с нагруженным, облегченным и ненагруженным резервом.

Если резервные элементы находятся в том же режиме работы, что и основные, то резерв считается нагруженным. При этом все элементы системы функционируют одновременно. Такой метод резервирования эффективен, однако не выгоден в энергетическом отношении.

Когда резервные элементы находятся в выключенном (нерабочем) состоянии и до момента их включения из-за отказа основного элемента или очередного резервного не могут потерять работоспособность, резерв называют ненагруженным.

Облегченным считается резерв, при котором резервные элементы находятся в менее нагруженном режиме, чем основные элементы.

### 5.3. Технологические мероприятия повышения надежности

1. *Использование методов упрочнения деталей.* Методы упрочнения дают возможность на завершающих этапах изготовления детали повысить ее прочностные свойства (по показателям статической и усталостной прочности), износостойкость, коррозионную стойкость, жаропрочность и т.д.

В настоящее время имеется широкий арсенал методов упрочнения деталей. Для *повышения усталостной прочности* могут использоваться: пластическое деформирование (дробеструйная обработка, обкатка шариками и роликами, гидрополирование, дорнование, алмазное выглаживание, калибрование шариком); химико-термическая обработка (цементация, азотирование); поверхностная закалка.

Для *повышения износостойкости* применяют: пластическое деформирование (дробеструйная обработка, обкатка шариками, гидрополирование, алмазное выглаживание); химико-термическую обработку (цементация, азотирование, цианирование, сульфидирование, сульфоцианирование); гальванические покрытия (хромовые, никелевые, железные); диффузионную металлизацию (диффузионное хромирование); электроискровое и электродуговое упрочнение.

Для *повышения коррозионной стойкости* можно использовать: химико-термическую обработку (азотирование, силицирование, сульфидирование); защитные гальванические покрытия (никелевые, цинковые, кадмиевые); лакокрасочные покрытия; пластмассовые покрытия; диффузионную металлизацию.

## *2. Повышение точности изготовления деталей.*

В машинах точность определяется условиями работы деталей и уровнем используемого обрабатывающего оборудования, а оценивается допусками на линейные размеры рабочих поверхностей деталей (диаметры шеек валов и отверстий, размеры шлицев и зубьев шестерен и др.), а также на взаимное расположение этих поверхностей (перпендикулярность и параллельность осей деталей, межцентровые расстояния, радиусы кривошипов и т.д.). Однако чем выше точность изготовления детали, тем больше затраты на ее производство.

Большинство деталей современных автомобилей изготавливается по 8...11 квалитетам точности. Ряд деталей двигателей, топливной аппаратуры, гидравлических систем и других узлов и агрегатов машин выполняются по 6...7 квалитету точности (поршневые пальцы, толкатели, клапаны, плунжерные пары).

С повышением точности изготовления деталей уменьшаются начальные зазоры в подвижных сопряжениях и более жестко регламентируются натяги в неподвижных соединениях, что обеспечивает значительное повышение долговечности машин, их доремонтного ресурса.

## *3. Обеспечение оптимального качества рабочих поверхностей деталей.*

Машиностроительное производство постоянно стремится к повышению качества рабочих поверхностей деталей (уменьшение их шероховатости и искажений макрогеометрии). Вместе с тем многочисленными исследованиями установлено, что при эксплуатации машин в трущихся парах в зависимости от режимов работы, условий смазывания, сочетания материалов и других факторов устанавливается определенная шероховатость, которую и следует обеспечивать при изготовлении деталей. Оптимальная шероховатость должна задаваться и для поверхностей деталей с неподвижными посадками.

Как правило, при назначении шероховатости поверхности детали следует учитывать ее размер, квалитет точности и поле допуска (прил. 23).

Чем меньше шероховатость, тем больше сопротивляемость поверхностей деталей к окислительному изнашиванию.

Существенное влияние шероховатость поверхности оказывает также на циклическую и динамическую прочность деталей машин.

Повышение качества обработки деталей лимитируется технологическими возможностями производства и стоимостью работ.

Для нормирования качества поверхности при производстве машин используют три главных показателя: шероховатость поверхности или микрогеометрию; отклонение формы и расположения (овальность, конусность, огранка и др.); микро-, макрогеометрию и волнистость поверхности. Главный из них шероховатость, оцениваемая двумя параметрами: основным – средним арифметическим отклонением профиля  $R_a$  и дополнительными – высотой неровностей  $R_z$  и наибольшей высотой неровностей  $R_{\max}$ , средним шагом неровностей  $S_{\text{ш}}$  и др.

Отклонения геометрической формы (макрогеометрия деталей) оказывают определенное влияние на величину и равномерность зазора (натяга) в сопряжении, условия контактирования, смазывания и в значительной мере определяют эксплуатационную надежность и долговечность узлов.

Волнистость поверхности уменьшает площадь фактического контакта сопрягаемых поверхностей и повышает удельное давление, отрицательно влияет на функциональные свойства деталей, работающих в условиях трения качения или трения с проскальзыванием, ухудшает герметичность сопряжений.

Шероховатость поверхности зависит в основном от вида обработки детали (прил. 19).

Для достижения высоких геометрических характеристик качества поверхности используют: срезание неровностей поверхности с помощью тонкого шлифования, хонингования, суперфиниша и полирования с применением синтетических алмазов, эльбора и других сверхтвердых материалов; смятие неровностей за счет поверхностного пластического деформирования, алмазного выглаживания и виброобкатывания алмазными или твердосплавными наконечниками; создание нового микропрофиля поверхности благодаря применению электрических и электрофизических методов обработки.

Отделочные операции необходимы не только для улучшения шероховатости, но и удаления тонкого дефектного поверхностного слоя, особенно после шлифования.

*4. Повышение точности и качества сборки узлов, агрегатов и машин в целом.*

Повышение качества сборки изделий осуществляется за счет применения: новых методов соединения деталей, особенно комбинированных (например контактной сварки и склеивания), способствующих улучшению герметизации и сопротивляемости коррозии; охлаждения деталей перед сборкой в жидком азоте; введения селективной сборки и весового подбора деталей с проведением их статистической и динамической балансировки (особенно в связи с форсированием машин); использования при сборке предварительного подогрева деталей (например, поршней из сплавов алюминия и шатунов); введения обязательной динамометрической затяжки

резьбовых соединений (подшипники коленчатых валов, головки блоков цилиндров).

5. *Применение обкатки и испытания узлов и агрегатов машин на специальных стендах под нагрузкой с использованием специальных масел.*

6. *Контроль качества производства изделий с помощью эффективных методов: применение средств активного контроля (особенно на операциях шлифования и хонингования); использование систем автоматического регулирования технологических процессов; систематический контроль и своевременная замена измерительного инструмента; введение контроля ответственных деталей и их поковок на отсутствие скрытых дефектов, нарушение микроструктуры с помощью различных методов дефектоскопии – магнитного (коленчатые валы и поворотные цапфы), люминесцентного (гильзы цилиндров) и др.*

7. *Повышение технологической дисциплины за счет обеспечения исполнителей необходимой технологической документацией – маршрутными, операционными технологическими картами, картами эскизов, техническими требованиями и т.п.*

## ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ КОНТРОЛЬНЫХ ЗАДАЧ

### Относительная частота и вероятность появления события

**Задача 1.** Определить вероятность выпадания “пятерки” или “шестерки” при бросании: а) одной игральной кости; б) двух игральных костей.

а) *Дано:*

Вероятность выпадания “пятерки” при бросании кости  $P(A_5)=1/6$ .

Вероятность выпадания “шестерки” при бросании кости  $P(A_6)=1/6$ .

*Определить:*  $P(A_5+A_6)$ .

*Решение:*  $P(A_5+A_6)=P(A_5)+P(A_6)-P(A_5\cdot A_6)=1/6+1/6-0=1/3$ .

б) *Дано:*

Вероятность выпадания “пятерки” при бросании первой кости  $P(A_{1-5}) = 1/6$ .

Вероятность выпадания “пятерки” при бросании второй кости  $P(A_{2-5}) = 1/6$ .

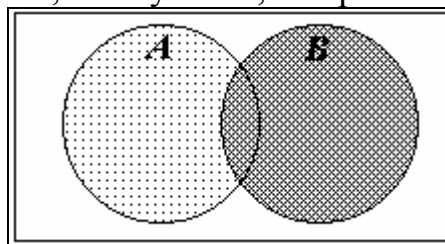
Вероятность выпадания “шестерки” при бросании первой кости  $P(A_{1-6}) = 1/6$

Вероятность выпадания “шестерки” при бросании второй кости  $P(A_{2-6}) = 1/6$ .

*Определить:*  $P(A_{1-5} + A_{2-5} + A_{1-6} + A_{2-6})$ .

*Решение:*  $P(A_{1-5} + A_{2-5} + A_{1-6} + A_{2-6}) = P(A_{1-5}) + P(A_{2-5}) + P(A_{1-6}) + P(A_{2-6}) - P(A_{1-5}\cdot A_{2-5}) - P(A_{1-5}\cdot A_{1-6}) - P(A_{1-5}\cdot A_{2-6}) - P(A_{2-5}\cdot A_{1-6}) - P(A_{2-5}\cdot A_{2-6}) - P(A_{1-6}\cdot A_{2-6}) + P(A_{1-5}\cdot A_{2-5}\cdot A_{1-6}) + P(A_{1-5}\cdot A_{2-5}\cdot A_{2-6}) + P(A_{1-5}\cdot A_{1-6}\cdot A_{2-6}) + P(A_{2-5}\cdot A_{1-6}\cdot A_{2-6}) - P(A_{1-5}\cdot A_{2-5}\cdot A_{1-6}\cdot A_{2-6}) = P(A_{1-5}) + P(A_{2-5}) + P(A_{1-6}) + P(A_{2-6}) - P(A_{1-5}\cdot A_{2-5}) - P(A_{1-5}\cdot A_{2-6}) - P(A_{2-5}\cdot A_{1-6}) - P(A_{1-6}\cdot A_{2-6}) = 4\cdot 1/6 - 4\cdot 1/6\cdot 1/6 = 5/9$ .

**Задача 2.** Определить вероятность попадания в зоны  $A$  и  $B$  мишени, изображенной на рисунке, если в результате 20 выстрелов число попаданий в зону  $A$  было равно 6, в зону  $B$  – 7, в пересечение зон – 2.



*Дано:*

$m_A=6$  выстрелов

$m_B=7$  выстрелов

$N=20$  выстрелов

*Определить:*  $P(A+B)$ .

*Решение:*  $P(A+B)=P(A)+P(B)-P(AB)=6/20+7/20-2/20=11/20$ .

**Задача 3.** Техническое устройство состоит из двух, не влияющих друг на друга элементов  $A_1$  и  $A_2$ . Элемент  $A_1$  – основной, элемент  $A_2$  – дублирующий. Определить вероятность отказа устройства, если вероятность отказа каждого из элементов равна 0,5.

*Дано:*

$$P(A_1) = P(A_2) = 0,5.$$

*Определить:*  $P(A_1 \cdot A_2)$

*Решение:*  $P(A_1 \cdot A_2) = P(A_1) \cdot P(A_2) = 0,5 \cdot 0,5 = 0,25.$

**Задача 4.** Производят три выстрела по одной и той же мишени. Вероятность попадания при первом–третьем выстрелах соответственно равна:  $P_1=0,3$ ;  $P_2=0,6$ ;  $P_3=0,8$ . Определить вероятность хотя бы одного попадания.

*Дано:*

$$P(A_1) = 0,3;$$

$$P(A_2) = 0,6;$$

$$P(A_3) = 0,8.$$

*Определить:*  $P_{\text{п}}$ .

*Решение:*

$$\begin{aligned} P_{\text{п}} = P(A_1 + A_2 + A_3) &= P(A_1) + P(A_2) + P(A_3) - P(A_1 \cdot A_2) - P(A_1 \cdot A_3) - \\ &- P(A_2 \cdot A_3) + P(A_1 \cdot A_2 \cdot A_3) = P(A_1) + P(A_2) + P(A_3) - P(A_1)P(A_2) - P(A_1)P(A_3) - \\ &- P(A_2)P(A_3) + P(A_1)P(A_2)P(A_3) = 0,3 + 0,6 + 0,8 - 0,3 \cdot 0,6 - 0,3 \cdot 0,8 - 0,6 \cdot 0,8 + \\ &+ 0,3 \cdot 0,6 \cdot 0,8 = 0,944. \end{aligned}$$

### Функциональные зависимости и числовые характеристики, используемые при расчетах надежности

**Задача 5.** Функция распределения непрерывной случайной величины  $X$  задана выражением:

$$F(x) = \begin{cases} 0 & \text{при } x \leq 0 \\ x^3 & \text{при } 0 < x \leq 1 \\ 1 & \text{при } x > 1 \end{cases}$$

*Найти:* плотность распределения  $f(x)$ .

*Решение:*

$$f(x) = \frac{dF(x)}{dx} = \begin{cases} 0 & \text{при } x \leq 0 \\ 3x^2 & \text{при } 0 < x \leq 1 \\ 0 & \text{при } x > 1 \end{cases}$$

**Задача 6.** Плотность распределения случайной величины  $X$  описывается выражением:

$$f(x) = \begin{cases} ax & \text{при } 0 \leq x \leq 1 \\ 0 & \text{в противном случае} \end{cases}$$

*Найти:* математическое ожидание, дисперсию и среднее квадратическое отклонение случайной величины.

*Решение:*

$$\int_{-\infty}^{\infty} f(x)dx = 1 \Rightarrow \int_0^1 axdx = 1 \Rightarrow \frac{a}{2} = 1 \Rightarrow a = 2.$$

Математическое ожидание:

$$M_x = \int_0^1 xf(x)dx = \int_0^1 2x^2dx = \frac{2}{3}.$$

Дисперсия:

$$D_x = \int_0^1 (x - M_x)^2 f(x)dx = \int_0^1 \left(x - \frac{2}{3}\right)^2 2xdx = 2 \left[ \frac{1}{4} - \frac{4}{9} + \frac{4}{18} \right] = \frac{1}{18}.$$

Среднее квадратическое отклонение:

$$\sigma_x = \sqrt{D_x} = 0,235.$$

**Задача 7.** Вычислить значение дисперсии  $D_x^*$ , если результаты измерения  $X$  следующие: 1,2; 1,5; 1,9; 2,4; 2,4; 2,5; 2,6; 3,0; 3,5; 3,8.

*Решение:*

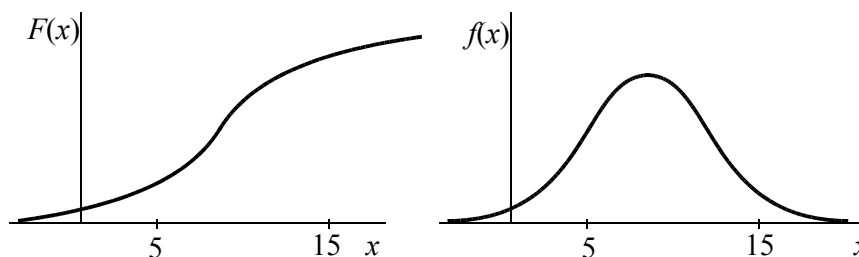
$$D_x^* = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{X})^2,$$

где  $N=10$  – число испытаний;

$\bar{X} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i$  – среднее значение величины  $X$ .

$$\bar{X} = \frac{1}{10} (1,2 + 1,5 + 1,9 + 2,4 + 2,5 + 2,6 + 3,0 + 3,5 + 3,8) = 2,48.$$

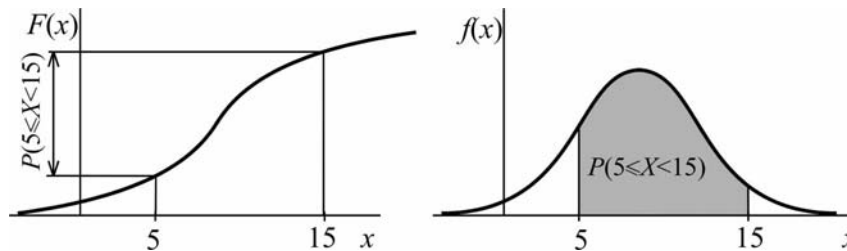
**Задача 8.** Показать (отобразить) графически  $P(5 \leq X < 15)$ , если графики  $f(x)$  и  $F(x)$  имеют вид:





Решение:  $P(5 \leq X < 15) = F(15) - F(5) = \int_5^{15} f(x) dx$ . Графически это можно

изобразить следующим образом:



### Показатели надежности

Задача 9. На испытания поставлено  $N=200$  изделий. Результаты испытаний приведены в таблице. Для каждого интервала вычислить число работоспособных изделий  $N_p(t)$  и интенсивность отказов  $\lambda(t)$ . Построить график временной зависимости интенсивности отказов.

Интервал, ч	$t$ , ч	$\Delta n$	$N_p(t)$	$\lambda(t)$ , ч <sup>-1</sup>
[0;10[	0	10		
[10;20[	10	8		
[20;30[	20	6		
[30;40[	30	4		
[40;50[	40	2		
[50;60[	50	2		
[60;70[	60	2		
[70;80[	70	4		
[80;90[	80	5		
[90;100[	90	8		

Требуемые параметры вычисляются по формулам:

$$N_p(t_i) = N - \sum \Delta n(t_i),$$

$$\lambda(t_i) = \Delta n(t_i) / (N_p(t_i) \Delta t).$$

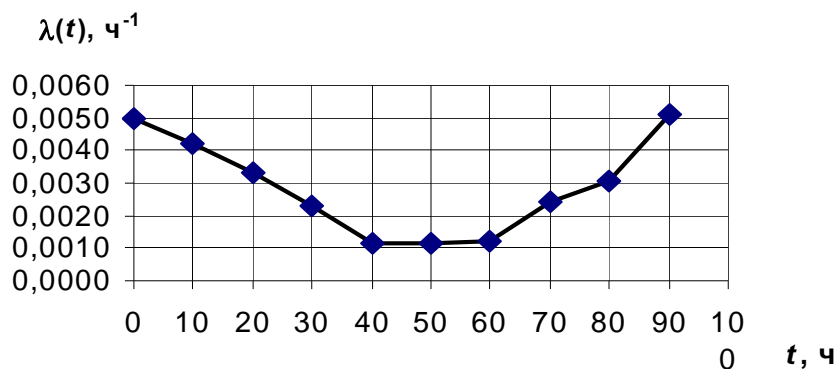


График временной зависимости интенсивности отказов

**Задача 10.** Определить коэффициент технического использования и коэффициент готовности машин, если известно, что машину эксплуатируют в течение года (8760 ч), на техническое обслуживание и ремонт тратится соответственно 480 и 20 ч.

*Дано:*

$$t_{\text{раб}} + t_{\text{рем}} + t_{\text{ТО}} = 8760 \text{ ч}$$

$$t_{\text{рем}} = 20 \text{ ч}$$

$$t_{\text{ТО}} = 480 \text{ ч}$$

*Определить:*  $K_{\text{т.и}}$ ,  $K_{\text{г}}$ .

*Решение:*

$$K_{\text{т.и}} = \frac{t_{\text{раб}}}{t_{\text{раб}} + t_{\text{рем}} + t_{\text{ТО}}} = \frac{8760 - 20 - 480}{8760} = 0,943;$$

$$K_{\text{г}} = \frac{t_{\text{раб}}}{t_{\text{раб}} + t_{\text{рем}}} = \frac{8760 - 20 - 480}{8760 - 480} = 0,997.$$

**Задача 11.** При эксплуатации изделий за год (8760 ч) было зафиксировано 5 отказов, на устранение каждого из которых затрачено в среднем 20 ч. Техническое обслуживание в этот период проводилось в течение 240 ч. Определить коэффициенты готовности и технического использования.

*Дано:*

$$T_{\text{э}} = 8760 \text{ ч}$$

$$m = 5 \text{ отказов}$$

$$T_{\text{в}} = 20 \text{ ч}$$

$$T_{\text{ТО}} = 240 \text{ ч}$$

*Определить:*  $K_{\text{г}}$ ,  $K_{\text{т.и}}$ .

*Решение:*

$$K_{\text{г}} = \frac{t_{\text{э}} - mt_{\text{в}} - t_{\text{ТО}}}{t_{\text{э}} - t_{\text{ТО}}} = \frac{8760 - 5 \cdot 20 - 240}{8760 - 240} = 0,988;$$

$$K_{\text{т.и}} = \frac{t_{\text{э}} - mt_{\text{в}} - t_{\text{ТО}}}{t_{\text{э}}} = \frac{8760 - 5 \cdot 20 - 240}{8760} = 0,961.$$

## Законы распределения случайных величин

**Задача 12.** Определить вероятность безотказной работы и интенсивность отказов подшипника скольжения для наработки  $t_1 = 2 \cdot 10^4$  ч, если ресурс по износу подчиняется нормальному закону распределения с параметрами  $M_f = 4 \cdot 10^4$  ч,  $\sigma = 10^4$  ч.

*Решение.* Находим квантиль нормированного нормального распределения:

$$x=(t_1-M_t)/\sigma=(2\cdot 10^4 - 4\cdot 10^4)/10^4=-2.$$

По таблице определяем, что  $F_0(-2)=0,0228$ . Отсюда

$$P(t_1)=1 - F_0(x)=1 - 0,0228 = 0,9772;$$

$$\lambda(t_1)=f(t_1)/P(t_1);$$

где  $f(t_1)=f_0(x)/\sigma=0,054/10^4=5,4\cdot 10^{-6}$ .

Следовательно,

$$\lambda(t_1)=5,4\cdot 10^{-6}/0,9772=5,5\cdot 10^{-6}\text{ ч}^{-1}.$$

**З а д а ч а 13.** Случайная величина  $T$  нормально распределена с математическим ожиданием  $M_t=20$  и среднеквадратическим отклонением  $\sigma=2$ . Определить вероятность того, что случайная величина  $T$  находится в диапазоне  $19\leq T<22$ .

*Решение:*

$$\begin{aligned} P(19\leq T<22) &= P(T<22) - P(T<19) = F(22) - F(19) = \\ &= F_0((22 - M_t)/\sigma) - F_0((19 - M_t)/\sigma) = F_0(1) - F_0(-0,5) = \\ &= F_0(1) - 1 + F_0(0,5) = 0,8413 - 1 + 0,6915 = 0,5328. \end{aligned}$$

**З а д а ч а 14.** Определить вероятность безотказной работы редуктора в течение  $t=10^3$  ч, если ресурс распределен логарифмически нормально с параметрами  $\mu=7,5$ ,  $S=0,3$ .

*Решение:*

$$x=(\ln t - \mu)/S=(\ln 10^3 - 7,5)/0,3 = -1,97,$$

$$P(t)=1 - F_0(-1,97) = F_0(1,97) = 0,976.$$

**З а д а ч а 15.** Оценить вероятность  $P(t)$  отсутствия внезапных отказов изделия в течение 10000 часов, если наработки до отказа 5 изделий являются следующими:

$$T_1=1,2\cdot 10^8\text{ ч}; T_2=1,0\cdot 10^8\text{ ч}; T_3=0,8\cdot 10^8\text{ ч}; T_4=1,1\cdot 10^8\text{ ч}; T_5=0,9\cdot 10^8\text{ ч}.$$

Наработка подчиняется экспоненциальному закону распределения.

*Решение:*

$$\lambda=1/M_t,$$

$$\text{где } M_t = \frac{\sum_{i=1}^N t_i}{N} = \frac{\sum_{i=1}^5 t_i}{5} = \frac{(1,2 + 1,0 + 0,8 + 1,1 + 0,9)10^8}{5} = 10^8\text{ ч}.$$

$$\lambda=1/10^8=10^{-8}\text{ ч}.$$

$$P(t)=e^{-\lambda t}=\exp[-10^{-8}\cdot 10^4]=0,9999.$$

**Задача 16.** Оценить вероятность безотказной работы  $P(t)$  роликподшипников в течение  $t=10^4$  ч, если их ресурс распределен по закону Вейбулла с параметрами  $t_0=10^7$ ,  $m=1,5$ .

*Решение:*

$$P(t) = e^{-\frac{t^m}{t_0^m}} = e^{-\frac{(10^4)^{1,5}}{10^7}} = 0,905.$$

**Задача 17.** Пусть проводятся испытания пяти элементов ( $n=5$ ) до тех пор, пока не откажут все элементы; наработки до отказа  $t_1-t_5$  равны соответственно 5; 10; 15; 20 и 25 ч. Нарботка до отказа имеет распределение по экспоненциальному закону с плотностью вероятности  $f(t, \lambda) = \lambda e^{-\lambda t}$ , где  $\lambda$  – параметр распределения.

*Найти:* оценку параметра  $\lambda$  методом максимального правдоподобия.

*Решение.* Составим функцию правдоподобия и прологарифмируем ее:

$$L = \lambda^n \exp(-\lambda \sum_{i=1}^n t_i),$$

$$G = \ln L = n \ln \lambda - \lambda \sum_{i=1}^n t_i.$$

Затем частную производную функции  $G$  приравняем к нулю:

$$\frac{dG}{d\lambda} = \frac{n}{\lambda} - \sum_{i=1}^n t_i = 0.$$

Решив это уравнение относительно параметра  $\lambda$ , получим его оценку:

$$\lambda = \frac{n}{\sum_{i=1}^n t_i}. \quad (*)$$

Из данной формулы следует, что

$$\lambda = \frac{1}{T_{\text{ср}}},$$

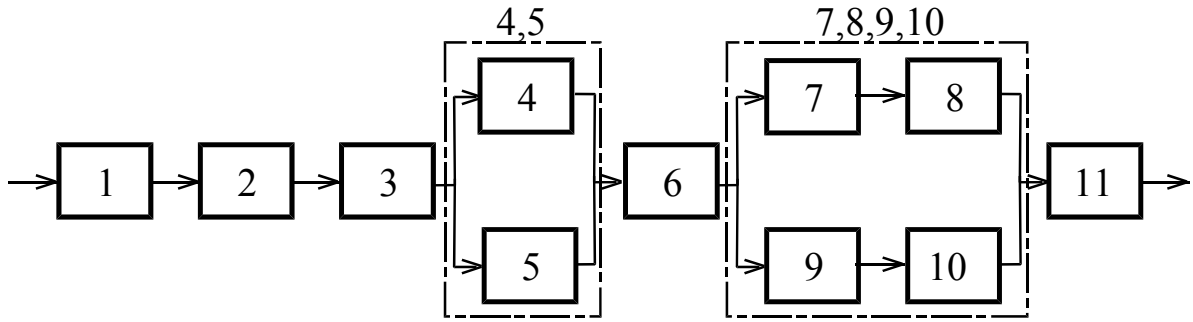
где  $T_{\text{ср}}$  – среднее значение наработки до отказа.

Подставим значения наработок до отказа в формулу (\*) для определения оценки параметра  $\lambda$ :

$$\lambda = \frac{5}{5 + 10 + 15 + 20 + 25} = 0,067 \text{ ч}^{-1}.$$

## Отказоустойчивые системы

**Задача 18.** Рассчитать вероятность безотказной работы  $P(t)$  системы, состоящей из независимых элементов. Структурная схема системы показана на рисунке.  $P_1(t)=0,9$ ;  $P_2(t)=0,95$ ;  $P_3(t)=0,98$ ;  $P_4(t)=0,81$ ;  $P_5(t)=0,8$ ;  $P_6(t)=0,97$ ;  $P_7(t)=0,92$ ;  $P_8(t)=0,93$ ;  $P_9(t)=0,92$ ;  $P_{10}(t)=0,93$ ;  $P_{11}(t)=0,89$ .



Решение:

$$P(t) = P_1(t) \cdot P_2(t) \cdot P_3(t) \cdot P_{4,5}(t) \cdot P_6(t) + P_{7,8,9,10}(t) \cdot P_{11}(t),$$

где  $P_{4,5}(t)$  – вероятность безотказной работы хотя бы одного элемента – 4-го или 5-го.

$$P_{4,5}(t) = P_4(t) + P_5(t) - P_4(t) P_5(t).$$

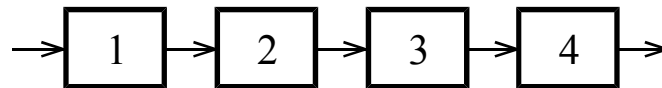
Аналогично

$$P_{7,8,9,10}(t) = P_7(t)P_8(t) + P_9(t)P_{10}(t) - P_7(t)P_8(t)P_9(t)P_{10}(t).$$

$$P(t) = 0,9 \cdot 0,95 \cdot 0,98 \cdot (0,81 + 0,8 - 0,81 \cdot 0,8) \cdot 0,97 \cdot (0,92 \cdot 0,93 + 0,92 \cdot 0,93 - 0,92 \cdot 0,93 \cdot 0,92 \cdot 0,93) \cdot 0,89 = 0,681.$$

**Задача 19.** Интенсивность отказов шин автомобиля вследствие прокола равна  $\lambda = 10^{-3} \text{ км}^{-1}$ . Определить вероятность  $P(300)$  300-километрового пробега при отсутствии запасной шины и вероятность  $P_{\text{зап}}(300)$  при ее наличии.

*Решение.* При отсутствии запасного колеса структурная схема надежности системы колес выглядит следующим образом:



$$P(t) = P_1(t)P_2(t)P_3(t)P_4(t) = (e^{-\lambda t})^4,$$

где  $P_1(t) = P_2(t) = P_3(t) = P_4(t) = e^{-\lambda t}$ .

$$P(t) = (e^{-10^{-3} \cdot 300})^4 = 0,3.$$

При наличии запасного колеса вероятность безотказной работы определяется как вероятность того, что хотя бы четыре колеса из пяти останутся целыми.

$$\begin{aligned} P(t) &= P_1(t) P_2(t) P_3(t) P_4(t) \cdot P_5(t) + P_1(t) P_2(t) P_3(t) P_4(t) \cdot [1 - P_5(t)] + \\ &+ P_1(t) P_2(t) P_3(t) \cdot [1 - P_4(t)] P_5(t) + P_1(t) P_2(t) \cdot [1 - P_3(t)] P_4(t) P_5(t) + \\ &+ P_1(t) \cdot [1 - P_2(t)] P_3(t) P_4(t) P_5(t) + [1 - P_1(t)] P_2(t) P_3(t) P_4(t) P_5(t) = \\ &= P_1^5 + 5P_1^4(1 - P_1) = 5P_1^4 - 4P_1^5 = 5e^{-4\lambda t} - 4e^{-5\lambda t} = 0,613. \end{aligned}$$

**Задача 20.** Система связи спроектирована таким образом, что при имеющихся пяти каналах связь обеспечивается при исправном состоянии любых двух каналов. Надежность передачи по всем каналам одинакова и обеспечивается с вероятностью безотказной работы  $P=0,9$ . Вычислить вероятность безотказной работы системы связи.

*Решение.* Так как система связи представляет собой систему типа «2 из 5», то вероятность безотказной работы этой системы равна:

$$P(t) = 1 - Q(t) = 1 - \sum_{k=0}^{m-1} C_n^k P^k (1-P)^{n-k},$$

где  $P$  – вероятность безотказной работы одного элемента (канала);

$m$  – число исправных элементов, при котором обеспечивается работоспособность системы;

$C_n^k = \frac{n!}{k!(n-k)!}$  – число сочетаний из  $n$  элементов по  $k$ .

$$\begin{aligned} P(t) &= 1 - \sum_{k=0}^1 C_5^k P^k (1-P)^{5-k} = 1 - [C_5^0 (1-P)^5 + C_5^1 P(1-P)^4] = \\ &= 1 - (10^{-5} + 5 \cdot 0,9 \cdot 10^{-4}) = 0,99954. \end{aligned}$$

## Контроль надежности систем по результатам испытаний

**Задача 21.** Определить нижнюю границу доверительного интервала при доверительной вероятности  $\alpha=0,7$ , если при испытании десяти изделий ни одно не отказало.

*Решение.* Для подтверждения того, что  $\text{Вер}(P_H \leq P) = \alpha$ , необходимо испытать  $n = \frac{\lg(1-\alpha)}{\lg P_H}$  изделий при условии, что отказов при испытании не

возникнет.

Отсюда

$$P_H = 10^{\frac{\lg(1-\alpha)}{n}} = \sqrt[n]{1-\alpha} = \sqrt[10]{1-0,7} = 0,887.$$

**Задача 22.** Проводится оценка надежности по отсутствию отказов. Какое число  $n$  изделий необходимо оценить для подтверждения с доверительной вероятностью  $\alpha=0,9$  того, что вероятность безотказной работы выше 0,95.

*Решение:*

$$n = \frac{\lg(1-\alpha)}{\lg P_H} = \frac{\lg(1-0,9)}{\lg 0,95} = 45.$$

# ВОПРОСЫ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ЗНАНИЙ

## Раздел 1. Общие положения и понятия

1. Перечислите основные понятия теории надежности.
2. Что понимают под качеством технической системы?
3. Что понимают под надежностью технической системы?
4. Что такое работоспособность и исправность технического объекта?
5. Перечислите критерии предельного состояния технического объекта.
6. Поясните динамику технического состояния объекта в период эксплуатации.
7. Объясните взаимосвязь надежности и экономичности технических систем.

## Раздел 2. Физические основы надежности

8. Какие факторы обуславливают изменение технического состояния изделий?
9. Охарактеризуйте причины нарушения работоспособности автомобилей (коррозия, пластическая деформация, усталостные разрушения).
10. Поясните классификацию отказов технических систем.
11. Охарактеризуйте виды изнашивания деталей машин.
12. Какие основные характеристики и закономерности присущи изнашиванию деталей машин?
13. Перечислите разновидности коррозии машин и охарактеризуйте их.
14. Особенности усталостного разрушения машин.

## Раздел 3. Математические основы надежности

15. Перечислите характеристики показателей надежности.
16. Какие показатели характеризуют безотказность восстанавливаемых изделий?
17. Перечислите показатели безотказности невосстанавливаемых объектов.
18. Какими показателями характеризуется долговечность технических систем?
19. Какими показателями характеризуется ремонтпригодность технических систем?
20. Что собой представляют коэффициенты готовности и технического использования изделий?
21. Охарактеризуйте закон нормального распределения наработки на отказ изделия.

22. Поясните область применения и особенности экспоненциального закона распределения наработки на отказ изделия.

23. Поясните область применения и особенности закона распределения Вейбулла.

24. Поясните область применения и особенности распределения Пуассона.

25. Поясните область применения и особенности биномиального распределения.

26. Опишите методику обработки информации о надежности машин.

27. Поясните методику расчета надежности сложных систем.

28. Как построить статистический и укрупненный ряд информации о показателе надежности?

29. Опишите методику проверки информации на выпадающие точки по критерию Ирвина.

30. Как рассчитать гамма-процентный ресурс объекта по известному теоретическому закону распределения?

31. Что понимается под интервальными характеристиками распределения показателя надежности?

#### **Раздел 4. Испытания машин на надежность**

32. Опишите классификацию видов испытаний машин на надежность.

33. Сущность ускоренных испытаний машин на надежность и их разновидность.

34. Разновидности эксплуатационных испытаний машин на надежность и их сущность.

#### **Раздел 5. Повышение надежности технических систем**

35. Перечислите виды структурного резервирования, их сущность, преимущества и недостатки.

36. Какие мероприятия повышения надежности относятся к конструкторским? Укажите их особенности.

37. Перечислите технологические мероприятия повышения надежности и их особенности.



## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящем учебном пособии раскрыты общие понятия науки о надежности (определение качества, основные свойства надежности, исправное, работоспособное и предельное состояния машин). Приведены классификация отказов автотранспортных средств, количественные показатели для оценки их безотказности, долговечности, ремонтпригодности и сохраняемости, а также показатели для комплексной оценки нескольких свойств надежности одновременно.

Рассмотрены инженерно-физические основы надежности, устанавливающие основные причины потери машиной работоспособности. Приведены основные методы испытания автомобилей на надежность, а также различные способы их ускорения. Более подробно обработка аналогичных и иных задач дана в специальной литературе.

В пособии отражены вопросы, недостаточно освещенные в ранее опубликованной учебной литературе по автомобильному транспорту; поэтому оно окажет помощь студентам, изучающим дисциплину «Основы теории надежности», предусмотренную программой подготовки специалистов автомобильного транспорта.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

### Основная

1. Зорин, В.А. Основы работоспособности технических систем [Текст]: учебник / В.А. Зорин. – М.: ООО «Магистр-Пресс», 2005. – 536 с.
2. Баженов, Ю.В. Основы теории надежности машин [Текст]: учебное пособие / Ю.В. Баженов. – Владимир: Изд-во Владим. гос. ун-та, 2006. – 156 с.
3. Зорин, В.А. Основы работоспособности технических систем [Текст]: учебное пособие / В.А. Зорин, В.А. Даугелло. – М.: Изд. ООО «Техполиграфцентр», 2006. – 183 с.
4. Озорнин, С.П. Основы работоспособности технических систем [Текст]: учебное пособие / С.П. Озорнин. – Чита: Изд. ЧитГУ, 2006. – 123 с.
5. Яхьяев, Н.Я. Основы теории надёжности автомобилей и техническая диагностика [Текст]: учебное пособие / Н.Я. Яхьяев, М.М. Магомедов. – Махачкала: Изд-во Махачкалинского филиала МАДИ (ГТУ), 2006. – 134 с.
6. Малкин, В.С. Техническая эксплуатация автомобилей: Теоретические и практические аспекты [Текст]: учебное пособие / В.С. Малкин. – М.: ИЦ «Академия», 2007. – 288 с.
7. Яхьяев, Н.Я. Основы работоспособности технических систем [Текст]: учебное пособие / Н.Я. Яхьяев, С.Н. Яхьяева. – Махачкала: Изд-во ДГТУ, 2007. – 118 с.
8. Апсин, В.П. Специальные главы надёжности и основы планирования экспериментов [Текст]: учебное пособие / В.П. Апсин, Е.В. Бондаренко, В.И. Рассоха. – Оренбург: Изд-во ИПК ГОУ ОГУ, 2009. – 134 с.
9. Зорин, В.А. Основы работоспособности технических систем [Текст]: учебник / В.А. Зорин. – М.: ИЦ «Академия», 2009. – 208 с.
10. Болдин, А.П. Надёжность и техническая диагностика подвижного состава автомобильного транспорта. Теоретические основы [Текст]: учебное пособие / А.П. Болдин, В.И. Сарбаев. – М.: Изд-во МАИИ, 2010. – 206 с.
11. Николаев, Н.Н. Основы теории надёжности и диагностика [Текст]: учебное пособие / Н.Н. Николаев. – зерноград: Изд-во ФГБОУ ВПО АЧГАА, 2010. – 148 с.
12. Яхьяев, Н.Я. Основы теории надёжности [Текст]: учебник / Н.Я. Яхьяев, А.В. Кораблин. – М.: ИЦ «Академия», 2013. – 208 с.

### Дополнительная

13. Авдонькин, Ф.Н. Теоретические основы технической эксплуатации автомобилей [Текст]: учебное пособие для вузов / Ф.Н. Авдонькин. – М.: Транспорт, 1985. – 215 с.

14. Вентцель, Е.С. Прикладные задачи теории вероятностей [Текст] / Е.С. Вентцель, Л.А. Овчаров. – М.: Радио и связь, 1983. – 416 с.
15. Власов, П.А. Надежность сельскохозяйственной техники [Текст] / П.А. Власов. – Пенза: РИО ПГСХА, 2001. – 124 с.
16. Власов, П.А. Описание лабораторных работ по курсу «Основы надежности сельскохозяйственной техники» [Текст] / П.А. Власов. – Саратов: ССХИ, 1979. – 37 с.
17. Гаркунов, Д.Н. Триботехника (износ и безысность) [Текст]: учебник / Д.Н. Гаркунов. – М.: Издательство МСХА, 2001. – 616 с.
18. ГОСТ 27.002–89. Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения [Текст].
19. ГОСТ 27.301–95. Надежность в технике. Расчет надежности. Основные положения [Текст].
20. ГОСТ 27674–88. Трение, изнашивание и смазка. Термины и определения [Текст].
21. ГОСТ 28.001–83. Система технического обслуживания и ремонта техники. Основные положения [Текст].
22. ГОСТ Р 51709–2001. Автотранспортные средства. Требования безопасности к техническому состоянию и методы проверки [Текст].
23. Гурвич, И.Б. Эксплуатационная надежность автомобильных двигателей [Текст] / И.Б. Гурвич, П.Э. Сыркин. – М.: Транспорт, 1984. – 141 с.
24. Диагностика и техническое обслуживание машин: учебник для студентов высших учебных заведений / А.Д. Ананьин, В.М. Михлин, И.И. Габитов, А.В. Неговора, А.С. Иванов. – М.: Академия, 2008. – 432 с.
25. Ермолов, Л.С. Основы надежности сельскохозяйственной техники [Текст] / Л.С. Ермолов, В.М. Кряжков, В.Е. Черкун. – М.: Колос, 1982. – 271 с.
26. Иванов, А.С. Методическое пособие к лабораторным работам по дисциплине «Основы теории надежности и диагностика» [Текст] / А.С. Иванов. – Пенза: ПГСХА, 2000. – 31 с.
27. Кубарев, А.И. Надежность в машиностроении / А.И. Кубарев. – М.: Издательство стандартов, 1989. – 224 с.
28. Надежность машин [Текст]: учебное пособие для машиностр. спец. вузов / Д.Н. Решетов, А.С. Иванов, В.З. Фадеев; под ред. Д. Н. Решетова. – М.: Высшая школа, 1988. – 238 с.
29. Надежность технических систем [Текст]: справочник / Ю.К. Беляев, В.А. Богатырев, В.В. Болотин и др.; под ред. И.А. Ушакова. – М.: Радио и связь, 1985. – 608 с.
30. Плескунин, В.И. Теоретические основы организации и анализа выборочных данных в эксперименте [Текст] / В.И. Плескунин, Е.Д. Воронина. – Л.: ЛГУ, 1979. – 232 с.

31. Прейсман, В.И. Основы надежности сельскохозяйственной техники [Текст] / В.И. Прейсман. – Киев-Донецк: Вища школа, 1988. – 247с.
32. Проников, А.С. Надежность машин [Текст] / А.С. Проников. – М.: Машиностроение, 1978. – 592 с.
33. Селиванов, А.И. Теоретические основы ремонта и надежности сельскохозяйственной техники [Текст] / А.И. Селиванов, Ю.Н. Артемьев. – М.: Колос, 1978. – 248 с.
34. Сырицын, Т.А. Эксплуатация и надежность гидро-пневмоприводов [Текст] / Т.А. Сырицын. – М.: Машиностроение, 1990. – 248 с.
35. Техническая диагностика гидравлических приводов [Текст] / Т.В. Алексеева [и др.]; под общ. ред. Т.М. Башты. – М.: Машиностроение, 1989. – 264 с.
36. Техническая эксплуатация автомобилей [Текст] / Е.С. Кузнецов [и др.]; под ред. Е.С. Кузнецова. – М.: Транспорт, 1991. – 413 с.
37. Техническая эксплуатация автомобилей [Текст] / Е.С. Кузнецов [и др.]; под ред. Е.С. Кузнецова. – М.: Наука, 2001. – 535 с.
38. Техническая эксплуатация автомобилей [Текст] / под ред. Г.В. Крамаренко. – М.: Транспорт, 1983. – 488 с.
39. Технические средства диагностирования [Текст]: справочник / В.В. Ключев [и др.]; под общ. ред. В.В. Ключева. – М.: Машиностроение, 1986. – 672 с.
40. Техническое обслуживание, ремонт и хранение автотранспортных средств [Текст]: учебник: в 3 кн. Кн. 1. Теоретические основы. Технология / В.Е. Канарчук [и др.]. – Киев: Выща школа, 1991. – 359 с.
41. Труханов, В.М. Методы обеспечения надежности изделий машиностроения [Текст] / В.М. Труханов. – М.: Машиностроение, 1995. – 304 с.
42. Хазов, Б.Ф. Справочник по расчету надежности на стадии проектирования [Текст] / Б.Ф. Хазов, Б.А. Дидусев. – М.: Машиностроение. 1986. – 224 с.
43. Авдонькин, Ф.Н. Теоретические основы технической эксплуатации автомобилей [Текст] / Ф.Н. Авдонькин. – М.: Транспорт, 1985. – 216 с.
44. Аринин, И.Н. Техническая эксплуатация автомобилей [Текст] / И.Н. Аринин, С.И. Коновалов, Ю.В. Баженов // Серия «Высшее профессиональное образование». – Ростов н/Д: Феникс, 2004. – 315 с.
45. Безверхний, С.Ф. Основы технологии полигонных испытаний и сертификация автомобилей [Текст] / С.Ф. Безверхний, Н.Н. Яценко. – М.: ИПК Изд-во стандартов, 1996. – 600 с.
46. Болдин, А.П. Основы научных исследований и УНИРС. Ч. II. Специальные методы и методические подходы [Текст]: учебное пособие / А.П. Болдин, В.А. Максимов. – М.: МАДИ, 2004. – 181 с.

47. Емелин, М.И. Защита машин от коррозии в условиях эксплуатации [Текст] / М.И. Емелин, А.А. Герасименко. – М.: Машиностроение, 1980. – 224 с.
48. ГОСТ 27.002–89. Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения [Текст]. – М.: Изд-во стандартов, 1990. – 38 с.
49. Гурвич, И.Б. Эксплуатационная надежность автомобильных двигателей [Текст] / И.Б. Гурвич, П.Э. Сыркин. – М.: Транспорт, 1984. – 141 с.
50. Зорин, В.А. Основы работоспособности технических систем [Текст]: учебник для вузов / В.А. Зорин. – М.: ООО «Магистр-Пресс», 2005. – 536 с.
51. Кубарев, А.И. Надежность в машиностроении [Текст] / А.И. Кубарев. – М.: Изд-во стандартов, 1989. – 224 с.
52. Кугель, Р.В. Испытания на надежность машин и их элементов [Текст] / Р.В. Кугель. – М.: Машиностроение, 1982. – 181 с.
53. Кузьмин, Н.А. Процессы и закономерности изменения технического состояния автомобилей в эксплуатации [Текст]: учебное пособие / Н.А. Кузьмин. – Н.Новгород: Нижегород. гос. ун-т, 2002. – 142 с.
54. Купцова, Г.К. Обработка информации о надежности машин. Алгоритмы и расчеты [Текст]: учебное пособие / Г.К. Купцова, В.И. Купцов, Ф.Ю. Керимов. – М.: МАДИ, 1981. – 88 с.
55. Мирошников, Л.В. Диагностирование технического состояния автомобилей на автотранспортных предприятиях [Текст] / Л.В. Мирошников, А.П. Болдин, В.И. Пал. – М.: Транспорт, 1977. – 263 с.
56. Проников А.С. Надежность машин [Текст] / А.С. Проников. – М.: Машиностроение, 1978. – 532 с.
57. Российская автотранспортная энциклопедия. Т.3. Техническая эксплуатация, обслуживание и ремонт автотранспортных средств [Текст]: Справ. и науч.-практ. пособие. – М.: РООИП, 2000. – 456 с.
58. Ротенберг Р.В. Основы надежности системы водитель – автомобиль – дорога – среда [Текст] / Р.В. Ротенберг. – М.: Транспорт, 1986. – 215 с.
59. Справочник. Надежность в машиностроении [Текст] / под общ. ред. Шашкина В.В. и Карзова Г.П. – СПб.: Политехника, 1992. – 719 с.
60. Техническая эксплуатация автомобилей [Текст]: учебник для вузов / под ред. Е.С. Кузнецова. – М.: Наука, 2001. – 535 с.
61. Шейнин, А.М. Основные принципы управления надежностью машин в эксплуатации [Текст] / А.М. Шейнин. – М.: Знание, 1977. – 44 с.

## СЛОВАРЬ ТЕРМИНОВ

*Безопасность* – это свойство изделия не создавать или минимизировать угрозу для жизни и здоровья людей, а также окружающей среды. Для автомобиля типичной является дорожная и экологическая безопасность.

*Безотказность* – это свойство изделия непрерывно сохранять работоспособное состояние в течение некоторого времени или некоторой наработки.

*Блочность* – это приспособленность конструкции к расчленению на отдельные агрегаты и сборочные единицы.

*Вероятность безотказной работы восстанавливаемого изделия* – это вероятность того, что восстанавливаемое изделие в произвольный момент времени находится в работоспособном состоянии.

*Вероятность безотказной работы невосстанавливаемого изделия* – это вероятность того, что в пределах заданной наработки отказ изделий не возникнет, т.е. вероятность того, что наработка изделия до отказа больше заданной.

*Вероятность восстановления* – это вероятность того, что время восстановления работоспособного состояния изделия не превысит заданного.

*Вероятность события (отказа)* – это объективная математическая оценка возможности реализации случайного события (возникновения отказа).

*Взаимозаменяемость* – это свойство конструкции технического изделия, обеспечивающее возможность его замены при ТО и ремонте без подгоночных работ.

*Воздействие рабочее* – это воздействие на основной вход изделия, обеспечивающее функционирование изделия в соответствии с заданным алгоритмом и одновременно используемое для его диагностирования.

*Воздействия тестовые* – это воздействия, которые могут подаваться как в процессе проверки изделия, когда оно не используется по назначению, так и при выполнении им своих рабочих функций, при этом нормальная работа изделия не нарушается.

*Восстанавливаемость* – это приспособленность конструкции к восстановлению потерянной работоспособности с минимальными затратами труда.

*Восстановление* – это процесс обнаружения и устранения отказа изделия с целью восстановления его работоспособности.

*Время восстановления* – это календарная продолжительность восстановления работоспособного состояния изделия или календарная продолжительность его технического обслуживания.

*Выборка* – это определенное число изделий, отобранных из исследуемой совокупности для получения сведения о генеральной совокупности, из-за того что объем выборки невелик, используют интервальные оценки.

*Гамма-процентное время восстановления* – время, в течение которого работоспособность изделия будет восстановлена с вероятностью гамма, выраженной в процентах.

*Генеральная совокупность* – это совокупность изделий, которая содержит все исследуемые изделия и из которой делается выборка, т.е. над которой ведется наблюдение.

*Дискретные случайные величины* – это величины, которые заранее можно перечислить.

*Долговечность* – свойство изделия сохранять работоспособность до наступления предельного состояния при установленной системе ТО и ремонта, с возможными перерывами для технического обслуживания и ремонтов.

*Допустимое значение параметра технического состояния* – это ужесточенное предельное значение, при котором обеспечивается заданный или экономически оптимальный уровень вероятности отказа на предстоящей межконтрольной наработке.

*Доступность к изделию ТО и ремонта* – свойство изделия, заключающееся в обеспечении выполнения ТО и ремонта с минимальными объемами дополнительных работ.

*Закон распределения дискретных случайных величин* – это соотношение, устанавливающее связь между возможными значениями случайной величины и соответствующими им вероятностями.

*Закон распределения непрерывной случайной величины* – это вероятность события, заключающегося в том, что случайная величина примет значение, меньшее заданного наперед.

*Изнашивание* – это процесс разрушения и отделения материала с поверхности детали и (или) увеличения ее остаточной деформации при трении, проявляющейся в постепенном изменении размеров и формы деталей.

*Интенсивность восстановления* – это условная плотность вероятности восстановления работоспособного состояния изделия, определяемая для рассматриваемого момента времени при условии, что до этого момента восстановление не было завершено.

*Интенсивность отказов* – это условная плотность вероятности возникновения отказа невозстанавливаемого изделия, определяемая для рассматриваемого момента времени при условии, что до данного момента отказ не возникал.

*Исправное состояние (исправность)* – это состояние изделия, при котором оно удовлетворяет всем требованиям нормативно-технической документации.

*Кавитационное изнашивание* – это изнашивание движущегося относительно жидкости тела, происходящее в результате ударного воздействия

захлопывающихся пузырьков воздуха вблизи поверхности, находящихся в жидкости.

*Качество машин* – это совокупность их свойств, обуславливающих удовлетворение определенных потребностей в соответствии с целевым назначением.

*Квантиль* – это значение случайной величины, соответствующее заданной вероятности, как правило, равной 0,5, 0,8, 0,9, 0,95, 0,99.

*Контролепригодность* – это свойство изделия, характеризующее приспособленность его к определению технического состояния и обнаружению отказов.

*Коррозия* – это процесс разрушения металла, происходящий вследствие агрессивного химического или электрохимического взаимодействия среды с деталью, приводящего к окислению металла и, как следствие, к уменьшению прочности и ухудшению внешнего вида.

*Коэффициент готовности* – это вероятность того, что изделие окажется работоспособным в произвольный момент времени, кроме планируемых перерывов в его работе (плановое техническое обслуживание, перерывы между рабочими сменами).

*Коэффициент оперативной готовности* – это вероятность того, что изделие окажется работоспособным в произвольный момент времени, кроме планируемых перерывов в его работе, и начиная с этого момента оно будет работать безотказно в течение заданного интервала времени.

*Коэффициент технического использования* – это отношение наработки изделия за определенный период эксплуатации к сумме наработки и времени, затраченному на техническое обслуживание, плановые ремонты и неплановое восстановление за тот же период эксплуатации.

*Легкость* – это приспособленность агрегата, сборочной единицы к замене с минимальными затратами времени и труда, а также приспособленность машины к операциям разборки – сборки.

*Медиана* – это значение случайной величины, являющееся срединным членом, при котором вероятность появления случайной величины меньшей медианы равна вероятности появления случайной величины большей медианы.

*Мода* – это значение случайной величины, соответствующее максимальной частоте или плотности распределения.

*Надежность* – это свойство изделия сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания, ремонтов, хранения и транспортирования.

*Наработка* – это продолжительность или объем работы изделия.

*Наработка гарантийная* – это наработка изделия, до завершения которой изготовитель гарантирует и обеспечивает определенное качество



изделия при условии соблюдения потребителем правил эксплуатации, в том числе правил хранения и транспортирования.

*Непрерывные случайные величины* – это величины, которые в определенном интервале могут принимать любое значение, неизвестное заранее.

*Номинальное значение параметра технического состояния* – это значение, определяемое его функциональным назначением и служащее началом отсчета отклонений.

*Изделие восстанавливаемое* – это изделие, восстановление работоспособного состояния которого предусмотрено в нормативно-технической или конструкторской документации.

*Изделие невосстанавливаемое* – это изделие, восстановление работоспособного состояния которого не предусмотрено в нормативно-технической или конструкторской документации.

*Изделие неремонтируемое* – это изделие, ремонт которого невозможен или непредусмотрен НТД или конструкторской документацией.

*Изделие ремонтируемое* – это изделие, ремонт которого возможен и предусмотрен нормативно-технической или конструкторской документацией.

*Изделие техническое* – это предмет, подлежащий расчету, анализу, испытанию и исследованию в процессе его проектирования, изготовления, применения, технического обслуживания, ремонтов, хранения и транспортирования в целях обеспечения эффективности его функционального назначения.

*Отказ* – это событие, заключающееся в нарушении работоспособности изделия.

*Отказоустойчивость* – это свойство изделия и системы его эксплуатации противостоять критическому развитию ситуации в момент и после возникновения отказа.

*Параметр потока отказов* – это скорость появления отказов (среднее количество восстановлений в единицу времени) при условии, что вышедшие из строя изделия заменяются новыми.

*Параметр технического состояния диагностический* – это физическая величина, косвенно характеризующая структурный параметр.

*Параметр технического состояния структурный* – это выходная техническая характеристика, непосредственно обуславливающая техническое состояние изделия.

*Параметр диагностический ресурсный* – это параметр, позволяющий получить информацию об остаточном ресурсе машины и о необходимости ее ремонта.

*Параметр диагностический функциональный* – это параметр, характеризующий работоспособность узлов и определяющий необходимость технического обслуживания машины.

*Пластические деформации и разрушения* – это процессы потери работоспособности изделий под воздействием нагрузок, превышающих предел (упругости) текучести.

*Плотность распределения наработки до отказа* – это отношение числа отказавших изделий за единицу времени к первоначальному их количеству при условии, что все вышедшие из строя изделия не восстанавливаются т.е. их число во время испытаний уменьшается.

*Повреждение* – это событие, заключающееся в нарушении исправности изделия при сохранении его работоспособности.

*Показатель надежности* – это величина, характеризующая одно из свойств (единичный показатель) или несколько свойств надежности (комплексный показатель).

*Предельное значение параметра* – это наибольшее или наименьшее значение параметра, которое может иметь работоспособный изделие.

*Преимственность средств ТО и контрольно-диагностического оборудования* – это возможность использования имеющихся средств, для обслуживания и ремонта новых моделей автомобилей.

*Процесс диагностирования* – это подача на диагностируемый изделие определенных воздействий (входных сигналов), многократное измерение и анализ ответных реакций (выходных сигналов) изделия на эти воздействия.

*Резервирование временное (организационное)* – это обеспечение и использование избыточного времени в случае возникновения отказа.

*Резервирование замещением* – это резервирование, при котором резервный элемент до включения его в работу находится вне системы в ненагруженном состоянии.

*Резервирование полное* – это резервирование, при котором вся техническая система резервируется другой аналогичной системой.

*Резервирование постоянное* – это резервирование, при котором все элементы находятся в одинаковом рабочем режиме.

*Резервирование раздельное* – это резервирование отдельных основных элементов системы дополнительными.

*Резервирование скользящее* – это резервирование замещением одним резервным элементом нескольких элементов основной системы.

*Резервирование структурное* – это резервирование, заключающееся во вводе избыточных одинаковых элементов в техническую систему.

*Резервирование функциональное* – это обеспечение функциональной избыточности элементов машин, в результате чего облегчается режим их нагружения с помощью применения системы ремонтных размеров, повышения производительности, мощности, запаса прочности.

*Ремонт* – это комплекс операций, предназначенный для восстановления исправности или работоспособности изделий и восстановления технического ресурса изделий или их составных частей.

*Ремонтпригодность* – это свойство изделия, заключающееся в приспособленности к поддержанию и восстановлению работоспособного состояния путем проведения технического обслуживания и ремонта.

*Ресурс гамма-процентный* – это наработка, в течение которой изделие не достигнет предельного состояния с заданной вероятностью гамма-процентов.

*Ресурс назначенный* – это суммарная наработка, при достижении которой эксплуатация изделия прекращается независимо от его технического состояния для проведения капитального ремонта или списания.

*Ресурс технический (ресурс)* – наработка изделия от начала его эксплуатации после изготовления или ремонта до предельного состояния.

*Ресурс установленный* – это значение ресурса, обусловленное конструкцией, технологией изготовления и эксплуатацией изделия.

*Система диагностирования* – это совокупность изделия и средств диагностирования, устройств их сопряжения, исполнителей и соответствующей технической документации.

*Системой с параллельным соединением элементов* называется система, отказ которой происходит только в случае отказа всех ее элементов.

*Системой с последовательным соединением элементов* называется система, в которой отказ любого элемента приводит к отказу всей системы.

*Случайная величина* – это величина, которая в результате опыта может принять то или иное значение, неизвестное заранее.

*Состояние неисправное (неисправность)* – это состояние изделия, при котором он не удовлетворяет хотя бы одному из требований нормативно-технической документации.

*Состояние неработоспособное (неработоспособность)* – это состояние изделия, при котором значение хотя бы одного параметра, характеризующего его способность выполнять заданные функции, не соответствует требованиям НТД.

*Состояние предельное* – это состояние изделия, при котором его дальнейшая эксплуатация должна быть прекращена из-за неустранимого нарушения требований к технике безопасности или неустранимого ухода заданных параметров на установленные пределы или неустранимого снижения эффективности эксплуатации ниже допустимой, т.е. состояние изделия, при достижении которого его дальнейшее применение по назначению недопустимо, невозможно или экономически нецелесообразно.

*Состояние работоспособное (работоспособность)* – это состояние изделия, при котором значения всех параметров, характеризующих его способность выполнять заданные функции, соответствуют требованиям нормативно-технической документации.

*Сохраняемость* – это свойство изделия непрерывно сохранять исправное и (или) работоспособное состояние в течение и (или) после режима ожидания, хранения и (или) транспортирования.

*Средняя наработка до отказа* – это математическое ожидание наработки изделия до первого отказа.

*Средняя наработка на отказ* – это отношение наработки восстанавливаемого изделия к математическому ожиданию числа его отказов в течение этой наработки.

*Срок службы* – это календарная продолжительность эксплуатации изделия от начала его применения до наступления предельного состояния.

*Срок сохраняемости* – это календарная продолжительность хранения или транспортирования изделия, в течение которой показатели его надежности сохраняются в пределах, заданных в нормативно-технической документации.

*Старение* – это изменение во времени физико-механических свойств под влиянием окружающей среды и условий эксплуатации.

*Схватывание* – это процесс разрушения поверхностей трения, развивающийся в результате возникновения локальных металлических связей, их деформации и разрушения с отделением частиц металла или налипанием его на поверхности контакта.

*Техническая система* – это сложное изделие, представляющее собой совокупность взаимосвязанных функционально и расположенных в определенном порядке изделий.

*Техническое обслуживание* – это комплекс операций по поддержанию работоспособности или исправности изделия при использовании его по назначению, ожидании, хранении и транспортировании.

*Трение внешнее* – это явление сопротивления относительному перемещению двух тел в зонах соприкосновения поверхностей по касательным к ним.

*Усталостное изнашивание* – это изнашивание в результате усталостного разрушения при повторном деформировании микрообъемов материала поверхностного слоя.

*Усталостные разрушения* – это вид разрушений, возникающий при циклическом приложении нагрузок, превышающих предел выносливости металла детали.

*Элемент технической системы* – это изделие, представляющее собой часть технической системы в конкретном рассматриваемом исследовании.

*Эффект Ребиндера* – это эффект адсорбционного понижения прочности твёрдых тел, облегчение деформации и разрушения твёрдых тел вследствие обратимого физико-химического воздействия среды.

## ПРИЛОЖЕНИЯ

Значения интегральной функции закона  
нормального распределения

$z$	$\Phi(z)$	$\Delta$	$z$	$\Phi(z)$	$\Delta$
-0,00	0,5000	40	-0,43	0,3336	36
-0,01	0,4960	40	-0,44	0,3300	36
-0,02	0,4920	40	-0,45	0,3264	36
-0,03	0,4880	40	-0,46	0,3228	36
-0,04	0,4840	39	-0,47	0,3192	36
-0,05	0,4801	40	-0,48	0,3156	35
-0,06	0,4761	40	-0,49	0,3121	36
-0,07	0,4721	40	-0,50	0,3085	35
-0,08	0,4681	40	-0,51	0,3050	35
-0,09	0,4641	39	-0,52	0,3015	34
-0,10	0,4602	40	-0,53	0,2981	35
-0,11	0,4562	40	-0,54	0,2946	34
-0,12	0,4522	39	-0,55	0,2912	35
-0,13	0,4483	40	-0,56	0,2877	34
-0,14	0,4443	39	-0,57	0,2843	33
-0,15	0,4404	40	-0,58	0,2810	34
-0,16	0,4364	39	-0,59	0,2776	33
-0,17	0,4325	39	-0,60	0,2743	34
-0,18	0,4286	39	-0,61	0,2709	33
-0,19	0,4247	40	-0,62	0,2676	33
-0,20	0,4207	39	-0,63	0,2643	32
-0,21	0,4168	39	-0,64	0,2611	33
-0,22	0,4129	39	-0,65	0,2578	32
-0,23	0,4090	38	-0,66	0,2546	32
-0,24	0,4052	39	-0,67	0,2514	31
-0,25	0,4013	39	-0,68	0,2483	32
-0,26	0,3974	38	-0,69	0,2451	31
-0,27	0,3936	39	-0,70	0,2420	31
-0,28	0,3897	38	-0,71	0,2389	31
-0,29	0,3859	38	-0,72	0,2358	31
-0,30	0,3821	38	-0,73	0,2327	30
-0,31	0,3783	38	-0,74	0,2297	31
-0,32	0,3745	38	-0,75	0,2266	30
-0,33	0,3707	38	-0,76	0,2236	30
-0,34	0,3669	37	-0,77	0,2206	29
-0,35	0,3632	38	-0,78	0,2177	29
-0,36	0,3594	37	-0,79	0,2148	29
-0,37	0,3557	37	-0,80	0,2119	29
-0,38	0,3520	37	-0,81	0,2090	29
-0,39	0,3483	37	-0,82	0,2061	28
-0,40	0,3446	37	-0,83	0,2033	28
-0,41	0,3409	37	-0,84	0,2005	28
-0,42	0,3372	36	-0,85	0,1977	28

Продолжение прил. 1

$z$	$\Phi(z)$	$\Delta$	$z$	$\Phi(z)$	$\Delta$
-0,86	0,1949	27	-1,35	0,0885	16
-0,87	0,1922	25	-1,36	0,0869	16
-0,88	0,1894	23	-1,37	0,0853	15
-0,89	0,1867	26	-1,38	0,0838	15
-0,90	0,1841	27	-1,39	0,0823	15
-0,91	0,1814	26	-1,40	0,0808	15
-0,92	0,1788	26	-1,41	0,0793	15
-0,93	0,1762	26	-1,42	0,0778	14
-0,94	0,1736	25	-1,43	0,0764	15
-0,95	0,1711	26	-1,44	0,0749	14
-0,96	0,1685	25	-1,45	0,0735	14
-0,97	0,1660	25	-1,46	0,0721	13
-0,98	0,1635	24	-1,47	0,0708	14
-0,99	0,1611	24	-1,48	0,0694	13
-1,00	0,1587	24	-1,49	0,0681	13
-1,01	0,1563	24	-1,50	0,0668	13
-1,02	0,1539	24	-1,51	0,0655	12
-1,03	0,1515	23	-1,52	0,0643	13
-1,04	0,1492	23	-1,53	0,0630	12
-1,05	0,1469	23	-1,54	0,0618	12
-1,08	0,1446	23	-1,55	0,0606	12
-1,07	0,1423	22	-1,56	0,0594	12
-1,08	0,1401	22	-1,57	0,0582	11
-1,09	0,1379	22	-1,58	0,0571	13
-1,10	0,1357	22	-1,59	0,0559	11
-1,11	0,1335	21	-1,60	0,0548	11
-1,12	0,1314	22	-1,61	0,0537	11
-1,13	0,1292	21	-1,62	0,0526	10
-1,14	0,1271	20	-1,63	0,0516	11
-1,15	0,1251	21	-1,64	0,0505	10
-1,16	0,1230	20	-1,65	0,0495	10
-1,17	0,1210	20	-1,66	0,0485	10
-1,18	0,1190	20	-1,67	0,0475	10
-1,19	0,1170	19	-1,68	0,0465	10
-1,20	0,1151	20	-1,69	0,0455	9
-1,21	0,1131	19	-1,70	0,0446	10
-1,22	0,1112	19	-1,71	0,0436	9
-1,23	0,1093	18	-1,72	0,0427	9
-1,24	0,1075	18	-1,73	0,0418	8
-1,25	0,1056	19	-1,74	0,0409	8
-1,26	0,1038	18	-1,75	0,0401	8
-1,27	0,1020	17	-1,76	0,0392	8
-1,28	0,1003	18	-1,77	0,0384	8
-1,29	0,0985	17	-1,78	0,0375	8
-1,30	0,0968	17	-1,79	0,0367	8
-1,31	0,0951	17	-1,80	0,0359	8
-1,32	0,0934	16	-1,81	0,0351	7
-1,33	0,0918	17	-1,82	0,0344	8
-1,34	0,0901	16	-1,83	0,0336	7

Продолжение прил. 1

$z$	$\Phi(z)$	$\Delta$	$z$	$\Phi(z)$	$\Delta$
-1.84	0,0329	7	0,13	0,5517	40
-1.85	0,0322	8	0,14	0,5557	39
-1.86	0,0314	7	0,15	0,5596	40
-1.87	0,0307	6	0,16	0,5636	39
-1.88	0,0301	7	0,17	0,5675	39
-1.89	0,0294	6	0,18	0,5714	39
-1.90	0,0288	7	0,19	0,5753	40
-1.91	0,0281	7	0,20	0,5793	39
-1.92	0,0274	6	0,21	0,5832	39
-1.93	0,0268	6	0,22	0,5871	39
-1.94	0,0262	6	0,23	0,5910	38
-1.95	0,0256	6	0,24	0,5948	39
-1.96	0,0250	6	0,25	0,5987	39
-1.97	0,0244	5	0,26	0,6026	38
-1.98	0,0239	6	0,27	0,6064	39
-1.99	0,0233	5	0,28	0,6103	38
-2,00	0,0228	49	0,29	0,6141	38
-2.10	0,0179	40	0,30	0,6179	38
-2.20	0,0139	32	0,31	0,6217	38
-2.30	0,0107	25	0,32	0,6255	38
-2.40	0,0082	20	0,33	0,6293	38
-2.50	0,0062	15	0,34	0,6331	37
-2.60	0,0047	12	0,35	0,6368	38
-2.70	0,0035	9	0,36	0,6406	37
-2.80	0,0026	7	0,37	0,6443	37
-2.90	0,0019	5	0,38	0,6480	37
-3,00	0,0014	4	0,39	0,6517	37
-3.10	0,0010	3	0,40	0,6554	37
-3.20	0,0007	2	0,41	0,6591	37
-3.30	0,0005	2	0,42	0,6628	36
-3.40	0,0003	1	0,43	0,6664	36
-3.50	0,0002	0	0,44	0,6700	36
-3.60	0,0002	1	0,45	0,6736	36
-3.70	0,0001	0	0,46	0,6772	36
-3.80	0,0001	1	0,47	0,6808	36
-3.90	0,0000	1	0,48	0,6844	35
0,00	0,5000	40	0,49	0,6879	36
0,01	0,5040	40	0,50	0,6915	35
0,02	0,5080	40	0,51	0,6950	35
0,03	0,5120	40	0,52	0,6985	34
0,04	0,5160	39	0,53	0,7019	35
0,05	0,5199	40	0,54	0,7054	34
0,06	0,5239	40	0,55	0,7088	35
0,07	0,5279	40	0,56	0,7123	34
0,08	0,5319	40	0,57	0,7157	33
0,09	0,5359	39	0,58	0,7190	34
0,10	0,5398	40	0,59	0,7224	33
0,11	0,5438	40	0,60	0,7257	33
0,12	0,5478	39	0,61	0,7291	33



Продолжение прил. 1

$z$	$\Phi(z)$	$\Delta$	$z$	$\Phi(z)$	$\Delta$
0,62	0,7324	33	1.11	0,8665	21
0,63	0,7357	32	1.12	0,8686	22
0,64	0,7389	33	1.13	0,8708	21
0,65	0,7422	32	1.14	0,8729	20
0,65	0,7454	32	1.15	0,8749	21
0,67	0,7486	31	1.16	0,8770	20
0,68	0,7517	32	1.17	0,8790	20
0,69	0,7549	31	1.18	0,8810	20
0,70	0,7580	31	1.19	0,8830	19
0,71	0,7611	31	1.20	0,8849	21
0,72	0,7642	31	1.21	0,8869	19
0,73	0,7673	30	1.22	0,8888	19
0,74	0,7703	31	1.23	0,8907	18
0,75	0,7734	30	1.24	0,8925	19
0,76	0,7764	30	1.25	0,8944	18
0,77	0,7794	29	1.26	0,8962	18
0,78	0,7823	29	1.27	0,8980	17
0,79	0,7852	29	1.28	0,8997	18
0,80	0,7881	29	1.29	0,9015	17
0,81	0,7910	29	1.30	0,9032	17
0,82	0,7939	28	1.31	0,9049	17
0,83	0,7967	28	1.32	0,9066	16
0,84	0,7995	28	1.33	0,9082	17
0,85	0,8023	28	1.34	0,9099	16
0,86	0,8051	27	1.35	0,9115	16
0,87	0,8078	28	1.36	0,9131	16
0,88	0,8106	27	1.37	0,9147	15
0,89	0,8133	26	1.38	0,9162	15
0,90	0,8159	27	1.39	0,9177	15
0,91	0,8186	26	1.40	0,9192	15
0,92	0,8212	26	1.41	0,9207	15
0,93	0,8238	26	1.42	0,9222	14
0,94	0,8264	25	1.43	0,9236	15
0,95	0,8289	26	1.44	0,9251	14
0,96	0,8315	25	1.45	0,9265	14
0,97	0,8340	25	1.46	0,9279	13
0,98	0,8365	24	1.47	0,9292	14
0,99	0,8389	21	1.48	0,9306	13
1,00	0,8413	24	1.49	0,9319	13
1,01	0,8437	24	1.50	0,9332	13
1,02	0,8461	24	1.51	0,9345	12
1,03	0,8485	23	1.52	0,9357	13
1,04	0,8508	23	1.53	0,9370	12
1,05	0,8531	23	1.54	0,9382	12
1,06	0,8554	23	1.55	0,9394	12
1,07	0,8577	22	1.56	0,9406	12
1,08	0,8599	22	1.57	0,9418	11
1,09	0,8621	22	1.58	0,9429	12
1.10	0,8643	22	1.59	0,9441	11

## Окончание прил. 1

<b>z</b>	<b>Φ(z)</b>	<b>Δ</b>	<b>z</b>	<b>Φ(z)</b>	<b>Δ</b>
1.60	0,9452	11	1.90	0,9713	6
1.61	0,9463	11	1.91	0,9719	7
1,02	0,9474	10	1.92	0,9726	6
1.63	0,9484	11	1.93	0,9732	6
1.64	0,9495	10	1.94	0,9738	6
1.65	0,9505	10	1.96	0,9744	6
1.66	0,9515	10	1.96	0,9750	6
1.67	0,9525	10	1.97	0,9756	5
1.68	0,9538	10	1.98	0,9761	6
1.69	0,9545	9	1.99	0,9767	5
1.70	0,9554	10	2,00	0,9772	49
1.71	0,9564	9	2.10	0,9821	40
1.72	0,9573	9	2.20	0,9861	32
1.73	0,9582	9	2.30	0,9893	25
1.74	0,9591	8	2.40	0,9918	20
1.75	0,9599	9	2.50	0,9938	15
1.76	0,9608	8	2.60	0,9953	12
1.77	0,9616	9	2.70	0,9965	9
1.78	0,9625	8	2.80	0,9974	7
1.79	0,9633	8	2.90	0,9981	5
1.80	0,9641	8	3,00	0 9986	4
1.81	0,9649	7	3.10	0,9990	3
1.82	0,9656	8	3.20	0,9993	2
1.83	0,9664	7	3.30	0,9995	2
1.84	0,9671	7	3.40	0,9997	1
1.85	0,9678	8	3.50	0,9998	0
1.86	0,9686	7	3.60	0,9998	1
1.87	0,9693	6	3.70	0,9999	0
1.88	0,9699	7	3.80	0,9999	1
1.89	0,9706	7	3.90	1,0000	0

Приложение 2

Значения коэффициента Стьюдента  $t_6$

N	$\alpha$			N	$\alpha$		
	0,95	0,99	0,999		0,95	0,99	0,999
5	2.73	4.60	8.61	20	2,093	2.861	3.883
6	2.57	4,03	6.86	25	2,064	2.797	3.745
7	2.45	3.71	5.96	30	2,045	2.756	3.659
8	2.37	3.50	5.41	35	2,032	2.720	3.600
9	2.31	3.36	5,04	40	2,023	2.708	3.558
10	2.26	3.25	4.78	45	2,016	2.692	3.527
11	2.23	3.17	4.59	50	2,009	2.679	3.502
12	2.20	3.11	4.44	60	2,001	2.662	3.464
13	2.18	3,06	4.32	70	1.996	2.649	3.439
14	2.16	3,01	4.22	80	1.991	2.640	3.418
15	2.15	2.98	4.14	90	1.987	2.633	3.403
16	2.13	2.95	4,07	100	1.984	2.627	3.392
17	2.12	2.92	4,02	120	1.980	2.617	3.374
18	2.11	2.90	3.97	$\infty$	1.960	2.576	3.291

Приложение 3

Значение функции  $f(t) = \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi}} e^{-\frac{t^2}{2}}$

$t = \frac{T_{ci} - T_{cp}}{\sigma}$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0,0	0,3989	0,3989	0,3989	0,3988	0,3986	0,3984	0,3982	0,3980	0,3977	0,3973
0,1	0,3970	0,3965	0,3961	0,3956	0,3951	0,3945	0,3939	0,3932	0,3925	0,3918
0,2	0,3910	0,3002	0,3894	0,3835	0,3876	0,3467	0,3857	0,3847	0,3836	0,3825
0,3	0,3811	0,3802	0,3790	0,3778	0,3763	0,3752	0,3739	0,3726	0,3712	0,3697
0,4	0,3683	0,3663	0,3653	0,3637	0,3621	0,3605	0,3589	0,3572	0,3555	0,3588
0,5	0,3521	0,3503	0,3485	0,3487	0,3448	0,3429	0,3410	0,3391	0,3372	0,3352
0,6	0,3332	0,3312	0,3292	0,3271	0,3251	0,3230	0,3209	0,3187	0,3166	0,3144
0,7	0,3123	0,3101	0,3079	0,3036	0,3034	0,3011	0,2989	0,2966	0,2943	0,2920
0,8	0,2897	0,2874	0,2330	0,2827	0,2803	0,2780	0,2736	0,2732	0,2709	0,2685
0,9	0,2661	0,2637	0,2613	0,2389	0,2563	0,2541	0,2516	0,2492	0,2468	0,2444
1,0	0,2120	0,2396	0,2371	0,2347	0,2323	0,2299	0,2275	0,2251	0,2227	0,2203
1,1	0,2179	0,2155	0,2131	0,2107	0,2083	0,2059	0,2036	0,2012	0,1989	0,1965
1,2	0,1942	0,1919	0,1895	0,1872	0,1849	0,1825	0,1804	0,1781	0,1758	0,1736
1,3	0,1714	0,1691	0,1669	0,1647	0,1625	0,1601	0,1582	0,1561	0,1539	0,1518
1,4	0,1437	0,1476	0,1450	0,1435	0,1415	0,1394	0,1374	0,1354	0,1334	0,1315
1,5	0,1295	0,1276	0,1207	0,1238	0,1219	0,1200	0,1182	0,1163	0,1145	0,1127
1,6	0,1109	0,1092	0,1074	0,1057	0,1010	0,1023	0,1006	0,0989	0,0973	0,0957
1,7	0,0940	0,0925	0,0909	0,0893	0,0878	0,0863	0,0848	0,0833	0,0818	0,0401
1,8	0,0790	0,0775	0,0701	0,0748	0,0734	0,0721	0,0707	0,0691	0,0681	0,0669
1,9	0,0656	0,0844	0,0632	0,0620	0,0608	0,0596	0,0584	0,0573	0,0502	0,0551
2,0	0,0510	0,0529	0,0519	0,0508	0,0498	0,0188	0,0478	0,0468	0,0459	0,0449
2,1	0,0440	0,0431	0,0122	0,0413	0,0404	0,0396	0,0333	0,0379	0,0371	0,0363
2,2	0,0355	0,0347	0,0339	0,0332	0,0325	0,0317	0,0310	0,0303	0,0297	0,0390
2,3	0,0283	0,0277	0,0270	0,0264	0,0258	0,0222	0,0216	0,0241	0,1235	0,0329
2,4	0,0224	0,0219	0,0213	0,0208	0,0203	0,0198	0,0194	0,0189	0,0184	0,0180
2,5	0,0175	0,0171	0,0167	0,0163	0,0158	0,0154	0,0151	0,0147	0,0143	0,0139
2,6	0,0130	0,0132	0,0129	0,0126	0,0122	0,0119	0,0116	0,0113	0,0110	0,0107
2,7	0,0104	0,0101	0,0099	0,0096	0,0093	0,0091	0,0088	0,0085	0,0084	0,0081
2,8	0,0079	0,0077	0,0075	0,0073	0,0071	0,0069	0,0067	0,0065	0,0063	0,0061
2,9	0,0060	0,0058	0,0066	0,0055	0,0053	0,0051	0,0050	0,0048	0,0047	0,0040
3,0	0,0044	0,0013	0,0042	0,0040	0,0039	0,0038	0,0037	0,0036	0,0035	0,0034
3,1	0,0033	0,0032	0,0031	0,0030	0,0029	0,0028	0,0027	0,0026	0,0025	0,0025
3,2	0,0024	0,0023	0,0022	0,0022	0,0021	0,0020	0,0020	0,0019	0,0018	0,0018
3,3	0,0017	0,0017	0,0016	0,0016	0,0015	0,0015	0,0014	0,0014	0,0013	0,0013
3,4	0,0012	0,0012	0,0012	0,0011	0,0011	0,0010	0,0010	0,0010	0,0009	0,0009
3,5	0,0009	0,0008	0,0008	0,0008	0,0008	0,0007	0,0007	0,0007	0,0007	0,0006
3,6	0,0006	0,0006	0,0006	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0004
3,7	0,0004	0,0004	0,0004	0,0004	0,0004	0,0004	0,0003	0,0003	0,0003	0,0003
3,8	0,0003	0,0003	0,0003	0,0003	0,0003	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002

Приложение 4

Квантили  $H_k[(1\pm\theta)/2]$  закона распределения Вейбулла

$(1\pm\alpha)/2$	$b$							
	1,0	1.2	1.4	1.6	1.8	2,0	2.5	3,00
0,01	0,010	0,022	0,037	0,056	0,078	0,100	0,159	0,216
0,02	0,020	0,039	0,062	0,087	0,114	0,143	0,210	0,272
0,05	0,051	0,084	0,120	0,156	0,192	0,226	0,305	0,372
0,07	0,073	0,112	0,154	0,194	0,233	0,269	0,350	0,417
0,10	0,105	0,153	0,200	0,245	0,286	0,325	0,407	0,472
0,15	0,174	0,232	0,285	0,332	0,380	0,419	0,498	0,558
0,20	0,223	0,287	0,343	0,392	0,435	0,472	0,549	0,607
0,30	0,357	0,424	0,479	0,525	0,564	0,597	0,662	0,709
0,40	0,511	0,571	0,619	0,657	0,688	0,715	0,764	0,799
0,50	0,693	0,737	0,770	0,795	0,816	0,833	0,864	0,885
0,60	0,916	0,930	0,939	0,947	0,953	0,957	0,966	0,971
0,70	1.200	1.170	1.140	1.120	1.110	1.100	1,080	1,060
0,80	1.610	1.490	1.410	1.350	1.300	1.270	1.210	1.170
0,90	2.300	2,000	1.810	1.680	1.590	1.520	1.400	1.320
0,93	2.660	2.260	2,010	1.840	1.720	1.630	1.480	1.390
0,95	3,000	2.490	2.190	1.990	1.840	1.730	1.550	1.440
0,98	3.910	3.120	2.650	2.350	2.130	1.980	1.730	1.580
0,99	4.600	3.570	2.980	2.600	2.340	2.150	1.840	1.660

Приложение 5

Значения  $P(\lambda)$  критерия Колмогорова

$\lambda$	$P(\lambda)$	$\lambda$	$P(\lambda)$	$\lambda$	$P(\lambda)$
0,30	1,0000	0,75	0,6272	1.60	0,0120
0,35	0,9997	0,80	0,5441	1.70	0,0062
0,40	0,9972	0,85	0,4653	1.80	0,0032
0,45	0,9874	0,90	0,3927	1.90	0,0015
0,50	0,9639	0,95	0,3275	2,00	0,0007
0,55	0,9228	1,00	0,2700	2.10	0,0003
0,58	0,8896	1.10	0,1777	2.20	0,0001
0,60	0,8643	1.20	0,1122	2.30	0,0001
0,64	0,8073	1.30	0,0681	2.40	0,0000
0,65	0,7920	1.40	0,0397	2.50	0,0000
0,70	0,7112	1.50	0,0222		

Приложение 6

Значение критерия Ирвина

N	$\alpha=0,95$	$\alpha=0,99$	N	$\alpha=0,95$	$\alpha=0,99$	N	$\alpha=0,95$	$\alpha=0,99$	N	$\alpha=0,95$	$\alpha=0,99$
2	2.8	3.7	10	1.5	2,0	30	1.2	1.7	100	1,0	1.5
3	2.2	2.9	20	1.3	1.8	50	1.1	1.6	400	0,9	1.3

## Приложение 7

Вероятность совпадения  $P(\chi^2)$  по критерию согласия  $\chi^2$

$r$	$P$							
	0,95	0,90	0,80	0,70	0,50	0,30	0,20	0,10
1	0,00	0,02	0,06	0,15	0,45	1,07	1,64	2,71
2	0,10	0,21	0,45	0,71	1,39	2,41	3,22	4,60
3	0,35	0,58	1,00	1,42	2,37	3,66	4,64	6,25
4	0,71	1,06	1,65	2,20	3,36	4,88	5,99	7,78
5	1,14	1,61	2,34	3,00	4,35	6,06	7,29	9,24
6	1,64	2,20	3,07	3,83	5,35	7,23	8,56	10,6
7	2,17	2,83	3,82	4,67	6,34	8,38	9,80	12,0
8	2,73	3,49	4,59	5,53	7,34	9,52	11,0	13,4
9	3,32	4,17	5,38	6,39	8,34	10,7	12,2	14,7
10	3,94	4,86	6,18	7,27	9,34	11,8	13,4	16,0

## Приложение 8

Коэффициенты  $t_\alpha$ .  $r_1$ .  $r_3$

$\alpha$	0,80			0,90			0,95			0,99		
	$t_\alpha$	$r_1$	$r_3$	$t_\alpha$	$r_1$	$r_3$	$t_\alpha$	$r_1$	$r_3$	$t_\alpha$	$r_1$	$r_3$
3	1.89	1.95	0,70	2.92	2.73	0,57	4.30	3.66	0,48	9.92	6.88	0,36
4	1.64	1.74	0,73	2.35	2.29	0,60	3.18	2.93	0,52	5.84	4.85	0,40
5	1.53	1.62	0,75	2.13	2,05	0,62	2.78	2.54	0,55	4.60	3.91	0,43
6	1.48	1.54	0,76	2,02	1.90	0,65	2.57	2.29	0,57	4,03	3.36	0,46
7	1.44	1.48	0,77	1.94	1.80	0,67	2.45	2.13	0,59	3.71	3,00	0,48
8	1.42	1.43	0,78	1.90	1.72	0,68	2.36	2,01	0,61	3.50	2.75	0,50
9	1.40	1.40	0,79	1.86	1.66	0,69	2.31	1.91	0,63	3.36	2.56	0,52
10	1.38	1.37	0,80	1.83	1.61	0,70	2.26	1.83	0,64	3.25	2.42	0,53
11	1.37	1.35	0,80	1.81	1.57	0,70	2.23	1.78	0,64	3.17	2.31	0,54
12	1.36	1.33	0,81	1.80	1.53	0,71	2.20	1.73	0,65	3.11	2.21	0,56
13	1.36	1.31	0,81	1.78	1.50	0,73	2.18	1.69	0,66	3,06	2.13	0,57
14	1.35	1.29	0,83	1.77	1.48	0,74	2.16	1.65	0,67	3,01	2,06	0,58
15	1.34	1.28	0,83	1.76	1.46	0,74	2.15	1.62	0,68	2.98	2,01	0,59
20	1.33	1.24	0,85	1.73	1.37	0,77	2,09	1.51	0,72	2.85	1.81	0,63
25	1.32	1.21	0,86	1.71	1.33	0,79	2,06	1.44	0,74	2.80	1.68	0,66
30	1.31	1.18	0,87	1.70	1.29	0,80	2,04	1.39	0,76	2.75	1.60	0,68
40	1.30	1.16	0,88	1.68	1.24	0,83	2,02	1.32	0,78	2.71	1.50	0,71
50	1.30	1.14	0,89	1.68	1.21	0,84	2,01	1.28	0,80	2.68	1.43	0,74
60	1.30	1.12	0,90	1.67	1.19	0,86	2,00	1.25	0,82	2.66	1.98	0,76
80	1.29	1.10	0,91	1.66	1.16	0,87	1.99	1.21	0,84	2.64	1.32	0,78
100	1.29	1,09	0,92	1.66	1.14	0,88	1.98	1.19	0,86	2.63	1.28	0,80

Значения функции  $e^{-x}$

$X$	$e^{-X}$	$\Delta$	$X$	$e^{-X}$	$\Delta$	$X$	$e^{-X}$	$\Delta$	$X$	$e^{-X}$	$\Delta$
0,00	1,000	10	0,40	0,670	7	0,80	0,449	4	3,00	0,050	5
0,01	0,990	10	0,41	0,664	7	0,81	0,445	5	3,10	0,045	4
0,02	0,980	10	0,42	0,657	7	0,82	0,440	4	3,20	0,041	4
0,03	0,970	9	0,43	0,650	6	0,83	0,436	4	3,30	0,037	4
0,04	0,961	10	0,44	0,644	6	0,84	0,432	5	3,40	0,033	3
0,05	0,951	9	0,45	0,638	7	0,85	0,427	4	3,50	0,030	3
0,06	0,942	9	0,46	0,631	6	0,86	0,423	4	3,60	0,027	2
0,07	0,932	9	0,47	0,625	6	0,87	0,419	4	3,70	0,025	3
0,08	0,923	9	0,48	0,619	6	0,88	0,415	4	3,80	0,022	2
0,09	0,914	9	0,49	0,613	7	0,89	0,411	4	3,90	0,020	2
0,10	0,905	9	0,50	0,606	6	0,90	0,407	4	4,00	0,0183	17
0,11	0,896	9	0,51	0,600	5	0,91	0,403	4	4,10	0,0166	16
0,12	0,887	9	0,52	0,595	6	0,92	0,399	4	4,20	0,0150	14
0,13	0,878	9	0,53	0,589	6	0,93	0,395	4	4,30	0,0136	13
0,14	0,869	8	0,54	0,583	6	0,94	0,391	4	4,40	0,0123	12
0,15	0,861	9	0,55	0,577	6	0,95	0,387	4	4,50	0,0111	10
0,16	0,852	8	0,56	0,571	6	0,96	0,383	4	4,60	0,0101	10
0,17	0,844	9	0,57	0,565	5	0,97	0,379	4	4,70	0,0091	9
0,18	0,835	8	0,58	0,560	6	0,98	0,375	3	4,80	0,0082	8
0,19	0,827	8	0,59	0,554	5	0,99	0,372	4	4,90	0,0074	7
0,20	0,819	8	0,60	0,549	6	1,00	0,368	35	5,00	0,0067	6
0,21	0,811	8	0,61	0,543	5	1,10	0,333	31	5,10	0,0061	6
0,22	0,803	8	0,62	0,538	5	1,20	0,302	29	5,20	0,0055	5
0,23	0,795	8	0,63	0,533	6	1,30	0,273	26	5,30	0,0050	5
0,24	0,787	8	0,64	0,527	5	1,40	0,247	24	5,40	0,0045	4
0,25	0,779	8	0,65	0,522	5	1,50	0,223	21	5,50	0,0041	4
0,26	0,771	8	0,66	0,517	5	1,60	0,202	19	5,60	0,0037	4
0,27	0,763	7	0,67	0,512	5	1,70	0,183	18	5,70	0,0033	3
0,28	0,756	8	0,68	0,507	5	1,80	0,165	15	5,80	0,0030	3
0,29	0,748	7	0,69	0,502	5	1,90	0,150	15	5,90	0,0027	2
0,30	0,741	8	0,70	0,497	5	2,00	0,135	13	6,00	0,0025	3
0,31	0,733	7	0,71	0,492	5	2,10	0,122	11	6,10	0,0022	2
0,32	0,726	7	0,72	0,487	5	2,20	0,111	11	6,20	0,0020	2
0,33	0,719	7	0,73	0,482	5	2,30	0,100	9	6,30	0,0018	1
0,34	0,712	7	0,74	0,477	5	2,40	0,091	9	6,40	0,0017	2
0,35	0,705	7	0,75	0,472	5	2,50	0,082	9	6,50	0,0015	1
0,36	0,698	7	0,76	0,468	5	2,60	0,074	9	6,60	0,0014	2
0,37	0,691	7	0,77	0,463	5	2,70	0,067	9	6,70	0,0012	1
0,38	0,684	7	0,78	0,458	4	2,80	0,061	9	6,80	0,0011	1
0,39	0,677	7	0,79	0,454	5	2,90	0,055	9	6,90	0,0010	1
0,40	0,670	7	0,80	0,449	5	3,00	0,050	9	7,00	0,0009	1

Приложение 10

Значение вероятности  $P_m$  закона Пуассона

$m$	$a=0,1$	$a=0,2$	$a=0,3$	$a=0,4$	$a=0,5$	$a=0,6$	$a=0,7$	$a=0,8$	$a=0,9$
0	0,9048	0,8187	0,7403	0,6703	0,6065	0,5488	0,4966	0,4493	0,4066
1	0,0995	0,1638	0,2222	0,2681	0,3033	0,3293	0,3476	0,3595	0,3659
2	0,0045	0,0164	0,0333	0,0536	0,0758	0,0988	0,1217	0,1438	0,1647
3	0,0002	0,0019	0,0033	0,0072	0,0126	0,0198	0,0284	0,0383	0,0494
4		0,0001	0,0002	0,0007	0,00316	0,0030	0,0050	0,0077	0,0111
5				0,0001	0,0002	0,0004	0,0007	0,0012	0,0020
6							0,0001	0,0002	0,0003

Продолжение прил. 10

$m$	$a=1$	$a=2$	$a=3$	$a=4$	$a=5$	$a=6$	$a=7$	$a=8$	$a=9$	$a=10$
0	0,3679	0,1353	0,0498	0,0183	0,0087	0,0025	0,0009	0,0003	0,0001	0,0000
1	0,3679	0,2707	0,1494	0,0733	0,0337	0,0149	0,0064	0,0027	0,0011	0,0005
2	0,1839	0,2707	0,2240	0,1465	0,0842	0,0416	0,0223	0,0107	0,0050	0,0023
3	0,0613	0,1804	0,2240	0,1954	0,1404	0,0892	0,0521	0,0286	0,0150	0,0076
4	0,0153	0,0902	0,1680	0,1954	0,1755	0,1339	0,0912	0,0572	0,0337	0,0189
5	0,0031	0,0361	0,1008	0,1563	0,1755	0,1606	0,1277	0,0916	0,0607	0,0378
6	0,0050	0,0120	0,0504	0,1042	0,1462	0,1606	0,1490	0,1221	0,0911	0,0631
7	0,0001	0,0037	0,0216	0,0595	0,1044	0,1377	0,1490	0,1396	0,1171	0,0901
8	–	0,0009	0,0081	0,0298	0,0655	0,1033	0,1304	0,1396	0,1318	0,1126
9	–	0,0002	0,0027	0,0132	0,0363	0,0688	0,1014	0,1241	0,1318	0,1251
10	–	–	0,0008	0,0053	0,0181	0,0413	0,0710	0,0993	0,1186	0,1251
11	–	–	0,0002	0,0019	0,0082	0,0225	0,0452	0,0722	0,0970	0,1137
12	–	–	0,0001	0,0006	0,0034	0,0126	0,0263	0,0481	0,0728	0,0948
13	–	–	–	0,0002	0,0013	0,0052	0,0142	0,0296	0,0504	0,0729
14	–	–	–	0,0001	0,0005	0,0022	0,0071	0,0169	0,0324	0,0521
15	–	–	–	–	0,0002	0,0009	0,0033	0,0090	0,0194	0,0347
16	–	–	–	–	–	0,0003	0,0014	0,0045	0,0109	0,0217
17	–	–	–	–	–	0,0001	0,0006	0,0021	0,0058	0,0128
18	–	–	–	–	–	–	0,0002	0,0009	0,0029	0,0071
19	–	–	–	–	–	–	0,0001	0,0004	0,0014	0,0037
20	–	–	–	–	–	–	–	0,0002	0,0006	0,0019
21	–	–	–	–	–	–	–	0,0001	0,0003	0,0009
22	–	–	–	–	–	–	–	–	0,0001	0,0004
23	–	–	–	–	–	–	–	–	–	0,0002
24	–	–	–	–	–	–	–	–	–	0,0001



Функция распределения  $F(T)$  закона распределения Вейбулла

$\frac{T - T_{cm}}{a}$	$b$								
	1,0	1.2	1.4	1.6	1.8	2,0	2.5	3,0	3.5
0,1	0,095	0,061	0,039	0,025	0,016	0,010	0,003	0,001	0,000
0,2	0,181	0,135	0,100	0,073	0,054	0,039	0,018	0,008	0,004
0,3	0,259	0,210	0,169	0,136	0,108	0,086	0,048	0,027	0,015
0,4	0,330	0,283	0,242	0,206	0,175	0,148	0,096	0,062	0,040
0,5	0,393	0,353	0,315	0,281	0,250	0,221	0,162	0,117	0,085
0,6	0,451	0,418	0,387	0,357	0,329	0,302	0,243	0,194	0,154
0,7	0,503	0,479	0,455	0,432	0,409	0,387	0,836	0,290	0,249
0,8	0,551	0,535	0,519	0,503	0,488	0,473	0,436	0,401	0,367
0,9	0,593	0,586	0,578	0,570	0,563	0,555	0,536	0,518	0,499
1,0	0,632	0,632	0,632	0,632	0,632	0,632	0,632	0,632	0,632
1.1	0,667	0,674	0,681	0,688	0,695	0,702	0,719	0,736	0,752
1.2	0,699	0,712	0,725	0,738	0,750	0,763	0,793	0,822	0,850
1.3	0,727	0,746	0,764	0,782	0,799	0,815	0,854	0,889	0,918
1.4	0,753	0,776	0,798	0,820	0,840	0,859	0,902	0,936	0,961
1.5	0,777	0,803	0,829	0,852	0,874	0,895	0,936	0,966	0,984
1.6	0,798	0,828	0,855	0,880	0,903	0,923	0,961	0,983	0,994
1.7	0,817	0,849	0,878	0,903	0,926	0,944	0,977	0,993	0,998
1.8	0,835	0,868	0,897	0,923	0,944	0,961	0,987	0,997	–
1.9	0,850	0,885	0,914	0,939	0,958	0,973	0,993	0,999	–
2,0	0,865	0,899	0,929	0,952	0,969	0,982	0,996	–	–
2.1	0,877	0,912	0,941	0,962	0,978	0,988	0,998	–	–
2.2	0,889	0,924	0,951	0,971	0,984	0,992	0,999	–	–
2.3	0,900	0,934	0,960	0,977	0,989	0,995	–	–	–
2.4	0,909	0,943	0,967	0,983	0,992	0,997	–	–	–
2.5	0,918	0,950	0,973	0,987	0,994	0,998	–	–	–

Приложение 12

Параметры и коэффициенты закона распределения Вейбулла

<i>V</i>	<i>b</i>	<i>Kb</i>	<i>Cb</i>	<i>V</i>	<i>b</i>	<i>Kb</i>	<i>Cb</i>
1,261	0,800	1,133	1,428	0,633	1,620	0,896	0,567
1,227	0,820	1,114	1,367	0,626	1,640	0,895	0,560
1,196	0,840	1,096	1,311	0,619	1,630	0,894	0,553
1,167	0,860	1,080	1,261	0,612	1,680	0,893	0,546
1,139	0,880	1,066	1,214	0,605	1,700	0,892	0,540
1,113	0,900	1,052	1,171	0,599	1,720	0,892	0,534
1,088	0,920	1,040	1,132	0,593	1,740	0,891	0,528
1,064	0,940	1,029	1,095	0,587	1,760	0,890	0,522
1,042	0,960	1,018	1,061	0,581	1,780	0,890	0,517
1,020	0,980	1,009	1,029	0,575	1,800	0,889	0,511
1,000	1,000	1,000	1,000	0,569	1,820	0,889	0,506
0,962	1,040	0,984	0,947	0,564	1,840	0,888	0,501
0,927	1,080	0,971	0,900	0,558	1,860	0,888	0,496
0,894	1,120	0,959	0,858	0,553	1,880	0,888	0,491
0,865	1,160	0,949	0,821	0,547	1,900	0,887	0,486
0,837	1,200	0,941	0,787	0,542	1,920	0,887	0,481
0,811	1,240	0,933	0,757	0,537	1,940	0,887	0,476
0,787	1,280	0,926	0,729	0,532	1,960	0,887	0,472
0,765	1,320	0,921	0,704	0,527	1,980	0,886	0,468
0,744	1,360	0,916	0,681	0,523	2,000	0,886	0,463
0,724	1,400	0,911	0,660	0,518	2,020	0,886	0,459
0,714	1,420	0,909	0,650	0,513	2,040	0,886	0,455
0,705	1,440	0,908	0,640	0,509	2,060	0,886	0,451
0,696	1,460	0,906	0,631	0,505	2,080	0,886	0,447
0,687	1,480	0,904	0,622	0,500	2,100	0,886	0,443
0,679	1,500	0,903	0,613	0,496	2,120	0,886	0,439
0,671	1,520	0,901	0,605	0,492	2,140	0,886	0,436
0,663	1,540	0,900	0,597	0,488	2,160	0,886	0,432
0,655	1,560	0,899	0,589	0,484	2,180	0,886	0,428
0,647	1,580	0,898	0,581	0,480	2,200	0,886	0,425
0,640	1,600	0,897	0,574	0,476	2,220	0,886	0,421
0,472	2,240	0,886	0,418	0,339	3,240	0,896	0,304
0,468	2,260	0,886	0,415	0,337	3,260	0,896	0,302
0,465	2,280	0,886	0,412	0,335	3,280	0,897	0,301
0,461	2,300	0,886	0,408	0,334	3,300	0,897	0,299
0,457	2,320	0,886	0,405	0,332	3,320	0,897	0,298
0,454	2,340	0,886	0,402	0,330	3,340	0,898	0,296
0,451	2,360	0,886	0,399	0,328	3,360	0,898	0,295
0,447	2,380	0,886	0,396	0,326	3,380	0,898	0,293
0,444	2,400	0,886	0,393	0,325	3,400	0,898	0,292
0,441	2,420	0,887	0,391	0,323	3,420	0,899	0,290

<i>V</i>	<i>b</i>	<i>Kb</i>	<i>Cb</i>	<i>V</i>	<i>b</i>	<i>Kb</i>	<i>Cb</i>
0,437	2,440	0,887	0,388	0,321	3,440	0,899	0,289
0,434	2,460	0,887	0,385	0,320	3,460	0,899	0,287
0,431	2,480	0,887	0,382	0,318	3,480	0,899	0,286
0,428	2,500	0,887	0,380	0,316	3,500	0,900	0,285
0,425	2,520	0,887	0,377	0,315	3,520	0,900	0,283
0,422	2,540	0,888	0,374	0,313	3,540	0,900	0,282
0,419	2,560	0,888	0,372	0,312	3,560	0,901	0,281
0,416	2,580	0,888	0,369	0,310	3,580	0,901	0,279
0,413	2,600	0,888	0,367	0,308	3,600	0,901	0,278
0,410	2,620	0,888	0,364	0,307	3,620	0,901	0,277
0,407	2,640	0,889	0,362	0,305	3,640	0,902	0,275
0,402	2,680	0,889	0,357	0,304	3,660	0,902	0,274
0,399	2,700	0,889	0,355	0,302	3,680	0,902	0,273
0,397	2,720	0,889	0,353	0,301	3,700	0,902	0,272
0,394	2,740	0,890	0,351	0,299	3,720	0,903	0,270
0,392	2,760	0,890	0,348	0,298	3,740	0,903	0,269
0,389	2,780	0,890	0,346	0,297	3,760	0,903	0,268
0,387	2,800	0,890	0,344	0,295	3,780	0,903	0,267
0,384	2,820	0,891	0,342	0,294	3,800	0,904	0,266
0,382	2,840	0,891	0,340	0,292	3,820	0,904	0,264
0,379	2,860	0,891	0,338	0,291	3,840	0,904	0,263
0,377	2,880	0,891	0,336	0,290	3,860	0,905	0,262
0,375	2,900	0,892	0,334	0,288	3,880	0,905	0,261
0,372	2,920	0,892	0,332	0,287	3,900	0,905	0,260
0,370	2,940	0,892	0,330	0,286	3,920	0,905	0,259
0,368	2,960	0,892	0,328	0,284	3,940	0,906	0,258
0,366	2,980	0,893	0,326	0,283	3,960	0,906	0,256
0,363	3,000	0,893	0,325	0,282	3,980	0,906	0,255
0,361	3,020	0,893	0,323	0,280	4,000	0,906	0,254
0,359	3,040	0,893	0,321	0,279	4,020	0,907	0,253
0,357	3,060	0,894	0,319	0,278	4,040	0,907	0,252
0,355	3,080	0,894	0,317	0,277	4,060	0,907	0,251
0,353	3,100	0,894	0,316	0,276	4,080	0,907	0,250
0,351	3,120	0,895	0,314	0,274	4,100	0,908	0,246
0,349	3,140	0,895	0,312	0,273	4,120	0,908	0,243
0,347	3,160	0,895	0,310	0,272	4,140	0,908	0,247
0,345	3,180	0,895	0,309	0,271	4,160	0,908	0,246
0,343	3,200	0,896	0,307	0,270	4,180	0,909	0,245
0,341	3,220	0,896	0,306	0,268	4,200	0,909	0,244

## Распределение Стьюдента

Число степеней свободы	Вероятность						
	0,70	0,80	0,90	0,95	0,975	0,99	0,995
1	0,73	1,38	3,08	6,31	12,71	31,82	63,66
2	0,62	1,06	1,89	2,92	4,30	6,96	9,92
3	0,58	0,98	1,64	2,35	3,18	4,54	5,84
4	0,57	0,94	1,53	2,13	2,78	3,75	4,60
5	0,56	0,92	1,48	2,01	2,57	3,36	4,03
6	0,55	0,91	1,44	1,94	2,45	3,14	3,71
7	0,55	0,90	1,42	1,90	2,36	3,00	3,50
8	0,55	0,89	1,40	1,86	2,31	2,90	3,36
9	0,54	0,88	1,38	1,83	2,26	2,82	3,25
10	0,54	0,88	1,37	1,81	2,23	2,76	3,17
11	0,54	0,88	1,36	1,80	2,20	2,72	3,11
12	0,54	0,87	1,36	1,78	2,18	2,68	3,06
13	0,54	0,87	1,35	1,77	2,16	2,65	3,01
14	0,54	0,87	1,34	1,76	2,14	2,62	2,98
15	0,54	0,87	1,34	1,75	2,13	2,60	2,95
16	0,54	0,86	1,34	1,75	2,12	2,58	2,92
17	0,53	0,86	1,33	1,74	2,11	2,57	2,90
18	0,53	0,86	1,33	1,73	2,10	2,55	2,88
19	0,53	0,86	1,33	1,73	2,09	2,54	2,86
20	0,53	0,86	1,32	1,72	2,09	2,53	2,84
21	0,53	0,86	1,32	1,72	2,08	2,52	2,83
22	0,63	0,86	1,32	1,72	2,07	2,51	2,82
23	0,53	0,86	1,32	1,71	2,07	2,50	2,81
24	0,53	0,86	1,32	1,71	2,06	2,49	2,80
25	0,53	0,86	1,32	1,71	2,06	2,48	2,79
26	0,53	0,86	1,32	1,71	2,06	2,48	2,78
27	0,53	0,86	1,31	1,70	2,05	2,47	2,77
28	0,53	0,86	1,31	1,70	2,05	2,47	2,76
29	0,53	0,85	1,31	1,70	2,04	2,40	2,76
30	0,53	0,85	1,31	1,70	2,04	2,46	2,75
40	0,53	0,85	1,30	1,68	2,02	2,42	2,70
50	0,53	0,85	1,30	1,67	2,01	2,40	2,68
60	0,53	0,85	1,30	1,67	2,00	2,39	2,66
80	0,53	0,85	1,29	1,66	1,99	2,37	2,64
100	0,53	0,84	1,29	1,66	1,98	2,36	2,63
200	0,52	0,84	1,29	1,65	1,97	2,34	2,60
500	0,52	0,84	1,28	1,65	1,96	2,33	2,59

Распределение Фишера (F)

Число степеней свободы	1- $\alpha$	Число степеней свободы для числителя											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	0,75	5,83	7,50	8,20	8,58	8,82	8,98	9,10	9,19	9,26	9,32	9,36	9,41
	0,90	39,9	49,5	53,6	55,8	57,2	58,2	58,9	59,4	59,9	60,2	60,5	60,7
	0,95	161	200	216	225	230	234	237	239	241	242	243	244
2	0,75	2,57	3,00	3,15	3,23	3,28	3,31	3,34	3,35	3,37	3,38	3,39	3,39
	0,90	8,53	9,00	9,16	9,24	9,29	9,33	9,35	3,37	9,38	9,39	9,40	9,41
	0,95	18,5	19,0	19,2	19,2	19,3	19,3	19,4	19,4	19,4	19,4	19,4	19,4
	0,99	98,5	99,0	99,2	99,2	99,3	99,3	99,4	99,4	99,4	99,4	99,4	99,4
3	0,75	2,02	2,28	2,36	2,39	2,41	2,42	2,43	2,44	2,44	2,44	2,45	2,45
	0,90	5,54	5,46	5,39	5,34	5,31	5,28	5,27	5,25	5,24	5,23	5,22	5,22
	0,95	10,1	9,55	9,28	9,12	9,10	8,94	8,89	8,85	8,81	8,79	8,76	8,74
	0,99	34,1	30,8	29,5	28,7	28,2	27,9	27,7	27,5	27,3	27,2	27,1	27,1
4	0,75	1,81	2,00	2,05	2,06	2,07	2,08	2,08	2,08	2,08	2,08	2,08	2,08
	0,90	4,54	4,32	4,19	4,11	4,05	1,01	3,98	3,95	3,94	3,92	3,91	3,90
	0,95	7,71	6,94	6,59	6,39	6,26	6,16	6,09	6,04	6,00	5,96	5,94	5,91
	0,99	21,2	18,0	16,7	16,0	15,5	15,2	15,0	14,8	14,7	14,5	14,4	14,4
5	0,75	1,69	1,85	1,88	1,89	1,89	1,89	1,89	1,89	1,89	1,89	1,89	1,89
	0,90	4,06	3,78	3,62	3,52	3,45	3,40	3,37	3,34	3,32	3,30	3,28	3,27
	0,95	6,61	5,79	5,41	5,19	5,05	4,95	4,88	4,82	4,77	1,74	4,71	4,68
	0,99	16,3	13,3	12,1	11,4	11,0	10,7	10,5	10,3	10,2	10,1	9,96	9,89
6	0,75	1,62	1,76	1,78	1,79	1,79	1,78	1,78	1,77	1,77	1,77	1,77	1,77
	0,90	3,78	3,46	3,29	3,18	3,11	3,05	3,01	2,98	2,96	2,94	2,92	2,90
	0,95	5,99	5,14	4,76	4,53	4,39	4,28	4,21	4,15	4,10	4,06	4,03	4,00
	0,99	13,7	10,9	9,78	9,15	8,75	8,47	8,26	8,10	7,98	7,87	7,79	7,72
7	0,75	1,57	1,70	1,72	1,72	1,71	1,71	1,70	1,70	1,69	1,69	1,59	1,68
	0,90	3,59	3,26	3,07	2,96	2,88	2,83	2,78	2,75	2,72	2,70	2,68	2,67
	0,95	5,59	4,74	4,35	4,12	3,97	3,87	3,79	3,73	3,68	3,64	3,60	3,57
	0,99	12,2	9,55	8,45	7,85	7,46	7,19	6,99	6,84	6,72	6,62	6,54	6,47
8	0,75	1,54	1,66	1,67	1,66	1,66	1,65	1,64	1,64	1,64	1,63	1,63	1,62
	0,90	3,46	3,11	2,92	2,81	2,73	2,67	2,62	2,59	2,56	2,54	2,52	2,50
	0,95	5,32	4,46	4,07	3,84	3,69	3,58	3,50	3,44	3,39	3,35	3,31	3,28
	0,99	11,3	8,66	7,59	7,01	6,63	6,37	6,18	6,03	5,91	5,81	5,73	5,67

Протокол испытаний по ГОСТ 23.220–84

Дата \_\_\_\_\_

Испытание группы \_\_\_\_\_ по ГОСТ \_\_\_\_\_

Кинематический тип сопряжения по ГОСТ 23.224-86 \_\_\_\_\_

Испытательная установка \_\_\_\_\_

1 Характеристика образцов

Образец		Рабочий слой		Геометрические параметры			Твердость	Прилегаемость, %
Тип	Маркировка	Вид трения	Технология изготовления	Диаметр _____ ширина	Отклонение от формы	Шероховатость		

2 Характеристика среды испытаний

Вид среды	Наименование или марка среды	Дополнительная характеристика среды	Концентрация абразивных материалов в среде
Смазочный материал			
Абразивный материал			

3 Режим испытаний

Давление	Скорость относительного скольжения	Подогрев масла	Метод смазывания по ГОСТ 27.674–88	Режим подачи среды испытаний

4 Результаты испытаний образцов

Опыт	Число оборотов образца	Длина искусственной базы	Путь, пройденный образцом, м	Износ образца, мм	Интенсивность изнашивания, мм/м

### Пример обработки информации о надежности изделияа

Исходную информацию о ресурсе машины записывают в текстовый файл с помощью простейшего редактора «Блокнот» в виде колонки, в том же каталоге, где будет находиться протокол MathCad и задать имя текстового файла, например Res.txt. После этого создается протокол MathCad.

1. Вводят информацию из созданного текстового файла с информацией в протокол MathCad с помощью функции **READPRN** и определяют количество информации с помощью функции **length**. Предварительно переменной **MyFile** следует задать имя текстового файла с данными о ресурсах машин.

$MyFile := "Res.txt".$

Вектор ресурсов исследуемого изделияа (X) в тыс. км пробега

$X := READPRN(MyFile)$

Количество информации

$N := length(X); N = 38 .$

2. Строят вариационный ряд, располагая информацию о ресурсе машины в порядке возрастания с помощью функции **sort**. Данные перезаписывают в исходный текстовый файл с помощью функции **WRITEPRN** и создают индекс  $j := 0 .. N - 1$

$X := sort(X)$

$WRITEPRN(MyFile) := X .$

3. Определяют точечные характеристики распределения ресурса

Для этого определяют число интервалов (n) в статистическом ряду по одной из формул

$$n := \text{ceil}(\sqrt{N}) + nd, n = 9 ,$$

$$n := \text{ceil}(1 + 3.2 \cdot \log(N)) + nd, n = 9$$

где nd – количество дополнительных интервалов, вводимых для улучшения вида графика  $nd \equiv 2$ , знак тождества позволяет задать переменную после использования ее в формуле, **ceil** – функция округления MathCad.

Для того, чтобы вся информация вошла в статистический ряд, величину интервала увеличивают с помощью коэффициента 1,001

$$dX := \frac{X_{N-1} - X_0}{n - nd} \cdot 1.001; dX = 50.85 \text{ тыс. км,}$$

где  $dX_0, dX_{N-1}$  – начальное и конечное значения ресурсов в вариационном ряду.

Величина смещения распределения определяется по выражению

$$x_{см} := X_0 - 0.5 \cdot dX; x_{см} = 82.375 \text{ тыс. км.}$$

Среднее значение ресурса, тыс. км

$$x_{\text{ср}} := \frac{\sum_{j=0}^{N-1} X_j}{N}; x_{\text{ср}} = 243.48 \text{ тыс. км.}$$

Среднеквадратическое отклонение, тыс. км

$$\sigma := \sqrt{\frac{\sum_{j=0}^{N-1} (x_{\text{ср}} - X_j)^2}{N-1}}; \sigma = 69.66 \text{ тыс. км.}$$

Коэффициент вариации ресурса автомобиля

$$V := \frac{\sigma}{x_{\text{ср}} - x_{\text{см}}}; V = 0.432$$

4. Проверяют информацию на выпадающие точки с помощью критерия Ирвина. Значение критерия определяют для минимального и максимального ресурса в вариационном ряду

$$\lambda_0 := \frac{X_1 - X_0}{\sigma}; \lambda_0 = 0.419$$

$$\lambda_N := \frac{X_{N-1} - X_{N-2}}{\sigma}; \lambda_N = 1.358$$

Критическое значение критерия Ирвина для вероятности 0,99 рассчитывают по эмпирической формуле или определяют по прил. 6

$$\lambda_{\text{кр}} := 1.4832 + \frac{4.41719}{N}; \lambda_{\text{кр}} = 1.599$$

Так как расчетные значения критерия Ирвина меньше критического, то минимальное и максимальное значения ресурса в вариационном ряду не являются выпадающими и расчет может быть продолжен, в противном случае выпадающие точки следует удалить из текстового файла с исходной информацией (см. п. 1).

5. Теоретический закон распределения выбирают по коэффициенту вариации. Так как коэффициент вариации находится в интервале 0,33–0,8 принимают закон распределения ресурса машины: закон нормального распределения (ЗНР) или закон распределения Вейбулла (ЗРВ).



Для визуального выбора закона распределения следует построить графики полигона распределения и дифференциальных функций теоретических законов, предварительно выбранных.

Для построения графиков определяют вектор начальных и конечных значений наработки для каждого интервала и вектор средних значений для каждого интервала по выражениям

$$X_{n_i} := X_0 + dX \cdot (i - 1) ; X_k := X_n + dX ; X_{c_i} := X_{n_i} + \frac{dX}{2} .$$

Вектор частоты попаданий информации в каждый из интервалов определяют с использованием функцию MathCad *hist* , предварительно задавшись переменной-индексом интервала  $i := 0 .. n$

$$m := \text{hist}(X_n, X)$$

Определяют вектор опытной вероятности для каждого интервала P

$$P := \frac{m}{N}$$

Рассчитывают накопленные опытные вероятности  $\Sigma P$ , соответствующие наработке конца интервала, предварительно задавшись индексом интервала  $z := 0 .. n - 1$

$$\Sigma P_z := \sum_{i=0}^z P_i$$

Результаты расчетов по указным выше векторам приводят одновременно для обеспечения компактности протокола.

Графики строят по опытным данным:

- гистограмму (ступенчатый график) по опытной вероятности P для средних значений интервалов (тип линии – SolidBar) (рис. I);
- полигон распределения по опытной вероятности P для средних значений интервалов (тип линии – Lines);
- кривую накопленных опытных вероятностей  $\Sigma P$  для конечных значений интервалов (тип линии – Lines).

$X_{n_i} =$	$X_{c_i} =$	$X_{k_i} =$						
56.949	82.375	107.8	$m =$	$P =$	$\Sigma P =$			
107.8	133.225	158.651				0	0	0
158.651	184.076	209.502				4	0.105	0.105
209.502	234.927	260.352				8	0.211	0.316
260.352	285.778	311.203				11	0.289	0.605
311.203	336.629	362.054				10	0.263	0.868
362.054	387.479	412.905				3	0.079	0.947
412.905	438.33	463.756				1	0.026	0.974
463.756	489.181	514.606				1	0.026	1
514.606	540.032	565.457				0	0	1

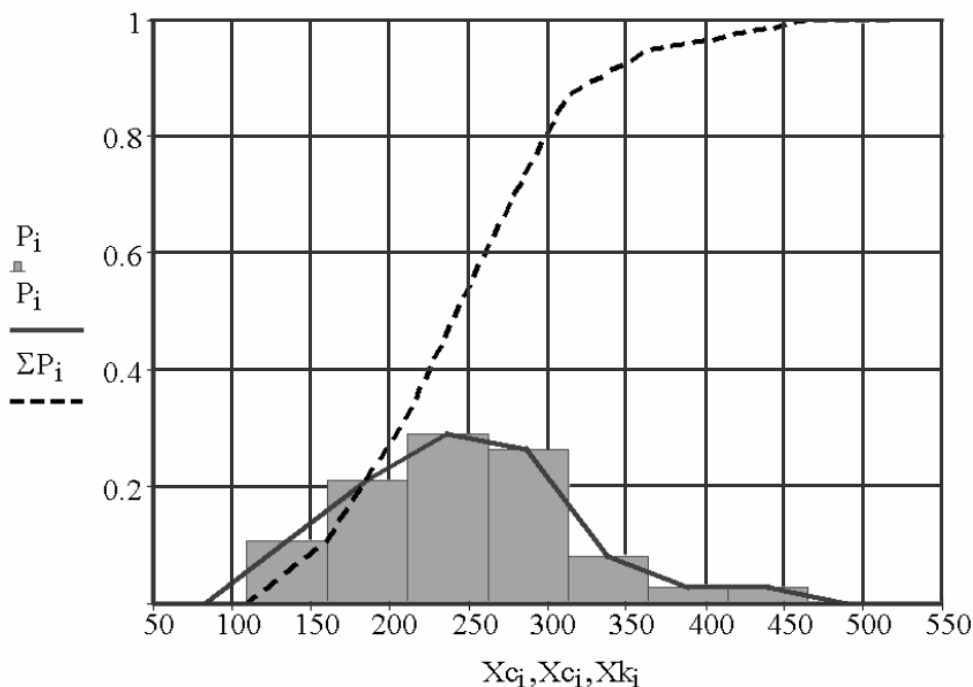


Рис. I. Опытные зависимости распределения ресурса машины (полигон, гистограмма, кривая накопленных опытных вероятностей)

Перед построением сравнительных графиков (рис. II) определяют значения дифференциальных функций теоретических законов распределения для каждого интервала.

Дифференциальную функцию нормального закона распределения рассчитывают по формуле

$$fN_i := \frac{1 \cdot dX}{\sigma \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot e^{-\frac{(X_{c_i} - x_{cp})^2}{2 \cdot \sigma^2}}$$

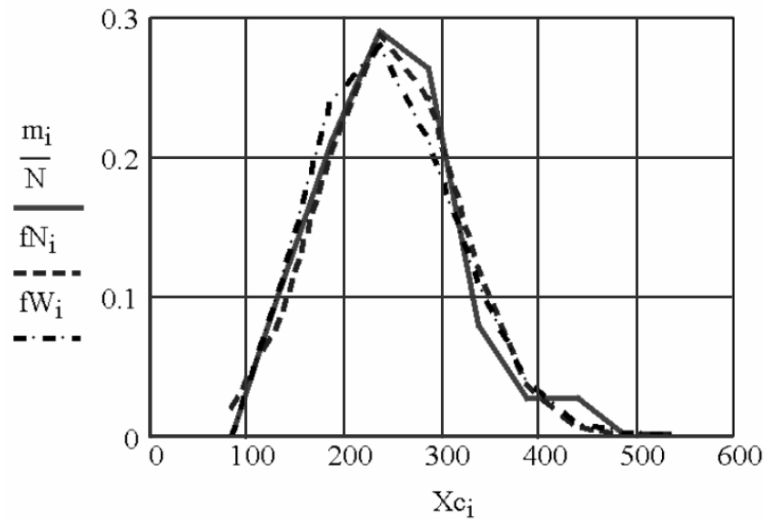


Рис. II. Полигон распределения и дифференциальные функции теоретических законов (ЗНР и ЗРВ)

Для расчета дифференциальной функции закона Вейбулла определяют параметры этого закона:

параметр формы закона Вейбулла **b**

$$b := \frac{1}{\sqrt{1.06}} ; b = 2.432 ,$$

масштабный параметр **a** рассчитывают, по формуле

$$a := 1.11(x_{cp} - x_{cm}); a = 178.829 \text{ тыс. км.}$$

Дифференциальную функцию закона распределения Вейбулла определяют по формуле

$$fW_i := \frac{b \cdot dX}{a} \cdot \left( \frac{X_{c_i} - x_{cm}}{a} \right)^{b-1} \cdot e^{-\left( \frac{X_{c_i} - x_{cm}}{a} \right)^b}$$

Результаты расчета представить в виде векторов

fN =	0.02007	fW =	0
	0.08321		0.10896
	0.20245		0.2392
	0.28905		0.27922
	0.24221		0.21181
	0.11911		0.1088
	0.03438		0.03799
	0.00582		0.00893
	0.00058		0.0014
	0.00003		0.00014

По результатам расчетов строят сравнительные графики (рис. II), которые используют для выбора теоретического закона распределения.

Как видно из сравнительного графика (рис. II), оба предварительно выбранных закона хорошо согласуются с опытными данными.

6. Для более точного выбора закона распределения используют критерий Пирсона  $\chi^2$ :

для закона нормального распределения

$$\chi^2_N := \sum_{i=0}^{n-1} \frac{(P_i - fN_i)^2}{fN_i}; \chi^2_N = 0.11619 ,$$

для закона распределения Вейбулла

$$\chi^2_W := \sum_{i=0}^{n-1} \frac{(P_i - fW_i)^2}{fW_i}; \chi^2_W = 0.06337 .$$

Вероятность совпадения опытных данных с расчетными определяется по критерию  $\chi^2$ , допустимая вероятность 0,1.

Число степеней свободы определяют с учетом числа интервалов в статистическом ряду

$$v := \text{length}(Xn) - 1; v = 9 .$$

Вероятности согласования данных определяют с использованием функции распределения  $\chi^2$  *pchisq*:

для закона нормального распределения

$$PN := 1 - \text{pchisq}(\chi^2_N, v); PN = 0.9999999 ,$$

для закона распределения Вейбулла

$$PW := 1 - \text{pchisq}(\chi^2_W, v); PW = 1 .$$

Таким образом, закон распределения Вейбулла принимают как закон распределения ресурса машины, так как он имеет вероятность совпадения большую, чем у закона нормального распределения.

7. Интервальные характеристики распределения ресурса генеральной совокупности машин определяют с использованием доверительной вероятности  $\alpha := 0.95$ :

нижняя доверительная граница одиночного значения ресурса для ЗНР

$$xN_{H\alpha} := x_{cp} - qt(\alpha, N) \cdot \sigma; xN_{H\alpha} = 126 \text{ тыс. км};$$

верхняя доверительная граница одиночного значения ресурса для ЗНР

$$xN_{B\alpha} := x_{cp} + qt(\alpha, N) \cdot \sigma; xN_{B\alpha} = 360.9 \text{ тыс. км};$$

нижняя доверительная граница одиночного значения ресурса для ЗРВ

$$xW_{B\alpha} := qweibull\left[\frac{(1-\alpha)}{2}, b\right] \cdot a + x_{CM}; \quad xW_{B\alpha} = 121.8 \quad \text{тыс. км};$$

верхняя доверительная граница одиночного значения ресурса для ЗРВ

$$xW_{H\alpha} := qweibull\left[\frac{(1+\alpha)}{2}, b\right] \cdot a + x_{CM}; \quad xW_{H\alpha} = 388.2 \quad \text{тыс. км};$$

Доверительные границы для среднего значения ресурса определяют для любого закона по выражениям:

нижняя доверительная граница среднего значения ресурса

$$x_{срH\alpha} := x_{ср} - qt(\alpha, N) \cdot \frac{\sigma}{\sqrt{N}}; \quad x_{срH\alpha} = 224.4 \quad \text{тыс. км};$$

верхняя доверительная граница среднего значения ресурса

$$x_{срB\alpha} := x_{ср} + qt(\alpha, N) \cdot \frac{\sigma}{\sqrt{N}}; \quad x_{срB\alpha} = 262.5 \quad \text{тыс. км}.$$

Для расчета относительной ошибки переноса следует рассчитать верхнюю одностороннюю доверительную границу:

$$x_{срB0\alpha} := x_{ср} + qt(2 \cdot \alpha - 1, N) \cdot \frac{\sigma}{\sqrt{N}}; \quad x_{срB0\alpha} = 258 \quad \text{тыс. км}$$

$$\delta := \frac{x_{срB0\alpha} - x_{ср}}{x_{ср} - x_{CM}} \cdot 100; \quad \delta = 9.148 \quad \%$$

*Вывод:* на основании обработки информации о ресурсе 38 изделий определено, что одиночное значение ресурса находится в пределах 121,8 – 388,2 тыс. км, а среднее значение ресурса – 224,4–262,5 тыс. км при доверительной вероятности 0,95 и относительной ошибке переноса, не превышающей 10 %.

Пример протокола обработки результатов  
полнофакторного эксперимента

1. Вводят исходные данные:

- число опытов эксперимента  $N := 8$ ,
- число коэффициентов в уравнении регрессии  $n := 8$ ,
- число повторностей опыта  $m := 4$ ,
- индекс повторности  $z := 0..m - 1$ ,
- индекс опыта  $i := 0..N - 1$ ,
- индекс коэффициента уравнения регрессии  $j := 0..n - 1$ ,
- уровень значимости  $\alpha := 0.05$ .

Составляют матрицу планирования эксперимента для плана  $2^3$  (X) и матрицу результатов опытов (U), представляющую собой совокупность результатов восьми опытов (интенсивность изнашивания образца, мм/м) по четырем повторностям

$$X := \begin{pmatrix} 1 & -1 & -1 & -1 & 1 & 1 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & -1 & -1 & -1 & -1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 & -1 & 1 & -1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & -1 & 1 & -1 & -1 & -1 \\ 1 & -1 & -1 & 1 & 1 & -1 & -1 & 1 \\ 1 & 1 & -1 & 1 & -1 & 1 & -1 & -1 \\ 1 & -1 & 1 & 1 & -1 & -1 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix} \quad U := \begin{pmatrix} 21.75 & 22.15 & 22.25 & 22.6 \\ 23.55 & 24.05 & 23.8 & 23.45 \\ 23.05 & 22.35 & 23.4 & 21.7 \\ 24.25 & 25.25 & 24.05 & 23.9 \\ 23.85 & 23.45 & 23.1 & 23.15 \\ 25.4 & 25.7 & 25.2 & 25.2 \\ 25.4 & 24.4 & 24.95 & 25.1 \\ 26.95 & 26.45 & 26.1 & 27.05 \end{pmatrix} \cdot 10^{-4}$$

2. Определяют среднее значение интенсивности изнашивания для каждого опыта

$$U_{ci} := \frac{\sum_z U_{i,z}}{m}$$

3. Рассчитывают дисперсии в строках плана эксперимента (для каждого опыта)

$$D_i := \frac{1}{m-1} \cdot \sum_{z=0}^{m-1} (U_{i,z} - U_{ci})^2$$

4. Проверяют гипотезу об однородности дисперсий по критерию Кохрена (G), предварительно рассчитав значение критерия

$$G_{\max} := \frac{\max(D)}{\sum_i D_i}; G_{\max} = 0.339 .$$

Определяют критическое значение  $G_{кр}$  по прил. 20 для степеней свободы  $\nu_1 := m - 1$ ,  $\nu_2 := N$ . Критическое значение критерия Кохрена равно  $G_{кр} := 0.4377$  при  $\nu_1=3$ ,  $\nu_2=8$ ,  $\alpha=0,05$ .

$G_{кр}$  можно также рассчитать по эмпирической формуле для 5 % – го уровня значимости с достоверностью 98 %

$$G_{кр} := -0.12016 + 1.929 \cdot \nu_1^{-0.207} \cdot \nu_2^{-0.487}; G_{кр} = 0.438 .$$

Так как  $G_{\max} < G_{кр}$ , то гипотеза об однородности дисперсий принимается, что означает удовлетворительную воспроизводимость опытов и позволяет продолжить обработку результатов эксперимента.

5. Определяют дисперсию ошибки эксперимента

$$D_{ош} := \frac{\left( \sum_i D_i \right)}{N}; D_{ош} = 2.10469 \times 10^{-9} .$$

6. Рассчитывают коэффициенты при факторах  $X_1$ ,  $X_2$ ,  $X_3$  и их взаимодействиях  $X_1 \cdot X_2$ ,  $X_1 \cdot X_3$ ,  $X_2 \cdot X_3$ ,  $X_1 \cdot X_2 \cdot X_3$  в уравнении регрессии (математической модели изучаемого процесса)

$U = b_0 + b_1 \cdot X_1 + b_2 \cdot X_2 + b_3 \cdot X_3 + b_4 \cdot X_1 \cdot X_2 + b_5 \cdot X_1 \cdot X_3 + b_6 \cdot X_2 \cdot X_3 + b_7 \cdot X_1 \cdot X_2 \cdot X_3$   
по формуле

$$b_j := \frac{\sum_i X_{i,j} \cdot U_{ci}}{N} .$$

7. Определяют дисперсию коэффициентов уравнения регрессии, которая оценивается числом степеней свободы  $\nu_b := N \cdot (m - 1)$   $\nu_b = 24$

$$D_b := \frac{D_{ош}}{N \cdot m}; D_b = 6.577148 \times 10^{-11} .$$

8. Для оценки значимости полученных коэффициентов уравнения регрессии рассчитывают t-статистики Стьюдента

$$t_j := \left| \frac{b_j}{\sqrt{D_b}} \right|$$

9. По числу степеней свободы дисперсии коэффициентов регрессии и вероятности  $(1-\alpha/2)$  определить критическое значение  $t$ -статистики, используя при этом функцию квантилей распределения Стьюдента MathCad *qt*

$$t_{кр} := qt\left(1 - \frac{\alpha}{2}, vb\right); t_{кр} = 2.064$$

10. С помощью функции условия MathCad *if* незначимые коэффициенты, у которых  $t$ -статистика меньше критической, принимают равными нулю. Значимые коэффициенты уравнения регрессии обозначают другой переменной

$$bb_j := if(t_j < t_{кр}, 0, b_j)$$

11. Используя значимые коэффициенты уравнения регрессии, определяют с помощью модели расчетные значения интенсивности изнашивания для всех опытов по усеченной модели

$$Uu_i := \sum_j bb_j \cdot X_{i,j}$$

12. Для компактности представления результатов расчетов представляют их в строке

$$D = \begin{pmatrix} 0.000000001223 \\ 0.000000000723 \\ 0.0000000005708 \\ 0.0000000003706 \\ 0.000000000119 \\ 0.000000000558 \\ 0.0000000001756 \\ 0.0000000001973 \end{pmatrix}; b = \begin{pmatrix} 0.002416 \\ 0.000087 \\ 0.000049 \\ 0.000093 \\ -0.000001 \\ 0.000005 \\ 0.000022 \\ -0.000007 \end{pmatrix}; bb = \begin{pmatrix} 0.002416 \\ 0.000087 \\ 0.000049 \\ 0.000093 \\ 0 \\ 0 \\ 0.000022 \\ 0 \end{pmatrix};$$

$$t = \begin{pmatrix} 297.859 \\ 10.674 \\ 6.05 \\ 11.521 \\ 0.154 \\ 0.617 \\ 2.697 \\ 0.809 \end{pmatrix}; Uc = \begin{pmatrix} 0.002219 \\ 0.002371 \\ 0.002263 \\ 0.002436 \\ 0.002339 \\ 0.002537 \\ 0.002496 \\ 0.002664 \end{pmatrix}; Uu = \begin{pmatrix} 0.002208 \\ 0.002382 \\ 0.002263 \\ 0.002436 \\ 0.002352 \\ 0.002525 \\ 0.002493 \\ 0.002667 \end{pmatrix}.$$



13. Оценку адекватности усеченной модели эксперимента выполняют с помощью остаточной дисперсии, предварительно задавшись числом значимых коэффициентов уравнения регрессии  $d := 5$

$$\text{Дост} := \frac{1}{N - d} \cdot \sum_i m \cdot (U_{ci} - U_{ui})^2; \text{Дост} = 7.427 \times 10^{-10} .$$

14. Критерий Фишера (F) определяют как отношение остаточной дисперсии к дисперсии ошибки эксперимента

$$F := \frac{\text{Дост}}{\text{Дош}}; F = 0.353 .$$

Критическое значение критерия Фишера определяют по числу степеней свободы, характеризующему остаточную дисперсию  $v_{\text{ост}} := N - d$  и дисперсию ошибки  $v_{\text{ош}} := N \cdot (m - 1)$  с использованием функции квантилей распределения Фишера  $qF$

$$F_{\text{кр}} := qF(1 - \alpha, v_{\text{ост}}, v_{\text{ош}}); F_{\text{кр}} = 3.009$$

при  $v_{\text{ост}} = 3$  и  $v_{\text{ош}} = 24$ .

15. Сравнивая расчетное значение критерия F с критическим значением для этого распределения при вероятности  $(1 - \alpha)$ , принимают решение. Так как  $F < F_{\text{кр}}$ , то гипотеза об адекватности модели эксперимента принимается, поэтому адекватной моделью эксперимента может служить усеченное уравнение регрессии

$$U = 0,002416 + 0,000087X_1 + 0,000049 \cdot X_2 + 0,000093 \cdot X_3 + 0,000022 \cdot X_2 \cdot X_3.$$

16. В ы в о д . Анализируя полученное уравнение, следует отметить, что наибольшее влияние на интенсивность изнашивания U оказывают факторы  $X_1, X_3$ , увеличение которых приводит к возрастанию интенсивности изнашивания (положительный знак при коэффициенте уравнения регрессии) при изменении их в заданных пределах. На интенсивность изнашивания оказывает также взаимное влияние факторов  $X_2, X_3$ , однако оно меньше, чем влияние факторов  $X_1, X_3$ , в четыре раза.

Значения показателя степени зависимости параметра  
технического состояния от наработки

Наименование параметра технического состояния узла	Показатель степени $\alpha$
Мощность двигателя	0,8
Расход топлива	0,9
Неравномерность топливоподачи	1,0
Угар масла	1,8
Износ плунжерных пар	1,1
Расход газов, прорывающихся в картер	1,3
Износ соединения «гильза-поршень»	1,3
Износ шатунных и коренных подшипников двигателя	1,1
Зазор между клапаном и коромыслом ГРМ	1,1
Утопание клапанов	1,6
Зазоры в кривошипно-шатунном механизме	1,1...1,6
Износ кулачков распределительного вала	1,1
Радиальный зазор в подшипниках качения и скольжения	1,5
Износ посадочных гнезд подшипников корпусов	1,0...1,5
Износ зубьев шестерен по толщине	1,4
Износ валиков, пальцев и осей	1,1
Износ шлицевых соединений	1,0
Износ дисков муфт сцепления, накладок тормозов и тормозных барабанов	1,0
Удлинение шага гусеничной и втулочно-роликовой цепи	1,0

Шероховатость поверхности после механической обработки

Обрабатываемые поверхности	Методы обработки		Параметры шероховатости												
			Rz					Ra					Rz		
			320	160	80	40	20	2,5	1,25	0,63	0,32	0,160	0,080	0,040	0,100
Наружные цилиндрические	Обтачивание	Предварительное	■	■	■										
		Чистовое			■	■	■								
		Тонкое						■							
	Шлифование	Предварительное						■							
		Чистовое							■	■					
		Тонкое								■	■				
	Притирка	Грубая								■	■				
		Средняя									■	■			
		Тонкая										■	■	■	■
	Отделка абразивным полотном									■	■	■	■		
Обкатывание роликом										■	■	■	■		
Шлифование, суперфиниширование											■	■	■	■	
Внутренние цилиндрические	Растачивание	Предварительное	■	■	■										
		Чистовое			■	■	■								
		Тонкое						■							
	Сверление			■	■	■									
	Зенкерование	Черновое (по корке)			■	■	■								
		Чистовое						■							
	Развертывание	Нормальное							■	■					
		Точное								■	■				
		Тонкое									■	■			
	Протягивание						■								
	Внутреннее шлифование	Предварительное							■	■					
		Чистовое								■	■	■			
	Калибрование шариком									■	■	■			
Притирка	Грубая									■	■				
	Средняя										■	■			
	Тонкая											■	■	■	
Шлифование Притирка, хонингование	Нормальное								■	■					
	Зеркальное										■	■	■	■	
Плоскости	Строгание	Предварительное	■	■	■										
		Чистовое			■	■	■								
		Тонкое						■							
	Цилиндрическое фрезерование	Предварительное		■	■	■	■								
		Чистовое			■	■	■								
		Тонкое						■							
	Торцовое фрезерование	Предварительное		■	■	■	■								
		Чистовое			■	■	■								
		Тонкое						■							
	Торцовое точение	Предварительное	■	■	■										
		Чистовое			■	■	■								
		Тонкое						■							
	Плоское шлифование	Предварительное						■							
		Чистовое								■	■				
	Притирка	Грубая									■	■			
		Средняя										■	■		
		Тонкая											■	■	■

Верхние пятипроцентные критические значения  
критерия Кохрена

V <sub>1</sub>	V <sub>2</sub>													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	16	36	144	∞
2	0,9985	0,9750	0,9392	0,9057	0,8584	0,8534	0,8332	0,8159	0,8010	0,7880	0,7341	0,6602	0,5813	0,5000
3	0,9669	0,8709	0,7977	0,7457	0,7071	0,6771	0,6530	0,6333	0,6167	0,6025	0,5466	0,4748	0,4031	0,3333
4	0,9065	0,7679	0,6941	0,6287	0,5895	0,5598	0,5365	0,5175	0,5017	0,4884	0,4366	0,3720	0,3093	0,2500
5	0,8412	0,6838	0,5981	0,5440	0,5063	0,4783	0,4564	0,4387	0,4241	0,4118	0,3645	0,3066	0,2513	0,2000
6	0,7808	0,6161	0,5321	0,4803	0,4447	0,4184	0,3980	0,3817	0,3682	0,3568	0,3135	0,2612	0,2119	0,1667
7	0,7271	0,5612	0,4800	0,4307	0,3907	0,3726	0,3555	0,3384	0,3254	0,3154	0,2756	0,2278	0,1833	0,1429
8	0,6798	0,5157	0,4377	0,3910	0,3595	0,3362	0,3185	0,3043	0,2926	0,2829	0,2462	0,2022	0,1616	0,1250
9	0,6385	0,4775	0,4027	0,3584	0,3286	0,3067	0,2901	0,2768	0,2659	0,2568	0,2226	0,1820	0,1446	0,1111
10	0,6020	0,4450	0,3733	0,3311	0,3029	0,2823	0,2666	0,2541	0,2439	0,2353	0,2032	0,1655	0,1308	0,1000
12	0,5410	0,3924	0,3264	0,2880	0,2624	0,2439	0,2299	0,2187	0,2098	0,2020	0,1737	0,1403	0,1100	0,0833
15	0,4709	0,3346	0,2758	0,2419	0,2195	0,2034	0,1911	0,1815	0,1736	0,1671	0,1429	0,1144	0,0889	0,0667
20	0,3894	0,2705	0,2205	0,1921	0,1735	0,1602	0,1501	0,1422	0,1357	0,1305	0,1108	0,0879	0,0675	0,0500
24	0,3434	0,2354	0,1907	0,1656	0,1493	0,1374	0,1286	0,1216	0,1160	0,1113	0,0942	0,0743	0,0567	0,0417
30	0,2929	0,1980	0,1593	0,1377	0,1237	0,1137	0,1061	0,1002	0,0958	0,0921	0,0771	0,0604	0,0457	0,0333
40	0,2370	0,1576	0,1259	0,1082	0,0968	0,0887	0,0827	0,0780	0,0745	0,0713	0,0595	0,0462	0,0347	0,0250
60	0,1237	0,1131	0,0895	0,0766	0,0682	0,0623	0,0583	0,0552	0,0520	0,0497	0,0411	0,0316	0,0234	0,0167
120	0,0998	0,0632	0,0495	0,0419	0,0371	0,0337	0,0312	0,0292	0,0279	0,0266	0,0218	0,0165	0,0120	0,0083

Значения критерия Пирсона  $\chi^2$ 

$\kappa/P$	0,99	0,98	0,95	0,90	0,80	0,70	0,50	0,30	0,20	0,10	0,05	0,02	0,01	0,001
1	0,000	0,001	0,004	0,016	0,064	0,148	0,455	1,074	2,706	2,706	3,841	5,412	6,635	10,828
2	0,020	0,040	0,103	0,211	0,446	0,713	1,386	2,408	4,605	4,605	5,991	7,824	9,210	13,816
3	0,115	0,185	0,352	0,584	1,005	1,424	2,366	3,665	6,251	6,251	7,815	9,837	11,345	16,266
4	0,297	0,429	0,711	1,064	1,649	2,195	3,357	4,878	7,779	7,779	9,488	11,668	13,277	18,467
5	0,554	0,752	1,145	1,610	2,343	3,000	4,351	6,064	9,236	9,236	11,070	13,388	15,086	20,515
6	0,872	1,134	1,635	2,204	3,070	3,828	5,348	7,231	10,645	10,645	12,592	15,033	16,812	22,458
7	1,239	1,564	2,167	2,833	3,822	4,671	6,346	8,383	12,017	12,017	14,067	16,622	18,475	24,322
8	1,646	2,032	2,733	3,490	4,594	5,527	7,344	9,524	13,362	13,362	15,507	18,168	20,090	26,124
9	2,088	2,532	3,325	4,168	5,380	6,393	8,343	10,656	14,684	14,684	16,919	19,679	21,666	27,877
10	2,558	3,059	3,940	4,865	6,179	7,267	9,342	11,781	15,987	15,987	18,307	21,161	23,209	29,588
11	3,053	3,609	4,575	5,578	6,989	8,148	10,341	12,899	17,275	17,275	19,675	22,618	24,725	31,264
12	3,571	4,178	5,226	6,304	7,807	9,034	11,340	14,011	18,549	18,549	21,026	24,054	26,217	32,909
13	4,107	4,765	5,892	7,042	8,634	9,926	12,340	15,119	19,812	19,812	22,362	25,471	27,688	34,528
14	4,660	5,368	6,571	7,790	9,467	10,821	13,339	16,222	21,064	21,064	23,685	26,873	29,141	36,123
15	5,229	5,985	7,261	8,547	10,307	11,721	14,339	17,322	22,307	22,307	24,996	28,259	30,578	37,697
16	5,812	6,614	7,962	9,312	11,152	12,624	15,338	18,418	23,542	23,542	26,296	29,633	32,000	39,252
17	6,408	7,255	8,672	10,085	12,002	13,531	16,338	19,511	24,769	24,769	27,587	30,995	33,409	40,790
18	7,015	7,906	9,390	10,865	12,857	14,440	17,338	20,601	25,989	25,989	28,869	32,346	34,805	42,312
19	7,633	8,567	10,117	11,651	13,716	15,352	18,338	21,689	27,204	27,204	30,144	33,687	36,191	43,820
20	8,260	9,237	10,851	12,443	14,578	16,266	19,337	22,775	28,412	28,412	31,410	35,020	37,566	45,315
21	8,897	9,915	11,591	13,240	15,445	17,182	20,337	23,858	29,615	29,615	32,671	36,343	38,932	46,797
22	9,542	10,600	12,338	14,041	16,314	18,101	21,337	24,939	30,813	30,813	33,924	37,659	40,289	48,268
23	10,196	11,293	13,091	14,848	17,187	19,021	22,337	26,018	32,007	32,007	35,172	38,968	41,638	49,728
24	10,856	11,992	13,848	15,659	18,062	19,943	23,337	27,096	33,196	33,196	36,415	40,270	42,980	51,179
25	11,524	12,697	14,611	16,473	18,940	20,867	24,337	28,172	34,382	34,382	37,652	41,566	44,314	52,620
26	12,198	13,409	15,379	17,292	19,820	21,792	25,336	29,246	35,563	35,563	38,885	42,856	45,642	54,052
27	12,879	14,125	16,151	18,114	20,703	22,719	26,336	30,319	36,741	36,741	40,113	44,140	46,963	55,476
28	13,565	14,847	16,928	18,939	21,588	23,647	27,336	31,391	37,916	37,916	41,337	45,419	48,278	56,892
29	14,256	15,574	17,708	19,768	22,475	24,577	28,336	32,461	39,087	39,087	42,557	46,693	49,588	58,301
30	14,953	16,306	18,493	20,599	23,364	25,508	29,336	33,530	40,256	40,256	43,773	47,962	50,892	59,703

Коэффициент биномиального распределения

n	m														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
3			1												
4			4	1											
5			10	5	1										
6			20	15	6	1									
7			35	35	21	7	1								
8			56	70	56	28	8	1							
9			84	126	126	84	36	9	1						
10			120	210	252	210	120	45	10	1					
11			165	330	462	462	330	165	55	11	1				
12			220	495	792	924	792	495	220	66	12	1			
13			286	715	1287	1716	1716	1287	715	286	78	13	1		
14			364	1001	2002	3003	3432	3003	2002	1001	364	91	14	1	
15			455	1365	3003	5005	6435	6435	5005	3003	1365	455	105	15	1
16			560	1820	4368	8008	11440	12870	11440	8008	4368	1820	560	120	16
17			680	2380	6188	12376	19448	24310	24310	19448	12376	6188	2380	680	136
18			816	3060	8568	18564	31824	43758	48620	43758	31824	18564	8568	3060	816
19			969	3876	11628	27132	50388	75582	92378	92378	75582	50388	27132	11628	3876
20			1140	4845	15504	38760	77520	125970	167960	184756	167960	125970	77520	38760	15504
21			1330	5985	20349	54264	116280	203490	293930	352716	352716	293930	203490	116280	54264
22			1540	7315	26334	74613	170544	319770	497420	646646	705432	646646	497420	319770	170544
23			1771	8855	33649	100947	245157	490314	817190	1144066	1352078	1352078	1144066	817190	490314
24			2024	10626	42504	134596	346104	735471	1307504	1961256	2496144	2704156	2496144	1961256	1307504
25			2300	12650	53130	177100	480700	1081575	2042975	3268760	4457400	5200300	5200300	4457400	3268760
26			2600	14950	65780	230230	657800	1562275	3124550	5311735	7726160	9657700	10400600	9657700	7726160
27			2925	17550	80730	296010	888030	2220075	4686825	8436285	13037895	17383860	20058300	20058300	17383860
28			3276	20475	98280	376740	1184040	3108105	6906900	13123110	21474180	30421755	37442160	40116600	37442160
29			3654	23751	118755	475020	1560780	4292145	10015005	20030010	34597290	51895935	67863915	77558760	77558760

Шероховатость поверхности отверстий и валов в зависимости от класса точности

Квали-тет	Обозначение полей допусков	РАЗМЕРЫ, мм												
		1...3	3...6	6...10	10...18	18...30	30...50	50...80	80...120	120...180	180...260	260...360	360...500	500...630
6-7	ОТВЕРСТИЕ	H7	Ra=2,5											
		u7	Ra=2,5											
	г6,s6	Ra=2,5												
	h6	Ra=2,5												
	к6	Ra=2,5												
	js6	Ra=2,5												
	h6	Ra=2,5												
7-8	ОТВЕРСТИЕ	H7	Ra=2,5											
		s7,u8	Ra=2,5											
	h8,h9	Ra=2,5												
	g6	Ra=2,5												
	f7	Ra=2,5												
	e7	Ra=2,5												
	H8	Ra=2,5												
8-9	ОТВЕРСТИЕ	H7	Ra=2,5											
		s7,u8	Ra=2,5											
	H8,H9	Ra=2,5												
	u8	Ra=2,5												
	x8,u8,s8	Ra=2,5												
	h8,h9	Ra=2,5												
	f9,e9,e8	Ra=2,5												
11	ОТВЕРСТИЕ	H11	Rz=20											
		h11	Rz=20											
	d11	Rz=20												
	b11,c11	Rz=20												
	a11	Rz=20												
	H12	Rz=20												
	h12	Rz=20												
12	ОТВЕРСТИЕ	H12	Rz=40											
		h12	Rz=40											
	b12	Rz=40												
	H14	Rz=40												
	h14	Rz=40												
	b14	Rz=40												
	H14	Rz=40												
14	ОТВЕРСТИЕ	H14	Rz=80											
		h14	Rz=80											
	d14	Rz=80												
	b14,c14	Rz=80												
	a14	Rz=80												
	H16	Rz=80												
	h16	Rz=80												

## О Г Л А В Л Е Н И Е

ПРЕДИСЛОВИЕ .....	3
ВВЕДЕНИЕ .....	4
1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ И ПОНЯТИЯ .....	5
1.1. Качество машин .....	5
1.2. Основные понятия теории надежности .....	9
1.3. Изменение состояния технического изделия в процессе эксплуатации .....	14
1.4. Взаимосвязь надежности и экономичности технических систем .....	17
2. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ НАДЕЖНОСТИ ИЗДЕЛИЙ .....	19
2.1. Факторы, определяющие надежность технических систем .....	19
2.2. Причины нарушения работоспособности машин .....	23
2.2.1. Остаточные деформации .....	23
2.2.2. Усталостные разрушения .....	26
2.2.3. Коррозия .....	29
2.2.4. Пути снижения интенсивности коррозии .....	38
2.2.5. Старение материалов .....	39
2.2.6. Тепловое разрушение .....	40
2.2.7. Другие причины потери работоспособности .....	41
2.3. Теории трения и изнашивания .....	42
2.4. Трение .....	44
2.5. Явление безызносности – избирательный перенос .....	46
2.6. Изнашивание деталей машин .....	48
2.7. Виды изнашивания .....	51
2.7.1. Окислительное изнашивание .....	52
2.7.2. Абразивное изнашивание .....	54
2.7.3. Изнашивание при заедании .....	56
2.7.4. Усталостное изнашивание .....	58
2.7.5. Фреттинг-процесс и фреттинг-коррозия .....	59
2.7.6. Эрозионное изнашивание .....	61
2.8. Классификация отказов .....	63
3. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ НАДЕЖНОСТИ .....	66
3.1. Вероятность возникновения события .....	66
3.2. Распределение случайных величин .....	68
3.3. Точечные характеристики распределения случайных величин .....	69



3.4. Теоретические законы распределения случайных величин.....	71
3.5. Выбор теоретического закона распределения.....	75
3.6. Интервальные характеристики распределения случайной величины.....	77
3.7. Расчет показателей надежности технических изделий .....	79
3.7.1. Расчет показателей безотказности.....	79
3.7.2. Показатели долговечности .....	82
3.7.3. Показатели сохраняемости .....	84
3.7.4. Показатели ремонтпригодности .....	84
3.7.5. Комплексные показатели надежности.....	86
3.8. Расчет надежности сложных систем .....	87
3.8.1. Надежность систем с последовательным соединением элементов.....	87
3.8.2. Надежность систем с параллельным соединением элементов.....	89
3.8.3. Надежность систем типа “ $m$ из $N$ ” .....	90
3.8.4. Надежность систем с мостиковыми схемами .....	91
3.8.5. Надежность систем с комбинированным соединением элементов .....	93
4. ИСПЫТАНИЯ МАШИН НА НАДЕЖНОСТЬ .....	95
4.1. Цель и разновидности испытаний машин на надежность .....	95
4.2. Стандартные испытания на износостойкость .....	98
4.2.1. Методика проведения износных испытаний .....	98
4.2.2. Методика полнофакторного эксперимента .....	103
4.3. Ускоренные испытания на надежность .....	108
4.4. Эксплуатационные испытания машин на надежность .....	112
4.4.1. Разновидности эксплуатационных испытаний.....	112
4.4.2. Планы испытаний .....	114
4.4.3. Методы сбора информации .....	116
4.4.4. Методика обработки полной информации о показателе надежности .....	116
4.4.5. Обработка однократно усеченной информации.....	128
4.4.6. Обработка многократно усеченной информации .....	130
4.5. Контрольные испытания.....	132
4.5.1. Альтернативные испытания .....	133
4.5.2. Контроль по количественному признаку .....	135
4.5.3. Последовательный контроль .....	136
5. ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ ТЕХНИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ .....	138
5.1. Конструкторские мероприятия повышения надежности.....	138
5.2. Особенности методов резервирования технических систем .....	158
5.3. Технологические мероприятия повышения надежности.....	162

ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ КОНТРОЛЬНЫХ ЗАДАЧ.....	166
ВОПРОСЫ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ЗНАНИЙ.....	175
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	177
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	178
СЛОВАРЬ ТЕРМИНОВ .....	182
ПРИЛОЖЕНИЯ .....	189



Учебное издание

Лянденбургский Владимир Владимирович  
Иванов Александр Семенович  
Ширшиков Андрей Станиславович

ОСНОВЫ ТЕОРИИ НАДЕЖНОСТИ  
Учебное пособие

Редактор                    М.А. Сухова  
Верстка                    Н.А. Сазонова

---

Подписано в печать 3.04.14. Формат 60×84/16.  
Бумага офисная «Снегурочка». Печать на ризографе.  
Усл. печ. л. 13,25. Уч.-изд. л. 14,25. Тираж 300 экз. 1-й завод 100 экз.  
Заказ № 94.



---

Издательство ПГУАС.  
440028, г. Пенза, ул. Германа Титова, 28.